

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 13, выпуск 4(49), 2016

ISSN (Print) 1815-588X

Учредитель и издатель

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора
Александра I»

Адрес учредителя и издателя

190031, СПб., Московский пр., 9,
тел. (812) 314-92-32

Адрес редакции

190031, СПб., Московский пр., 9,
тел. (812) 314-92-32
e-mail: izvestia@izvestiapgups.org

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ № ФС2-7499 от 06.04.2005 г., выдано
Федеральной службой по надзору за соблюдением
законодательства в сфере массовых коммуникаций
и охране культурного наследия, Управление
по Северо-Западному федеральному округу

Журнал зарегистрирован

в Российском индексе научного цитирования РИНЦ

Журнал включен в перечень ведущих
рецензируемых научных журналов и изданий
(решение Президиума Высшей аттестационной
комиссии Минобрнауки России от 29.12.2015 г.,
№ 6/6)

Журнал имеет институт рецензирования

Журнал распространяется

по адресно-целевой подписке через редакцию
и каталог ОАО «Роспечать» (индекс 18509)

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор

А. Ю. Панычев, канд. экон. наук, доцент

Заместитель главного редактора

В. В. Сапожников, д-р техн. наук, профессор

Научный редактор

А. К. Канаев, д-р техн. наук, доцент

Выпускающий редактор

Э. А. Горелик

Перевод на английский язык

К. М. Царьков

Верстка

А. А. Стуканова

Редактор сайта

Л. А. Стрелкова

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Панычев Александр Юрьевич, канд. экон. наук,
доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия,
председатель Совета

Юсупов Рафаэль Мидхатович, д-р техн. наук,
профессор, чл.-корр. РАН, Институт информатики
и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, Россия

Шнайдер Экхард, профессор, Фраунгоферовский
институт неразрушающего контроля, Саарбрюкен,
Германия

Ситаж Марек, профессор, Силезский технический
университет, Польша

Христов Христо, профессор, Технический
университет, София, Болгария

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Сапожников Валерий Владимирович,
д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург,
Россия, председатель редколлегии

Бадер Михаил Петрович, д-р техн. наук,
профессор, МГУПС (МИИТ), Москва, Россия

Губачева Лариса Александровна, д-р техн. наук,
профессор, Восточно-Украинский национальный
университет им. В. Даля, Луганск, Украина

Гуда Александр Николаевич, д-р техн. наук,
профессор, РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия

Корниенко Анатолий Адамович, д-р техн. наук,
профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук,
профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Нестеров Валерий Леонидович, д-р техн. наук,
профессор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия

Титова Тамила Семеновна, д-р техн. наук,
профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Канаев Андрей Константинович, д-р техн. наук,
доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия

Фото на обложке из архивов библиотеки
ФГБОУ ВО ПГУПС. 1910 г.

Подписано в печать с оригинал-макета 25.01.2017.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать МФУ.

Усл. печ. л. 23,0. Уч.-изд. л. 16,56. Установочный тираж 300 экз.
Заказ 138. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ПГУПС

190031, СПб., Московский пр., 9.

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT
UNIVERSITY Vol. 13, Is. 4(49) – 2016

ISSN (Print) 1815-588X

Founder and publisher

Federal State Budgetary Educational Institution
of Higher Education "Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University"

Founder and publisher address

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9,
(812) 314-92-32

Editorial address

190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9,
(812) 314-92-32

e-mail: izvestia@izvestiapgups.org

Mass media registration certificate number

П И Н Ф С 2 - 7 4 9 9 dd. 06.04.2005 issued by the
Federal service for the monitoring of legislation
compliance in the sphere of mass communications
and the preservation of cultural heritage, North West
Federal district division

The journal is registered in the Russian Science
Citation Index (RSCI)

The Journal is included in the List of leading
peer-reviewed scientific journals and publications

The Journal has the Peer-review division

The Journal is distributed by direct subscription
via Editorial office and Rospechat catalogue (item
18509)

JOURNAL STAFF

Editor-in-chief

A. Yu. Panychev, Cand. of Economics,
Associate Professor

Deputy chief editor

V. Sapozhnikov, D.Eng., Professor

Science editor

A. Kanayev, D.Eng., Associate Professor

Executive editor

E. Gorelik

English translation

K. Tsar'kov

Layout

A. Stukanova

Online content editor

L. Strelkova

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Aleksander Panychev, Cand. of Economics,
Professor, Petersburg State Transport University,
St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial board

Rafael Yusupov, D.Eng., Professor, corresponding
member of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg Institute for Informatics
and Automation of Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, Russia

Ekhard Shneider, Professor, Fraunhofer Institute
for Non-Destructive Testing, Saarbrücken, Germany

Marek Sitazh, Professor, Silesian University
of Technology, Poland

Khristo Khristov, Professor, Technical University
of Sofia, Bulgaria

EDITORIAL TEAM

Valeriy Sapozhnikov, D.Eng., Professor, Petersburg
State Transport University, St. Petersburg, Russia,
Chairman of Editorial team

Mikhail Badyer, D.Eng., Professor, Moscow State
University of Railway Engineering, Moscow, Russia

Larisa Gubachyeva, D.Eng., Professor, Volodymyr
Dahl East Ukrainian National University, Luhansk,
Ukraine

Aleksander Guda, D.Eng., Professor,
Rostov State Transport University, Rostov-on-Don,
Russia

Anatoliy Kornienko, D.Eng., Professor, Petersburg
State Transport University, St. Petersburg, Russia

Aleksander Ledyayev, D.Eng., Professor, Petersburg
State Transport University, St. Petersburg, Russia

Valeriy Nesterov, D.Eng., Professor, Ural State
University of Railway Transport, Ekaterinburg,
Russia

Tamila Titova, D.Eng., Professor, Petersburg State
Transport University, St. Petersburg, Russia

Andrey Kanayev, D.Eng., Assoc. Professor,
Petersburg State Transport University,
St. Petersburg, Russia

Published by Petersburg State Transport University
190031, St. Petersburg., Moskovskiy pr., 9
Open price

© Petersburg State Transport University, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Л. С. Блажко, В. Б. Захаров, Е. В. ЧерняевТребования безопасности к конструкции уравнительного стыка
для высокоскоростных железнодорожных линий 443**Г. М. Прошев, В. Л. Белозеров, Я. В. Кукушкина, Н. В. Климова**Об оптимизации величины состава блок-поездов при доставке контейнеров
в морской торговый порт в транспортном узле 451

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

Г. А. Бекбаев, А. А. ПриваловМодель для расчета устойчивости функционирования телекоммуникационной сети
железнодорожной станции в условиях неблагоприятных воздействий на основе схемы
функциональной целостности 460**В. П. Бельтюков, И. А. Симонюк**

К вопросу об улучшении среднесрочного планирования путевых работ 472

Г. М. Прошев, Ю. И. Ефименко, А. В. Сугоровский, Ан. В. СугоровскийОбоснование эффективности диспетчерского регулирования
на железнодорожных участках 478**Е. П. Дудкин, С. В. Коланьков, Н. Н. Султанов**Методика технико-экономического обоснования выбора конструкции
трамвайных путей 485**О. Б. Маликов, Е. Г. Курилов, Д. И. Илесалиев**Некоторые вопросы экономической эффективности перевозки сыпучих грузов
в контейнерах 493**П. А. Михайловский**

Измерение сопротивления изоляции рельсовых цепей 501

О. Д. Покровская, Е. К. Коровяковский

Терминалистика – организация и управление в транспортных узлах 509

О. Д. Покровская, О. Б. Маликов

Вопросы логистической иерархии железнодорожных объектов 521

Ю. С. Ромен

Принципы разработки взаимоувязанных профилей колеса и рельса 532

В. И. Смирнов, С. С. ЗозуляОценка живучести железнодорожных рельсов с внутренними поперечными
трещинами 539

К. В. Талантова

Структура и свойства сталефибробетона, определяющие заданные эксплуатационные характеристики конструкций на его основе 546

И. В. Федоров, В. А. Белгородцев, Д. В. Расщепкина, С. О. Комиченко, Р. М. Гетманец

Метод ускоренной экспериментальной оценки изгибной усталостной прочности зубьев колес и шестерен подвижного состава 553

С. В. Чижов, Е. Б. Шестакова, Э. Т. Яхшиев

Разработка расчетных моделей к определению динамических характеристик железобетонных пролетных строений для высокоскоростных железных дорог Узбекистана 561

В. В. Шматченко, Д. Н. Роенков, П. А. Плеханов, В. Г. Иванов, Н. В. Яронова

Влияние отказов и сбоев системы радиосвязи GSM-R на безопасность перевозочного процесса 570

→ **ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**

М. А. Гордон, М. Н. Василенко, Д. В. Седых, Д. В. Зуев

Маскировка ошибок в электронной технической документации и методы их обнаружения 579

Ш. Ш. Исаков, Ф. Е. Ковалев, Р. Э. Косенков, А. П. Мохнаткин

Проблемы оценивания надежности и безопасности эксплуатируемых сооружений наземной космической инфраструктуры и идентификации их технических состояний 592

С. Е. Кирютина, В. Н. Глухих, А. Г. Черных, К. С. Григорьев

Исследование напряженно-деформированного состояния стеновых деревянных конструкций методом конечных элементов 600

Д. А. Никитин

Анализ характеристик оптимальных кодов с суммированием, полученных на основе взвешивания разрядов информационных векторов, в системах функционального контроля 607

СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА «ИЗВЕСТИЯ ПГУПС» ЗА 2016 ГОД 617



УДК 625.141,625.123

Л. С. Блажко, В. Б. Захаров, Е. В. Черняев

ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ К КОНСТРУКЦИИ УРАВНИТЕЛЬНОГО СТЫКА ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЛИНИЙ

Дата поступления: 16.12.2016

Решение о публикации: 20.12.2016

Цель: Разработка требований безопасности и методов контроля, предъявляемых к конструкции пути в виде уравнильного стыка, предназначенного для компенсации продольных перемещений плети бесстыкового пути в результате действия температурной силы и воздействия нагрузок от железнодорожного подвижного состава, для возможности применения готовой продукции на участках пути с высокоскоростным движением поездов. **Методы:** Использован метод теоретического анализа в части уточнения и расширения существующих требований безопасности, предъявляемых к конструкции пути в виде уравнильного стыка для высокоскоростного движения поездов. **Результаты:** Разработанные требования безопасности к уравнильным стыкам для высокоскоростного движения и определенные методы их контроля направлены на повышение качества изготовления, монтажа и эксплуатационной надежности конструкции в современных условиях эксплуатации бесстыкового железнодорожного пути для высокоскоростного движения. **Практическая значимость:** Применение заявленных требований предприятиями-изготовителями, предъявляемых к конструкции уравнильного стыка, используемого в железнодорожном пути высокоскоростных железнодорожных линий, создаст возможность внедрения прогрессивных конструкций уравнильных стыков для высокоскоростного железнодорожного транспорта, требующих повышенного уровня технологии и точности изготовления, и позволит гарантировать безопасность эксплуатации пути и перевозочного процесса.

Высокоскоростное движение, верхнее строение пути, уравнильный стык, требования безопасности, подвижный рельс, остряковый рельс.

Liudmila S. Blazhko, D. Eng., professor; **Vladislav B. Zakharov**, Cand. Eng.; ***Yevgeny V. Chernyaev**, Cand. Eng.; kaf_jdp@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) SAFETY REQUIREMENTS TOWARD BREATHING SWITCH CONSTRUCTION FOR HIGH-SPEED RAIL LINES

Objective: Develop safety requirements and inspection methods for the construction of a rail track in the form of breather switches designed for compensating lengthwise movement of the continuous welded track string resulting from temperature action and train pressure, to ensure the ability to implement the end product on high-speed rail sections. **Methods:** Theoretical analysis was applied for the specification and extension of the existing safety requirements toward the construction of rail lines with breather switches for high-speed trains. **Results:** The resulting safety requirements toward breather switches for high-speed rail lines and the determined inspection methods are aimed at increased quality of production, installation and operational safety of the structure in the context of operating a continuous welded rail line for high-speed trains. **Practical importance:** Application of the proposed requirements to the construction of breather switches used in high-speed rail lines by manufacturing facilities will provide an opportunity to implement advanced designs of breather switches for high-speed rail transport requiring increased levels of manufacturing techniques and precision and will guarantee the safety of track operation and the transportation process.

High-speed movement, superstructure, breather switch, safety requirements, junction rail, switch point rail.

16 марта 2010 г. президент РФ Дмитрий Медведев подписал Указ № 321 «О мерах по организации движения высокоскоростного железнодорожного транспорта в РФ» [1], в котором Правительству предписывалось до конца 2010 г. утвердить комплекс первоочередных задач, включая нормативные, технические, финансовые, кадровые, организационные и иные аспекты. Единственным исполнителем по осуществлению функций заказчика при проектировании высокоскоростных магистралей (ВСП) было назначено ОАО «Российские железные дороги». С принятием этого документа началась принципиально новая эра в истории высокоскоростного движения в России. Предполагалось, что в обозримом будущем в России появится целая сеть высокоскоростных железных дорог, включая такие направления как Москва–Санкт-Петербург, Москва–Нижний Новгород–Казань–Самара, Казань–Екатеринбург и др.

Одним из наиболее перспективных направлений развития высокоскоростного железнодорожного сообщения сегодня является магистраль Москва–Казань, в строительство которой планируется инвестировать совместно с китайскими партнерами более 1 трлн руб. В проекте новая магистраль заработает уже к 2020 г. и станет модельным проектом для российско-китайского взаимодействия в области транспорта и инфраструктуры [2].

Одним из сдерживающих моментов стало отсутствие нормативной базы, определяющей требования безопасности к элементам инфраструктуры, железнодорожному подвижному составу, электроснабжению, объектам автоматики и телемеханики, связи и другим составным частям железнодорожного комплекса, позволяющего полноценно обеспечивать перевозочный процесс со скоростями 250 км/ч и более. Первые шаги в разработке нормативной документации уже сделаны. ПГУПС на основании ряда основополагающих документов [3–5] совместно с другими организациями разработал в 2014 г. и актуализировал в 2016 г. Специальные технические условия (СТУ)

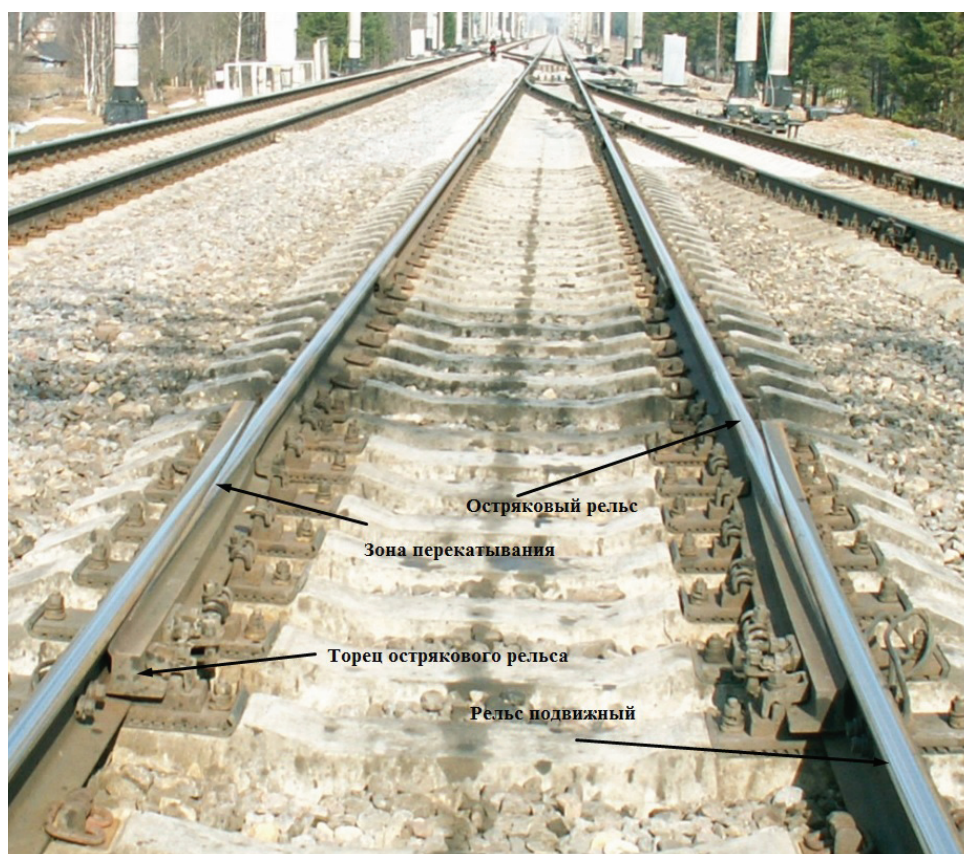
«Проектирование участка Москва–Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва–Казань–Екатеринбург со скоростями движения до 400 км/ч».

Возможность использования существующих конструкций и элементов верхнего строения железнодорожного пути (ВСП) и общие требования к ним изложены в СТУ «Верхнее строение пути участка Москва–Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва–Казань–Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству». Детальные требования безопасности, технические и другие условия указываются в межнациональных и национальных стандартах на элементы и конструкции ВСП, разрабатываемых с соблюдением требований нормативных документов [6–14] на основании [15, 16].

В качестве основной конструкции ВСП принят бесстыковой путь, имеющий свои особенности работы, а именно наличие возможности продольного перемещения концевых участков рельсовой плети при изменении ее температуры, относительно температуры закрепления в постоянную эксплуатацию. Возможность продольного перемещения концов стыкуемых рельсовых плетей на высокоскоростных железнодорожных линиях должна обеспечиваться с помощью специальных приспособлений, одним из которых является уравнивательный стык [17] (рисунок).

На сегодняшний день в Российской Федерации отсутствуют стандарты, регламентирующие требования безопасности и методы контроля, предъявляемые к уравнительному стыку, который используется на высокоскоростных железнодорожных линиях, учитывающие повышенные требования, предъявляемые к конструкциям ВСП [8, 18–20].

Стоит отметить, что соблюдение приведенных далее требований безопасности, предъявляемых к конструкции уравнительного стыка, позволит обеспечить безопасность перевозочного процесса при реализации скоростей движения свыше 250 км/ч.



Общий вид уравнительного стыка

В основу разработки требований безопасности к уравнильным стыкам на высокоскоростных железнодорожных линиях были заложены существующие требования к уравнильным стыкам на железнодорожных линиях с «традиционными» скоростями движения [21], которые были проанализированы, переработаны, расширены, учитывая особенности работы на ВСМ. Каждый этап разработки требований безопасности сопровождался теоретическими обоснованиями и практическими инженерными расчетами для подтверждения того или иного параметра.

Требования безопасности

Торцы остриевый рельса и рельса подвижного должны быть перпендикулярны к остальной поверхности рельсов. Допускается отклонение поверхностей торцов от перпендикулярности по отношению к остальной поверхности рельса не более 0,6 мм.

Шейка остриевый рельса должна плотно прилегать к упорным накладкам или упорам. Допускается сквозной зазор не более 1,0 мм.

Неприлегание шейки остриевый рельса к двум и более смежным упорным накладкам не допускается.

Остриевые рельсы и рельсы подвижные должны плотно опираться на подушки подкладок или подкладки. Допускается наличие сквозного зазора подошвой рельса и подушкой подкладки или подкладки не более 0,3 мм.

Отклонение от прямолинейности в горизонтальной плоскости рабочей грани уравнительного стыка должно быть не более 0,7 мм на участке, регламентируемом конструкторской документацией. Участок рабочей грани от изгиба подвижного рельса до сечения остриевый рельса в 20 мм контролю не подлежит.

Размеры продольных и поперечных зон перекатывания острякового рельса и рельса подвижного должны соответствовать комплексу конструкторской документации, утвержденному в установленном порядке владельцем инфраструктуры.

Прилегание острякового рельса и рельса подвижного должно быть без зазоров. Допускаются сквозные зазоры не более 1,0 мм на длине не более 300 мм на двух участках с наименьшим расстоянием между ними не более 200 мм.

Не допускается зазор более 0,2 мм между гранями прилегания острякового рельса и рельса подвижного на участке длиной 500 мм от острия острякового рельса.

Поверхности катания и боковые рабочие грани стыкуемых деталей должны совпадать в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Допускается понижение головки острякового рельса относительно подвижного рельса не более 1,2 мм и (или) превышение головки острякового рельса относительно подвижного рельса не более 1,4 мм.

Участок от острия острякового рельса до конца строжки поверхности катания острякового рельса не контролируется.

Твердость рабочей поверхности острякового рельса и рельса подвижного должна соответствовать диапазону от 321 до 363 НВ (для рельсов категорий НТЗ20ВС). Разность значений твердости на поверхности катания в пределах острякового рельса или рельса подвижного, измеренная по их длине, не должна превышать 30 НВ (НВW).

Напряжение в подошве острякового рельса и рельса подвижного должно быть не более 275 МПа.

Электрическое сопротивление, измеренное между смежными концами рельсов уравнительного стыка, должно быть не более 300 мкОм.

Методы контроля

Измерение любых геометрических параметров в конструкции уравнительного стыка

производят не менее трех раз. За окончательный результат принимают среднеарифметическое полученных значений.

Нормативные величины полной длины конструкции и длин рельсовых элементов (с учетом допустимых отклонений) установлены для температуры окружающего воздуха 15 ± 10 °С. Результаты измерений, проведенных при других температурах, должны быть скорректированы с учетом температурного линейного расширения рельсов.

Отклонение поверхностей торцов от перпендикулярности по отношению к поверхности рельса определяют средствами измерения, обеспечивающими точность измерения 0,1 мм, или измеряют зазор между угольником поверочным марки УП-2-250 с углом 90° и наиболее удаленной от угольника точкой рельса с помощью набора плоских щупов. На головку рельса угольник накладывают перпендикулярно подошве рельса, на боковую поверхность подошвы – перпендикулярно шейке.

Плотность прилегания шейки острякового рельса к упорным накладкам или упорам, а также прилегание острякового рельса и рельса подвижного определяют путем измерения величины зазора при помощи набора плоских щупов.

Отклонение от прямолинейности рабочей грани в горизонтальной плоскости контролируют при помощи средств измерений, обеспечивающих точность измерения 0,1 мм, длиной не менее 1500 мм. Средства измерения прикладывают к контролируемой поверхности в продольном направлении и просвет, если он имеется, промеряют при помощи средств измерений с точностью измерения 0,1 мм. Для поверхностей длиной свыше 1500 мм проверку производят по участкам длиной 1500 мм, при этом линейку переставляют не более чем на половину его длины.

Размеры продольных и поперечных зон перекатывания остряка и рельса подвижного определяют в соответствии с [21].

Взаимное положение остряка и рельса подвижного получают при помощи средств из-

мерений с точностью измерения 0,1 мм. При этом контролируемой точкой остряка должна быть середина поверхности его головки.

При наличии сквозного зазора между подушкой и остряком его значение суммируется с измеренной величиной понижения остряка или сердечника либо вычитается при их возвышении.

Контроль твердости рельсов проверяется с помощью приборов Бринелля с шариком диаметром 10 мм при испытательной нагрузке 29,42 кН (3000 кгс) и продолжительности выдержки под нагрузкой от 10 до 15 с с использованием автоматизированных систем.

При контроле твердости допустимо применение ручного метода определения размера отпечатка, кроме того допускается устанавливать твердость с использованием твердосплавного шарика диаметром 2,5 мм при испытательной нагрузке 1839 Н (187,5 кгс) и продолжительности выдержки под нагрузкой от 10 до 15 с.

В спорных случаях и при арбитраже следует использовать стационарные приборы Бринелля с шариком диаметром 10 мм.

Место определения твердости на поверхности катания рельса или темплета, вырезанного из пробы, должно быть зачищено для удаления окалины и обезуглероженного слоя металла на глубину не более 0,5 мм. Шероховатость зачищенной поверхности должна быть не более 25.

Разность твердости на поверхности катания по длине рельсов и проб определяют на средней линии поверхности катания по трем замерам с интервалом не менее 25 мм на каждой из трех проб, отобранных от концов и средней части рельса, или на рельсе.

Напряжения в подошве остряков и рельсов подвижных проверяют при динамико-прочностных испытаниях по воздействию железнодорожного подвижного состава на соответствующие элементы стрелочной продукции по ГОСТ Р 55050-2012 (п. 6.1) [22].

Измерение электрического сопротивления уравнительного стыка производят между концами смежных рельсов, входящих в состав

уравнительного стыка, омметром, рассчитанным на рабочее напряжение 500 В, после закрепления контактных проводов омметра на противоположные рельсы. Электрическое сопротивление измеряют не менее трех раз. При этом каждое из полученных значений не должно быть более 300 мкОм. Определяют электрическое сопротивление как среднее значение по результатам измерений.

Апробация требований, разработанных специалистами ПГУПС, была проведена через публичное обсуждение, объявленное на официальном сайте Росстандарта. В адрес разработчика поступали рекомендации и предложения по совершенствованию требований на этапе первой редакции, которые частично были учтены и отражены в настоящей статье.

Библиографический список

1. Указ № 321 «О мерах по организации движения высокоскоростного железнодорожного транспорта в РФ» от 16 марта 2010 г. // Рос. газета. – Федеральный вып. № 5136(57).
2. ОАО «Скоростные магистрали». – URL : <http://www.hsrail.ru> (дата обращения: 15.12.2016).
3. Федеральный закон № 384-ФЗ от 30 декабря 2009 г. «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», п. 8, ст. 6 // Рос. газета. – Федеральный вып. № 5079(255).
4. Положение о составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию. – Утв. Постановлением Правительства Российской Федерации от 16 февраля 2008 г. – № 87, п. 5.
5. Приказ Министерства регионального развития Российской Федерации от 21 октября 2010 г. № 454 «О внесении изменений в приказ Министерства регионального развития Российской Федерации от 1 апреля 2008 г. № 36 “О Порядке разработки и согласования специальных технических условий для разработки проектной документации на объект капитального строительства”». Оpubл. 28 января 2011 г.
6. Федеральный закон «О техническом регулировании» от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ // Рос. газета. – 2002. – 27 декабря.

7. Федеральный закон № 162-ФЗ от 29 июня 2015 г. О стандартизации в Российской Федерации. Опубл. 03.07.2015 // Рос. газета. – Федеральный вып. № 6715 (144).

8. Технический регламент «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта». – Утв. решением Комиссии Таможенного союза от 15 июля 2011 г. № 710.

9. Положение о порядке разработки и утверждения перечней международных и региональных стандартов, а в случае их отсутствия – национальных (государственных) стандартов государств – членов Таможенного союза, обеспечивающих соблюдение требований технического регламента Таможенного союза и необходимых для осуществления оценки (подтверждения) соответствия. – Утв. решением Коллегии Евразийской экономической комиссии от 25 декабря 2012 г. № 306.

10. ГОСТ Р 1.02012. Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения. Введ. 2012-11-23. – М. : Стандартинформ, 2013. – 9 с.

11. ГОСТ Р 1.2-2016. Национальный стандарт Российской Федерации. Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила разработки, утверждения, обновления и отмены. Введ. 2016-06-30. – М. : Стандартинформ, 2016. – 27 с.

12. ГОСТ Р 1.5-2012. Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные. Правила построения, изложения, оформления и обозначения. Введ. 2012-11-23. – М. : Стандартинформ, 2013. – 22 с.

13. ГОСТ Р 1.13-2004. Стандартизация в Российской Федерации. Уведомления о проектах документов в области стандартизации. Общие требования. Введ. 2004-12-30. – М. : Стандартинформ, переиздан апрель 2007. – 6 с.

14. Правила стандартизации ПР 50.1.074-2004. Подготовка проектов национальных стандартов Российской Федерации и проектов изменений к ним к утверждению, регистрации и опубликованию. Внесение поправок в стандарты и подготовка документов для их отмены. Введ. 2005-07-01. – ИПК Издательство стандартов № 2005.

15. Программа научно-технического сопровождения проектирования и строительства высокоскоростной магистрали Москва–Казань в

2014–2015 гг. (первоочередные мероприятия). – Утв. распоряжением Федерального агентства железнодорожного транспорта от 7 марта 2014 г., № ЕЛ-4-р.

16. Сетевой план-график мероприятий реализации проекта строительства высокоскоростной магистрали Москва–Казань (далее – ВСМ). – Утв. Председателем Правительства Российской Федерации Д. А. Медведевым от 13 января 2016 г., № 5-р (п. 37).

17. ГОСТ 33535-2015, ст. 3.15. Соединения и пересечения железнодорожных путей. Технические условия. Введ. 2015-09-29. – М. : Стандартинформ, 2015. – 85 с.

18. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» (ТР ТС – 002-2011).

19. ГОСТ 33722-2016. Остряки стрелочных переводов. Общие технические условия. Введ. 2016-06-28. – М. : Стандартинформ, 2016. – 9 с.

20. ГОСТ Р 51685.2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. Введ. 2013-10-14. – М. : Стандартинформ, 2014. – 19 с.

21. Нормы безопасности НБЖТЦП 015-99. Продукция стрелочная для железнодорожного транспорта. – Утв. указанием МПС России от 01.04.99 г. № Г-407у. Приказ Минтранса РФ от 4 мая 2012 г., № 127 «О внесении изменений в некоторые акты Министерства путей сообщения Российской Федерации».

22. ГОСТ Р 55050-2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. Введ. 2013-07-01. – М. : Стандартинформ, 2013. – 15 с.

References

1. Decree № 321. O merakh po organizacii dvi-zhenija vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta v RF [On Measures for Organizing High-Speed Rail Transportation in the Russian Federation] dated 16.03.2010. Published 19.03.2010. *Rossiyskaya gazeta*. Federal issue, no. 5136 (57) (In Russian)
2. *OAO Skorostnyie Magistrali*. URL: <http://www.hsrail.ru> (retrieved on: 16.12.2016). (In Russian)

3. Federal law no. 384-ФЗ dated December 30, 2009. *Tekhnicheskijj reglament o bezopasnosti zdaniij i sooruzhenijj*. [Technical regulations on building and structure safety]. Item 8 article 6. Published 31.12.2009. *Rossiyskaya gazeta*. Federal issue, no. 5079 (255) (In Russian)
4. *Polozhenie o sostave razdelov proektnojj dokumentacii i trebovanijakh k ikh sodержaniyu*. [Provision on the composition of project documentation and requirements to the content thereof]. Decree by the Russian Federation Government dated 16.02.2008, no. 87, item. 5. (In Russian)
5. Order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation dated October 21, 2010, no. 454. *O vnesenii izmenenijj v prikaz Ministerstva regional'nogo razvitiya Rossijskojj Federacii* [On amending the order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation] dated April 01, 2008, no. 36. *O Porjadke razrabotki i soglasovanija special'nykh tekhnicheskikh uslovijj dlja razrabotki proektnojj dokumentacii na ob'ekt kapital'nogo stroitel'stva*. [On the Procedure for Development and Coordination of Special Technical Standards for the Development of Design Documentation for Capital Construction]. Published January 28, 2011. (In Russian)
6. Federal law dated December 27, 2002, no. 184-ФЗ. *O tekhnicheskome regulirovanii* [On technical regulation]. *Rossiyskaya gazeta*, 2002, 27.12. (In Russian)
7. Federal law dated Monday, June 29, 2015, no. 162-ФЗ. *O standartizacii v Rossijskojj Federacii* [On standardization in the Russian Federation]. Published July 03, 2015. *Rossiyskaya gazeta*, no. 6715 (144). (In Russian)
8. Technical regulations. On the safety of high-speed rail transport. Approved by Decision of the Customs Union Commission dated July 15, 2011, no. 710. (In Russian)
9. *Provision on the procedure for development and approval of lists of international and regional standards, and if unavailable, national (state) standards of states-members of the Customs Union providing compliance with the requirements of the Customs Union's technical regulations and needed for evaluation (confirmation) of compliance*. Approved by decision of the Board of the Eurasian Economic Commission dated December 25, 2012, no. 306. (In Russian)
10. GOST P 1.0-2012. *Standartizatsiya v Rossijskojj Federatsii. Osnovnye polozheniya* [Standardization in the Russian Federation. Basic provisions]. Introd. 2012-11-23. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 9 p. (In Russian)
11. GOST P 1.2-2016. *Natsional'nyj standart Rossijskojj Federatsii. Standartizatsiya v Rossijskojj Federatsii. Standarty natsional'nye Rossijskojj Federatsii. Pravila razrabotki, utverzhdeniya, obnovleniya i otmeny* [Standardization in Russian Federation. National Standards of Russian Federation. Instructions for development, taking over, revision, correction, suspension and cancellation]. Introd. 6/30/2016. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 27 p. (In Russian)
12. GOST P 1.5-2012. *Standartizatsiya v Rossijskojj Federatsii. Standarty natsional'nye. Pravila postroyeniya, izlozheniya, oformleniya i oboznacheniya* [Standardization in Russian Federation. National standards. Rules of structure, drafting, presentation and indication]. Introd. 2012-11-23. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 22 p. (In Russian)
13. GOST P 1.13-2004. *Standartizatsiya v Rossijskojj Federatsii. Uvedomleniya o proektakh dokumentov v oblasti standartizatsii. Obshchie trebovaniya* [Standardization in the Russian Federation. Notifications on projects of documents in standardization. General requirements]. Introd. 12/30/2004. Moscow, Standartinform Publ., 2007, 6 p. (In Russian)
14. *Pravila standartizatsii* PR 50.1.074–2004. *Podgotovka proektov natsional'nykh standartov Rossijskojj Federatsii i proektov izmenenij k nim k utverzhdeniyu, registratsii i opublikovaniju. Vnesenie popravok v standarty i podgotovka dokumentov dlya ikh otmeny*. [Standardization rules ПП 50.1.074–2004. Preparation of drafts for national standards of the Russian Federation and drafts of amendments thereto for approval, registration and publishing. Introduction of amendments to standards and preparation of documents for the cancellation thereof]. Introd. 7/1/2005. ИПК Издательство standartov (Standards Publisher publishing and printing complex), no. 2005. (In Russian)
15. *Programma nauchno-tekhnicheskogo soprovozhdeniya proektirovaniya i stroitel'stva vysokoskorostnoj magistrali Moskva – Kazan' v 2014–2015 gg (pervoocherednye meropriyatiya)*. [The program for technological accommodation of design and construction of the Moscow – Kazan high-speed railway line in

2014–2015 (*high-priority measures*)]. Approved by Decree of the Federal Agency of Railway Transport Agency dated March 7, 2014, no. ЕЛ-4-р. (In Russian)

16. *Setevoy plan-grafik meropriyatij realizatsii proekta stroitel'stva vysokoskorostnoj magistrali Moskva–Kazan' (dalee – VSM) [Network timetable for the construction of the Moscow–Kazan high-speed rail line (hereinafter referred to as HSRL)]*. Approved by Chairman of the Russian Federation Government D.A. Medvedev on January 13, 2016, no. 5-р, п. 37). (In Russian)

17. GOST 33535-2015. *Soedineniya i peresecheniya zheleznodorozhnyj putej. Tekhnicheskie usloviya [Connections and crossings of railway tracks. Specifications]*. Introd. 2015-09-29. Moscow, Standartinform Publ., 2015, 85 p. (In Russian)

18. Tekhnicheskij reglament Tamozhennogo sojuza. *O bezopasnosti vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta [Customs Union Technical Regulations. On safety of high-speed railway transportation]*. TP TC – 002-2011. (In Russian)

19. GOST 33722-2016. *Ostryaki strelochnykh pervodov. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Tongue rails of turnouts. General specifications]*. Introd. 6/28/2016.

Moscow, Standartinform Publ., 2016, 9 p. (In Russian)

20. GOST P 51685-2013. *Rel'sy zheleznodorozhnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Railway rails. General specifications]*. Introd. 10/14/2013. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 19 p. (In Russian)

21. Safety standards NBZhTCP (Railway Transport Safety Standards) 015-99. *Produktsiya strelochnaya dlya zheleznodorozhnogo transporta [Track switching equipment for railway transport]*. Approved by decree of the Ministry of Communications of the Russian Federation dated April 1, 1999. Г-407у. Order of RF Ministry of Transportation dated May 4, 2012, no. 127. *O vnesenii izmenenij v nekotorye akty Ministerstva putej soobshcheniya Rossijskoj Federatsii [On introducing amendments to select acts issued by the Traffic Ministry of the Russian Federation]*. (In Russian)

22. GOST P 55050-2012. *Zheleznodorozhnyj podvizhnoj sostav. Normy dopustimogo vozdejstviya na zheleznodorozhnyj put' i metody ispytanij [Railway rolling stock. Permissible exposure norms to the railway track and test methods]*. Introd. 7/1/2013. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 15 p. (In Russian)

БЛАЖКО Людмила Сергеевна – доктор техн. наук, профессор; ЗАХАРОВ Владислав Борисович – канд. техн. наук; ЧЕРНЯЕВ Евгений Владимирович – канд. техн. наук, kaf_jdp@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 656.22

Г. М. Грошев, В. Л. Белозеров, Я. В. Кукушкина, Н. В. Климова

ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ВЕЛИЧИНЫ СОСТАВА БЛОК-ПОЕЗДОВ ПРИ ДОСТАВКЕ КОНТЕЙНЕРОВ В МОРСКОЙ ТОРГОВЫЙ ПОРТ В ТРАНСПОРТНОМ УЗЛЕ

Дата поступления: 20.10.2016

Решение о публикации: 16.12.2016

Цель: Поставлена и решена задача по определению оптимальной величины состава контейнерного блок-поезда при доставке партии контейнеров в морской торговый порт в транспортном узле по критерию «минимум эксплуатационных расходов за время оборота состава» для получения максимальной выгоды от доставки. **Методы:** Для доставки контейнеров в морской торговый порт подробно рассмотрены и рассчитаны суммарные эксплуатационные расходы с учетом всего цикла работы состава блок-поезда. Полученные выражения положены в основу решения оптимизационной задачи определения величины состава контейнерного блок-поезда. Для решения задачи по нахождению оптимального размера состава контейнерного блок-поезда по критерию «минимум эксплуатационных расходов за время оборота состава» была использована программа MATLAB R2015b. Проведенные расчеты по решению оптимизационной задачи позволяют найти оптимальную величину состава в зависимости от объемов перевозки. В качестве примера рассмотрена перевозка вагонов с контейнерами между тыловым логистическим терминалом и морским торговым портом. **Результаты:** Использование предложенных аналитических выражений позволяет установить оптимальный размер состава при доставке партии контейнеров между любыми тыловыми терминалами и морскими торговыми портами при различных объемах перевозки. **Практическая значимость:** Разработанный подход определения оптимальной величины состава по критерию «минимум эксплуатационных расходов за время оборота состава» даст возможность сократить эксплуатационные расходы ОАО «РЖД», повысить конкурентность контейнерных перевозок.

Эксплуатационные расходы, задача оптимизации, величина состава, контейнерный блок-поезд, оборот состава, оптимальный размер состава, скалярная величина, тыловой логистический терминал, минимум функции, морской торговый порт, вес состава, затраты, партия контейнеров.

*Gennadij M. Groshev, D. Eng., professor, spbgroshev@gmail.com; Vladimir L. Belozеров, D. Econ., professor, v.belozеров@mail.ru; Yana V. Kukushkina, Cand. Eng., assistant professor, yana90179@mail.ru; Nadezhda V. Klimova, postgraduate student, nadya.climowa2012@yandex.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg Transport University) ON OPTIMIZING THE SIZE OF THE BLOCK TRAIN FORMATION WHEN DELIVERING CONTAINERS TO A COMMERCIAL SEA PORT IN A TRANSPORTATION HUB

Objective: A task was made and solved pertaining to determining the optimum size of the container block train formation when delivering a batch of containers to a commercial sea port in a transportation hub, based on the criterion of “minimal operational expenditure throughout the train journey” to obtain maximum profit from delivery. **Methods:** For the purpose of delivering containers to a commercial sea port, total operational expenditures were thoroughly examined and calculated, with account for the entire operational cycle of the block train formation. The expressions obtained were used as the basis for solving the optimization task of determining the size of the container block train formation. To solve the task pertaining to determining the optimum size of the container block train formation based on the criterion of “minimal operational expenditure throughout the train journey”, the MATLAB R2015b software was employed. The calculations performed to solve the optimization task allow for determining the optimum size of the train depending on the carried volumes. An example was given of container cars between the back-end logistics terminal and the commercial sea port. **Results:** The use of suggested analytical expressions enables the determining of an optimum size of the train when delivering a batch of containers between any back-end terminals and commercial sea ports with different volumes of carriage. **Practical importance:** The developed approach of determining the optimum size of the train based on the

criterion of “minimal operational expenditure throughout the train journey” will enable the reduction of operational expenditure by OAO RZD and an increased competitiveness of container shipping.

Operational expenditure, optimization task, formation size, container block train, train journey, optimum train size, scalar quantity, back-end logistics terminal, minimum of function, commercial sea port, train weight, expenses, container batch.

Введение

Активное строительство тыловых логистических терминалов (ТЛТ) за пределами прибрежных зон морских портов для формирования партий, приема, хранения, обработки и таможенного оформления грузов, в том числе в контейнерах, требует от железной дороги совершенствования технологии доставки партии контейнеров в морской торговый порт (МТП) блок-поездом с целью экономии эксплуатационных расходов на перевозку и получения максимальной выгоды от доставки [1–4].

Величина состава грузового поезда – один из значимых технико-экономических показателей, оказывающий влияние на пропускную способность линии, потребное количество локомотивов и локомотивных бригад, расход топлива и электрической энергии и, в конечном итоге, влияющий на эксплуатационные расходы при перевозке груза [5, 6].

Исходя из размеров партии контейнеров, которую необходимо доставить в МТП, расстояния доставки и ограничивающих норм по длине и весу состава на линии, станциях и терминалах, предлагается определить оптимальную величину состава контейнерного блок-поезда по критерию «минимум эксплуатационных расходов за время оборота состава» [7].

Постановка задачи по определению оптимальной величины состава контейнерного блок-поезда по критерию «минимум эксплуатационных расходов за время оборота состава»

Определение оптимальной величины состава контейнерного блок-поезда становится

целесообразным, если нельзя перевезти необходимый объем партии одним поездом, т. е. начинают действовать ограничения по максимальной величине состава.

Пусть

$$\Theta_{\text{общ}}^{\text{б/п}} = \sum_{i=1}^k \Theta_i,$$

где $\Theta_i = f(m_{\text{б/п}})$.

При этом $\Theta_{\text{общ}}^{\text{б/п}}$ – суммарные эксплуатационные расходы по доставке партии контейнеров между ТЛТ и МТП с учетом всего цикла работы состава блок-поезда, руб.; $m_{\text{б/п}}$ – величина состава контейнерного блок-поезда, ваг.

Тогда целевая функция решения задачи оптимизации состава контейнерного блок-поезда по критерию «минимум эксплуатационных расходов за время оборота состава» будет иметь вид

$$\Theta_{\text{общ}}^{\text{б/п}} = \sum_{i=1}^k \Theta_i = f(m_{\text{б/п}}) \rightarrow \min$$

при следующих ограничениях:

$l_{\text{б/п}}^{\text{усл}} \leq l_{\text{ун(уч)}}^{\text{усл}}$ – длина блок-поезда в условных вагонах меньше или равна унифицированной (участковой) норме длины поезда на направлении (участке); $Q_{\text{б/п}} \leq Q_{\text{ун(уч)}}$ – вес блок-поезда в тоннах меньше или равен унифицированной (участковой) норме веса поезда на направлении (участке); $l_{\text{б/п}}^{\text{усл}} \leq l_{\text{по}}^{\text{усл}}$ – длина блок-поезда в условных вагонах меньше или равна полезной длине приемоотправочных путей на станциях примыкания ТЛТ и МТП; $m_{\text{б/п}} \leq \sum_{j=1}^n m_{\text{вм}}$ – количество вагонов в блок-поезде меньше или равно суммарной вместимости в вагонах фронтов погрузки контейнеров на ТЛТ, МТП;

$$\Theta_{\text{общ}}^{\text{б/п}} = \frac{U}{m_{\text{б/п}}} \cdot (\Theta_{\text{б/п}}^{\text{ТЛТ}} + \Theta_{\text{б/п}}^{\text{уч}} + \Theta_{\text{б/п}}^{\text{МТП}} + \Theta_{\text{б/п}}^{\text{тех.ст}}),$$

где U – количество вагонов для перевозки всей партии контейнеров, ваг.; $\Theta_{\text{б/п}}^{\text{уч}}$ – эксплуатационные расходы, связанные с проследованием по участку (маршруту) блок-поезда, тыс. руб.; $\Theta_{\text{б/п}}^{\text{ТЛТ}}, \Theta_{\text{б/п}}^{\text{МТП}}$ – эксплуатационные расходы, связанные с обработкой поездов соответственно на станциях примыкания ТЛТ и МТП, тыс. руб.; $\Theta_{\text{б/п}}^{\text{тех.ст}}$ – эксплуатационные расходы, связанные с проследованием блок-поезда технических станций, тыс. руб. [8];

$$U = \sum \frac{m_i}{r_i},$$

где m_i – количество контейнеров в партии i -го типоразмера (20-футовые, 40-футовые и др.); r_i – количество контейнеров i -го типоразмера на фитинговой платформе, зависит от размера контейнера и платформы.

При погрузке одного контейнера на вагон U равно размеру партии контейнеров.

Определение суммарных эксплуатационных расходов по доставке партии контейнеров между ТЛТ и МТП с учетом всего цикла работы состава блок-поезда

Суммарные зависящие эксплуатационные расходы, связанные с проследованием по участку (маршруту) блок-поезда рассчитываются по формуле [9, 10]

$$\begin{aligned} \Theta_{\text{б/п}}^{\text{уч}} = & \Theta_{\text{б/п}}^{\text{в-км}} + \Theta_{\text{б/п}}^{\text{в-ч}} + \Theta_{\text{б/п}}^{\text{л-км}} + \\ & + \Theta_{\text{б/п}}^{\text{л-ч}} + \Theta_{\text{б/п}}^{\text{бр-ч}} + \Theta_{\text{б/п}}^{\text{т-км}} + \Theta_{\text{б/п}}^{\text{топ(эн)}}. \end{aligned} \quad (1)$$

В (1) $\Theta_{\text{б/п}}^{\text{в-км}}$ – расходы, связанные с вагоно-километрами пробега, тыс. руб.; $\Theta_{\text{б/п}}^{\text{в-ч}}$ – расходы, связанные с вагоно-часами, тыс. руб.; $\Theta_{\text{б/п}}^{\text{л-км}}$ – расходы, связанные с локомотиво-километрами, тыс. руб.; $\Theta_{\text{б/п}}^{\text{л-ч}}$ – расходы, связанные с локомотиво-часами, тыс. руб.; $\Theta_{\text{б/п}}^{\text{бр-ч}}$ –

расходы, связанные с бригадо-часами работы локомотивных бригад, тыс. руб.; $\Theta_{\text{б/п}}^{\text{т-км}}$ – расходы, связанные с тонно-километрами брутто вагонов и локомотивов, тыс. руб.; $\Theta_{\text{б/п}}^{\text{топ(эн)}}$ – расходы, связанные с затратами топлива (электроэнергии) на тягу поезда, тыс. руб.

Расходы, связанные с вагоно-километрами пробега, тыс. руб.:

$$\Theta_{\text{б/п}}^{\text{в-км}} = m_{\text{б/п}} \cdot L_{\text{б/п}}^M \cdot e_{\text{в-км}} \cdot 10^{-3},$$

где $m_{\text{б/п}} \cdot L_{\text{б/п}}^M$ – вагоно-километры пробега блок-поезда; $e_{\text{в-км}}$ – расходная ставка 1 ваг.-км, руб.

Расходы, связанные с вагоно-часами работы, тыс. руб.:

$$\Theta_{\text{б/п}}^{\text{в-ч}} = m_{\text{б/п}} \cdot T_{\text{б/п}}^{\text{уч}} \cdot e_{\text{в-ч}} \cdot 10^{-3},$$

где $m_{\text{б/п}} \cdot T_{\text{б/п}}^{\text{уч}}$ – вагоно-часы пробега поезда; $e_{\text{в-ч}}$ – расходная ставка 1 ваг.-ч, руб.

Расходы, связанные с локомотиво-километрами пробега (для тепловозной или электрической тяги), тыс. руб.:

$$\Theta_{\text{б/п}}^{\text{л-км}} = M \cdot L_{\text{б/п}}^M \cdot e_{\text{л-км}} \cdot 10^{-3},$$

где $M \cdot L_{\text{б/п}}^M$ – локомотиво-километры пробега поезда; $e_{\text{л-км}}$ – расходная ставка 1 лок.-км, руб.

Расходы, связанные с локомотиво-часами, тыс. руб.:

$$\Theta_{\text{б/п}}^{\text{л-ч}} = M \cdot T_{\text{б/п}}^{\text{уч}} \cdot e_{\text{л-ч}} \cdot 10^{-3},$$

где $M \cdot T_{\text{б/п}}^{\text{уч}}$ – локомотиво-часы пробега поезда; $e_{\text{л-ч}}$ – расходная ставка 1 лок.-ч, руб.

Расходы, связанные с бригадо-часами работы локомотивных бригад, тыс. руб.:

$$\Theta_{\text{б/п}}^{\text{бр-ч}} = M \cdot T_{\text{б/п}}^{\text{уч}} \cdot e_{\text{бр-ч}} \cdot 10^{-3},$$

где $M \cdot T_{\text{б/п}}^{\text{уч}}$ – бригадо-часы работы; $e_{\text{бр-ч}}$ – расходная ставка 1 бригадо-часа, руб.

Расходы, связанные с тонно-километрами брутто вагонов и локомотивов, тыс. руб.:

$$\begin{aligned}\Theta_{6/\Pi}^{T-КМ} &= P \cdot L_{6/\Pi}^M \cdot e_{T-КМ} \cdot 10^{-3} = \\ &= e_{T-КМ} \cdot [m_{6/\Pi} \cdot L_{6/\Pi \text{ гр}}^M \cdot (q_d + q_t) + \\ &+ m_{6/\Pi} \cdot L_{6/\Pi \text{ пор}}^M \cdot q_t + M \cdot L_{6/\Pi}^M \cdot P_{\text{лок}}] \cdot 10^{-3},\end{aligned}$$

где $P \cdot L_{6/\Pi}^M$ – тонно-километры брутто пробега вагонов и локомотивов; $e_{T-КМ}$ – расходная ставка 1 т-км брутто вагонов и локомотивов, руб.; $L_{6/\Pi \text{ гр}}^M$, $L_{6/\Pi \text{ пор}}^M$ – длина маршрута следования блок-поезда соответственно в порожнем и груженом состоянии, км; q_t – тара вагона, т; q_d – динамическая нагрузка вагона, т.

Расходы, связанные с затратами топлива на тягу поездов, тыс. руб.:

$$\begin{aligned}\Theta_{6/\Pi}^{\text{топ}} &= A \cdot \Pi_{\text{топ}} \cdot 10^{-3} = \frac{\alpha \cdot P \cdot L_{6/\Pi}^M}{10\,000} \cdot \Pi_{\text{топ}} \cdot 10^{-3} = \\ &= (m_{6/\Pi} \cdot L_{6/\Pi \text{ гр}}^M \cdot (q_d + q_t) + m_{6/\Pi} \cdot L_{6/\Pi \text{ пор}}^M \cdot q_t + \\ &+ M \cdot L_{6/\Pi \text{ гр}}^M \cdot P_{\text{лок}}) \cdot \frac{\alpha}{10\,000} \cdot \Pi_{\text{топ}} \cdot 10^{-3},\end{aligned}$$

где A – расход топлива на тягу поезда, т; $\Pi_{\text{топ}}$ – стоимость 1 т топлива, руб.; α – удельные расходы топливных ресурсов на 10 тыс. км брутто поездов, т.

Расходы, связанные с затратами электроэнергии на тягу поездов, тыс. руб. [11–13]:

$$\begin{aligned}\Theta_{6/\Pi}^{\text{эл}} &= e_{\text{эл}} \cdot L_{6/\Pi}^M \cdot (9,18 \cdot 10^{-6} \cdot m_{6/\Pi}^3 - \\ &- 5,508 \cdot 10^{-3} \cdot m_{6/\Pi}^2 + 1,6332 \cdot m_{6/\Pi} + \\ &+ 4,9464) \cdot 10^{-3},\end{aligned}$$

где $e_{\text{эл}}$ – расходная ставка стоимости 1 кВт-ч электроэнергии, руб.

Рассчитаем зависящие эксплуатационные расходы, связанные с проследованием технических станций при организации движения блок-поездов, тыс. руб.:

$$\Theta_{6/\Pi}^{\text{тех.ст}} = \sum t_{6/\Pi}^{\text{тех}} \cdot e_{\text{в-ч}} \cdot m_{6/\Pi} \cdot 10^{-3},$$

где $\sum t_{6/\Pi}^{\text{тех}}$ – суммарное время нахождения блок-поезда на технических станциях, ч.

Зависящие эксплуатационные расходы, связанные с обработкой поездов на станциях примыкания ТЛТ и МТП, тыс. руб.:

$$\begin{aligned}\Theta_{6/\Pi}^{\text{ТЛТ(МТП)}} &= [(e_{\text{сост}} + e_{\text{мл-ч}}) \cdot t_{\text{м.р.}}^{\text{ТЛТ(МТП)}} + \\ &+ e_{\text{в-ч}} \cdot t_{\text{мест}}^{\text{ТЛТ(МТП)}} \cdot m_{6/\Pi}] \cdot 10^{-3},\end{aligned}$$

где $e_{\text{сост}}$ – расходная ставка 1 ч работы составителя поездов, руб.; $e_{\text{мл-ч}}$ – затраты на 1 лок.-ч маневровой работы, руб.; $t_{\text{м.р.}}^{\text{ТЛТ(МТП)}}$ – затраты времени на маневровую работу на станции примыкания ТЛТ (станции примыкания МТП), ч; $e_{\text{в-ч}}$ – расходная ставка на 1 ваг.-ч, руб.; $t_{\text{мест}}^{\text{ТЛТ(МТП)}}$ – средний простой местного вагона на станции примыкания ТЛТ (МТП), ч.

Порядок определения эксплуатационных расходов по видам затрат при организации движения блок-поезда приведен в табл. 1.

Конечное выражение для расчета величины состава контейнерного блок-поезда по критерию «минимум эксплуатационных расходов за время оборота состава» будет иметь вид

$$\begin{aligned}\Theta_{\text{общ}}^{6/\Pi} &= \frac{U}{m_{6/\Pi}} [(e_{\text{сост}} + e_{\text{мл-ч}}) \cdot t_{\text{м.р.}}^{\text{ТЛТ}} + \\ &+ e_{\text{в-ч}} \cdot t_{\text{мест}}^{\text{ТЛТ}} \cdot m_{6/\Pi} + m_{6/\Pi} \cdot L_{6/\Pi}^M \cdot e_{\text{в-км}} + \\ &+ m_{6/\Pi} \cdot T_{6/\Pi}^{\text{уч}} \cdot e_{\text{в-ч}} + M \cdot L_{6/\Pi}^M \cdot e_{\text{л-км}} + \\ &+ M \cdot T_{6/\Pi}^{\text{уч}} \cdot e_{\text{л-ч}} + M \cdot T_{6/\Pi}^{\text{уч}} \cdot e_{\text{бр-ч}} + \\ &+ e_{T-КМ} \cdot (m_{6/\Pi} \cdot L_{6/\Pi \text{ гр}}^M \cdot (q_d + q_t) + \\ &+ m_{6/\Pi} \cdot L_{6/\Pi \text{ пор}}^M \cdot q_t + M \cdot L_{6/\Pi}^M \cdot P_{\text{лок}}) + \\ &+ e_{\text{эл}} \cdot L_{6/\Pi}^M \cdot (9,18 \cdot 10^{-6} \cdot m_{6/\Pi}^3 - 5,508 \cdot 10^{-3} \times \\ &\times m_{6/\Pi}^2 + 1,6332 \cdot m_{6/\Pi} + 4,9464) + \\ &+ (e_{\text{сост}} + e_{\text{мл-ч}}) \cdot t_{\text{м.р.}}^{\text{МТП}} + \\ &+ e_{\text{в-ч}} \cdot t_{\text{мест}}^{\text{МТП}} \cdot m_{6/\Pi} + \sum t_{6/\Pi}^{\text{тех}} \cdot e_{\text{в-ч}} \cdot m_{6/\Pi}].\end{aligned}\quad (2)$$

Решение задачи по определению оптимальной величины состава контейнерного блок-поезда по критерию «минимум эксплуатационных расходов за время оборота состава»

Применяются различные методы решения оптимизационных задач, в частности прирав-

ТАБЛИЦА 1. Расходы на организацию движения блок-поезда

Вид эксплуатационных расходов	Формула для расчета, тыс. руб.
Эксплуатационные расходы, связанные с проследованием по участку (маршруту) блок-поезда, в том числе – расходы, связанные с вагоно-километрами пробега – расходы, связанные с вагоно-часами работы – расходы, связанные с локомотиво-километрами пробега – расходы, связанные с локомотиво-часами работы – расходы, связанные с бригадо-часами работы локомотивных бригад – расходы, связанные с тонно-километрами брутто вагонов и локомотивов – расходы, связанные с затратами топлива (электроэнергии) на тягу поездов	$\mathcal{E}_{\text{б/п}}^{\text{уч}} = \mathcal{E}_{\text{б/п}}^{\text{в-км}} + \mathcal{E}_{\text{б/п}}^{\text{в-ч}} + \mathcal{E}_{\text{б/п}}^{\text{л-км}} + \mathcal{E}_{\text{б/п}}^{\text{л-ч}} + \mathcal{E}_{\text{б/п}}^{\text{бр-ч}} + \mathcal{E}_{\text{б/п}}^{\text{т-км}} + \mathcal{E}_{\text{б/п}}^{\text{топ(эл)}}$ $\mathcal{E}_{\text{б/п}}^{\text{в-км}} = m_{\text{б/п}} \cdot L_{\text{б/п}}^M \cdot e_{\text{в-км}} \cdot 10^{-3}$ $\mathcal{E}_{\text{б/п}}^{\text{в-ч}} = m_{\text{б/п}} \cdot T_{\text{б/п}}^{\text{уч}} \cdot e_{\text{в-ч}} \cdot 10^{-3}$ $\mathcal{E}_{\text{б/п}}^{\text{л-км}} = M \cdot L_{\text{б/п}}^M \cdot e_{\text{л-км}} \cdot 10^{-3}$ $\mathcal{E}_{\text{б/п}}^{\text{л-ч}} = M \cdot T_{\text{б/п}}^{\text{уч}} \cdot e_{\text{л-ч}} \cdot 10^{-3}$ $\mathcal{E}_{\text{б/п}}^{\text{бр-ч}} = M \cdot T_{\text{б/п}}^{\text{уч}} \cdot e_{\text{бр-ч}} \cdot 10^{-3}$ $\mathcal{E}_{\text{б/п}}^{\text{т-км}} = e_{\text{т-км}} \cdot [m_{\text{б/п}} \cdot L_{\text{б/п гр}}^M \cdot (q_d + q_t) + m_{\text{б/п}} \cdot L_{\text{б/п пор}}^M \cdot q_t + M \cdot L_{\text{б/п гр}}^M \cdot P_{\text{лок}}] \cdot 10^{-3}$ $\mathcal{E}_{\text{б/п}}^{\text{топ}} = (m_{\text{б/п}} \cdot L_{\text{б/п гр}}^M \cdot (q_d + q_t) + m_{\text{б/п}} \cdot L_{\text{б/п пор}}^M \cdot q_t + M \cdot L_{\text{б/п гр}}^M \cdot P_{\text{лок}}) \cdot \frac{\alpha}{10000} \cdot \Pi_{\text{топ}} \cdot 10^{-3}$ $\mathcal{E}_{\text{б/п}}^{\text{эл}} = e_{\text{эл}} \cdot L_{\text{б/п}}^M \cdot (9,18 \cdot 10^{-6} \cdot m_{\text{б/п}}^3 - 5,508 \cdot 10^{-3} \cdot m_{\text{б/п}}^2 + 1,6332 \cdot m_{\text{б/п}} + 4,9464) \cdot 10^{-3}$
Эксплуатационные расходы, связанные с проследованием технических станций (расходы, связанные с вагоно-часами)	$\mathcal{E}_{\text{б/п}}^{\text{тех.ст}} = \sum t_{\text{б/п}}^{\text{тех}} \cdot e_{\text{в-ч}} \cdot m_{\text{б/п}} \cdot 10^{-3}$
Эксплуатационные расходы, связанные с обработкой поездов на станциях примыкания МТП (расходы, связанные с вагоно-часами, бригадо-часами работы локомотивных бригад и локомотиво-часами работы локомотивов при маневровой работе)	$\mathcal{E}_{\text{б/п}}^{\text{МТП}} = [(e_{\text{сост}} + e_{\text{мл-ч}}) \cdot t_{\text{м.р.}}^{\text{МТП}} + e_{\text{в-ч}} \cdot t_{\text{мест}}^{\text{МТП}} \cdot m_{\text{б/п}}] \cdot 10^{-3}$
Общие затраты на транспортировку между ТЛТ и МТП	$\mathcal{E}_{\text{б/п}}^{\text{трансп}} = \mathcal{E}_{\text{б/п}}^{\text{уч}} + \mathcal{E}_{\text{б/п}}^{\text{ТЛТ}} + \mathcal{E}_{\text{б/п}}^{\text{МТП}} + \mathcal{E}_{\text{б/п}}^{\text{тех.ст}}$

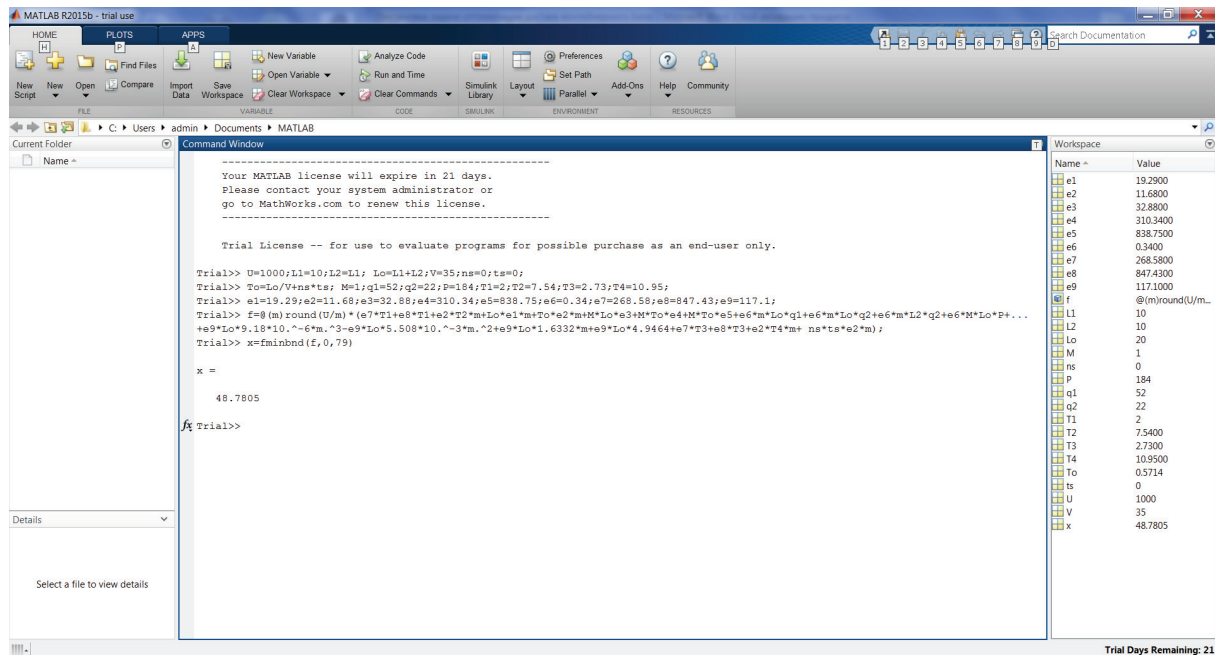
нивание первой производной функции к 0 и решение данного уравнения. Помимо этого существуют различные программные продукты, позволяющие найти минимум функции с помощью определенных команд (встроенных функций). К ним относятся MS Excel, RTC Mathcad, MATLAB [14] и пр. Авторами статьи для определения оптимальной величины состава контейнерного блок-поезда по критерию «минимум эксплуатационных расходов за время оборота состава» (см. формулу (2)) была использована программа MATLAB R2015b (рисунок).

Для поиска минимума функции для одной переменной для фиксированного интервала

в программе MATLAB R2015b существует команда `fminbnd`:

$$x = \text{fminbnd}(\text{fun}, x1, x2)$$

Она возвращает значение x , которое является локальным минимумом скалярной функции, представленной как `fun` в интервале $x1 < x < x2$; `fun` есть такая функция, которая принимает некий скаляр x и возвращает скаляр f , целевую функцию в точке x . Функция `fun` может быть задана в виде некоего описателя функции. В основу алгоритма положены метод золотого сечения и метод параболической интерполяции [15].



Командное окно программы MATLAB R2015b

Пример решения задачи по нахождению оптимальной величины состава контейнерного блок-поезда по критерию «минимум эксплуатационных расходов за время оборота состава» при перевозке 100 вагонов с контейнерами между ТЛТ (железнодорожная станция Предпортовая) и МТП «Большой порт Санкт-Петербург» (железнодорожная станция Автово):

```
Trial>>U=100; L1=10; L2=L1; Lo=L1+L2;
V=35; ns=0; ts=0;
Trial>>To=Lo/V+ns*ts; M=1; q1=52; q2=22;
P=184; T1=2; T2=7.54; T3=2.73; T4=10.95;
Trial>>e1=19.29; e2=11.68; e3=32.88;
e4=310.34; e5=838.75; e6=0.34; e7=268.58;
e8=847.43; e9=117.1;
Trial>>f=@(m)round(U/m)*(e7*T1+
e8*T1+e2*T2*m+Lo*e1*m+To*e2*m+
M*Lo*e3+M*To*e4+
M*To*e5+e6*m*Lo*q1+e6*m*Lo*q2+
e6*m*L2*q2+e6*M*Lo*P+...
e9*Lo^9.18*10.^-m.^3-e9*Lo^5.508*10.^-
3*m.^2+e9*Lo^1.6332*m+e9*Lo^4.9464+
```

```
e7*T3+e8*T3+e2*T4*m+ ns*ts*e2*m);
Trial>> x=fminbnd(f,0,80)
x = 40.0000
```

При этом при решении задачи в программе MATLAB введены некоторые свои обозначения:

$$L_{6/\pi \text{ гр}}^M = L1, L_{6/\pi \text{ пор}}^M = L2, L_{6/\pi}^M = Lo, v_{6/\pi}^{yc} = V, \\ n_{ct} = ns, t_{6/\pi}^{\text{tex c}} = ts, T_{6/\pi}^{yc} = To,$$

$$q_d = q1, q_T = q2, P_{\text{лок}} = P, t_{\text{м.р}}^{\text{ТЛТ}} = T1, \\ t_{\text{мест}}^{\text{ТЛТ}} = T2, t_{\text{м.р}}^{\text{МТП}} = T3, t_{\text{мест}}^{\text{МТП}} = T4, e_{\text{в-км}} = e1,$$

$$e_{\text{в-ч}} = e2, e_{\text{л-км}} = e3, e_{\text{л-ч}} = e4, e_{\text{бр-ч}} = e5, \\ e_{\text{т-км}} = e6, e_{\text{сост}} = e7, e_{\text{м.л-ч}} = e8, e_{\text{эл}} = e9.$$

В качестве ограничения x_2 выбрано ограничение по суммарной вместимости в вагонах фронта погрузки контейнеров на ТЛТ, так как оно является минимальным по величине из всех ограничений.

В табл. 2 приведены результаты определения оптимальной величины состава контейнерного блок-поезда по критерию «минимум эксплуатационных расходов за время обо-

рота состава» при различных объемах перевозки между ТЛТ (железнодорожная станция Предпортовая) и МТП «Большой порт Санкт-Петербург».

ТАБЛИЦА 2. Оптимальная величина состава контейнерного блок-поезда при разных объемах перевозки между ТЛТ и МТП «Большой порт Санкт-Петербург»

Объем перевозки, ваг.	Оптимальная величина состава, ваг.
100	40
150	60
200	57
250	56
300	55
350	47
400	42
450	60
500	59

Заключение

Определение оптимальной величины состава контейнерного блок-поезда по критерию «минимум эксплуатационных расходов за время оборота состава» позволит сократить эксплуатационные расходы ОАО «РЖД» при доставке партии контейнеров блок-поездом в МТП. При этом предложенные аналитические выражения позволят выбрать оптимальный размер состава при доставке между любыми тыловыми терминалами и МТП при разных объемах перевозки.

Библиографический список

1. Белозеров В. Л. Использование прогрессивных форм транспортных услуг при организации работы припортовой станции / В. Л. Белозеров, Г. М. Грошев, В. И. Ковалев, Н. В. Климова // Изв. ПГУПС. – 2013. – Вып. 2 (35). – С. 31–43.

2. Грошев Г. М. Выбор способа доставки контейнеров между тыловым логистическим терминалом и морским торговым портом / Г. М. Грошев, В. Л. Белозеров, Н. В. Климова // Изв. ПГУПС. – 2015. – Вып. 2 (43). – С. 117–122.

3. Осьминин А. Т. Проблемы организации контейнерных перевозок / А. Т. Осьминин, Е. Ю. Мокейчев, А. С. Рящиков, И. В. Гужва, Я. В. Кукушкина // Актуальные проблемы управления перевозочным процессом : сб. науч. тр. Петерб. гос. ун-та путей сообщения / под ред. Ю. И. Ефименко, А. Т. Осьминина. – СПб. : ПГУПС, 2003. – С. 93–104.

4. Панова Ю. Н. Факторы строительства тыловых контейнерных терминалов / Ю. Н. Панова, Е. К. Коровяковский // Вестн. Томск. гос. ун-та. – 2012. – Вып. 1 (24). – С. 103–112.

5. Левин Д. Ю. Диспетчерские центры и технология управления перевозочным процессом : учеб. пособие для вузов, диспетчерского аппарата и руководителей ж.-д. транспорта, разработчиков автоматизированных систем управления / Д. Ю. Левин. – М. : Маршрут, 2005. – 759 с.

6. Некрашевич В. И. Поездная работа при постоянных размерах грузового движения и нефиксированной массе и длине составов / В. И. Некрашевич, В. Е. Козлов, В. И. Бодюл, А. Ф. Бородин // Вестн. Всерос. науч.-исслед. ин-та железнодорожного транспорта. – 1991. – № 8. – С. 12–17.

7. Шенфельд К. П. Как ускорение оборота вагона способно повлиять на рост доходов / К. П. Шенфельд // Экономика железных дорог. – 2009. – № 10. – С. 26–30.

8. Климова Н. В. Экономическая оценка вариантов транспортировки судовой партии контейнеров автомобильным и железнодорожным транспортом между тыловым логистическим терминалом и морским торговым портом / Н. В. Климова // Экономика железных дорог. – 2013. – № 11. – С. 62–72.

9. Грошев Г. М. Оценка эффективности мероприятий по автоматизации и реформированию оперативного управления перевозками на железных дорогах. Ч. 2. Примеры расчетов : учеб. пособие / Г. М. Грошев, А. Г. Котенко, О. В. Котенко, О. А. Никифорова, И. Ю. Романова, Т. Г. Сергеева, К. А. Ванелик ; под общ. ред. Г. М. Грошева. – СПб. : ПГУПС, 2011. – 80 с.

10. Ковалев В. И. Управление эксплуатационной работой на железнодорожном транспорте : учебник. В 2 т. Т. 2 / В. И. Ковалев, А. Т. Осьминин, В. А. Кудрявцев, Г. М. Грошев и др. ; под ред. В. И. Ковалева, А. Т. Осьминой. – М. : ФГОУ «УМЦ по образованию на ж.-д. транспорте», 2011. – 440 с.

11. Кудрявцев В. А. Определение оптимальной нормы состава грузового поезда / В. А. Кудрявцев, В. В. Волчанинов, Ю. А. Кокшаров. – СПб. : ПГУПС, 2004. – Вып. 2. – С. 19–28.

12. Кудрявцев В. А. Оптимизация нормы состава однопутных технических маршрутов / В. А. Кудрявцев, А. Н. Седов, Т. И. Власова, В. В. Волчанинов, Л. А. Бойкова, Ю. А. Кокшаров // Железнодорожный транспорт. – 2005. – № 6. – С. 25–28.

13. Кукушкина Я. В. Метод обоснования гибкой нормы величины составов однопутных технических маршрутов : автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / Я. В. Кукушкина. – СПб. : ПГУПС, 2011. – 16 с.

14. Учебник по MathCAD. – URL : http://detc.usu.ru/Assets/aMATH0021/L7_2.htm#17.2 (дата обращения: 12.09.2016).

15. Поиск минимума функции одной переменной для фиксированного интервала когда x , x_1 и x_2 есть скаляры, а $f(x)$ – функция, которая возвращает скаляр // Сайт с материалами по продуктам MATLAB & Toolboxes. – URL : http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_4/1/fminbnd.php. (дата обращения: 12.09.2016).

References

1. Belozerov V. L., Groshev G. M., Kovalev V. I., Klimova N. V. Ispol'zovanie progressivnykh form transportnykh uslug pri organizatsii raboty priportovoy stantsii [The use of progressive forms of transport services in organizing operation of a port railway station]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [The St. Petersburg Transport University Bulletin]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2013, issue 2 (35), pp. 31–43. (In Russian)

2. Groshev G. M., Belozerov V. L., Klimova N. V. Vybora sposoba dostavki kontejnerov mezhdu tylovym logisticheskim terminalom i morskim trgovym portom [Selecting the container delivery method

for between a back-end logistics terminal and commercial sea port]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [The St. Petersburg Transport University Bulletin]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2015, issue 2 (43), pp. 117–122. (In Russian)

3. Os'minin A. T., Mokeychev E. Ju., Ryashchikov A. S., Guzhva I. V., Kukushkina Ya. V. Problemy organizatsii kontejnernykh perevozok. *Aktual'nye problemy upravleniya perevozochnym protsessom: sb. nauchnykh trudov* [Container Shipping Issues. Current issues of managing the shipping process: edited volume]. Eds: Ju. I. Efimenko, A. T. Os'minina. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2003, pp. 93–104. (In Russian)

4. Panova Ju. N., Korovyakovskij E. K. Faktory stroitel'stva tylovykh kontejnernykh terminalov [Back-end container terminal construction factors]. *Vestnik of Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [The Tomsk State University Bulletin], 2012, issue 1 (24), pp. 103–112. (In Russian)

5. Levin D. Ju. *Dispetcherskie tsentry i tekhnologiya upravleniya perevozochnym protsessom: ucheb. posobie dlya vuzov, dispetcherskogo apparata i rukovoditelej zheleznodorozhnogo transporta, razrabotchikov avtomatizirovannykh sistem upravleniya* [Dispatcher centers and the shipping process management technology: a textbook for colleges, dispatcher personnel, rail transport managers and automated control systems developers]. Moscow, Marshrut Publ., 2005, 759 p. (In Russian)

6. Nekrashevich V. I., Kozlov V. E., Bodjul V. I., Borodin A. F. Poezdnyaya rabota pri postoyannykh razmerakh gruzovogo dvizheniya i nefiksirovannoy masse i dline sostavov [Train operation under constant freight traffic volumes and unfixed mass and length of trains]. *Vestnik of Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [The Russian National Rail Transport Research Institute Bulletin], 1991, no. 8, pp. 12–17. (In Russian)

7. Shenfel'd K. P. Kak uskorenie oborota vagona sposobno povliyat' na rost dokhodov [How speeding up a train journey can influence increased profits]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [Railway Economics], 2009, no. 10, pp. 26–30. (In Russian)

8. Klimova N. V. Ekonomicheskaya otsenka variantov transportirovki sudovoy partii kontejnerov

avtomobil'nym i zheleznodorozhnym transportom mezhdru tylovym logisticheskim terminalom i morskim trgovym portom [An economic appraisal of options for transporting a ship's batch of containers via automobile and railway transport between a back-end logistics terminal and a commercial sea port]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [Railway Economics], 2013, no. 11, pp. 62–72. (In Russian)

9. Groshev G. M., Kotenko A. G., Kotenko O. V., Nikiforova O. A., Romanova I. Ju., Sergeeva T. G., Vanelik K. A. *Otsenka jeffektivnosti meropriyatij po avtomatizatsii i reformirovaniyu operativnogo upravleniya perevozkami na zheleznykh dorogakh* [Assessment of efficiency of measures pertaining to automation and reformation operational management of carriage by rail]. Ch. 2. *Primery raschetov: ucheb. posobie* [Calculation examples: a textbook]. Ed. by G. M. Groshev. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2011, 80 p. (In Russian)

10. Kovalev V. I., Os'minin A. T., Kudryavtsev V. A., Groshev G. M. *Upravlenie jekspluatatsionnoj rabotoj na zheleznodorozhnom transporte: uchebnyk* [Managing operational work in rail transport: a textbook]. In 2 vol./ed. V. I. Kovaleva, A. T. Os'minina. Moscow, FGOU UMTs ZhDT Publ., 2011, t. 2, 440 p. (In Russian)

11. Kudryavtsev V. A., Volchaninov V. V., Koksharov Ju. A. *Opredelenie optimal'noj normy sostava gruzovogo poezda* [Determining the optimum standard

for a freight train formation]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2004, issue 2, pp. 19–28. (In Russian)

12. Kudryavtsev V. A., Sedov A. N., Vlasova T. I., Volchaninov V. V., Bojkova L. A., Koksharov Ju. A. *Optimizatsiya normy sostava odnogruppykh tekhnicheskikh marshrutov* [Optimizing the train formation standard for single-group technical routes]. *Zheleznodorozhnyj transport* [Rail Transport], 2005, no. 6, pp. 25–28. (In Russian)

13. Kukushkina Ya. V. *Metod obosnovaniya gibkoj normy velichiny sostavov odnogruppykh tekhnicheskikh marshrutov: avtoref. dis. na soisk. kand. tekhn. nauk* [Method of substantiating the flexible standard of train formations for single-group technical routes: author's abstract of a Ph. D. thesis in Engineering Science]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2011, 16 p. (In Russian)

14. *Uchebnyk po MathCAD* [MathCAD Textbook]. URL: http://detc.usu.ru/Assets/aMATH0021/L7_2.htm#17.2. (retrieved on: 12.09.2016). (In Russian)

15. *Poisk minimuma funktsii odnoj peremennoj dlya fiksirovannogo intervala, kogda x, x_1 i x_2 est' skalyary, a $f(x)$ – funktsiya, kotoraya vozvrashchaet skalyar* [Determining the minimum of a function of a single variable for a fixed interval when x, x_1 and x_2 are scalars and $f(x)$ is a function that returns a scalar]. URL: http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_4/1/fminbnd.php. (retrieved on: 12.09.2016). (In Russian)

*ГРОШЕВ Геннадий Максимович – доктор техн. наук, профессор, spbgroshev@gmail.com; БЕЛОЗЕРОВ Владимир Леонидович – доктор экон. наук, профессор, v.belozarov@mail.ru; КУКУШКИНА Яна Васильевна – канд. техн. наук, доцент, yana90179@mail.ru; КЛИМОВА Надежда Васильевна – аспирант, nadya.climowa2012@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).



УДК 004.056.53

Г. А. Бекбаев, А. А. Привалов

МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИИ В УСЛОВИЯХ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОСНОВЕ СХЕМЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЦЕЛОСТНОСТИ

Дата поступления: 10.10.2016

Решение о публикации: 16.12.2016

Цель: Расчет устойчивости телекоммуникационной сети (ТКС) железнодорожной станции в условиях воздействия на нее дестабилизирующих факторов. **Методы:** Для решения задачи использовались методы системного анализа, теории надежности и живучести сетей связи, общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ), а для производства расчетов применялся программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования (ПК АСМ-2001). **Результаты:** Разработана схема функциональной целостности функционирования объектовой ТКС железнодорожной станции и получена оценка устойчивости ее функционирования в неблагоприятных условиях воздействия дестабилизирующих факторов. **Практическая значимость:** Предложенная модель может быть использована на этапе проектирования объектовых ТКС железнодорожного транспорта, а также в подсистеме принятия решений по управлению ими в процессе эксплуатации. Полученные результаты убедительно показывают возможность применения ОЛВМ для исследования структурно-сложной ТКС железнодорожной станции и определения путей ее дальнейшего совершенствования.

Устойчивость, дестабилизирующий фактор, схема функциональной целостности, логические критерии функционирования, функция работоспособности, вероятностная функция.

***Gamzatdin A. Bekbayev**, postgraduate student, gamzat-86@mail.ru; **Andrei A. Privalov**, Doctor of military science, professor, aprivalov@inbox.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) STABILITY ESTIMATION MODEL FOR THE OPERATION OF A RAILWAY STATION TELECOMMUNICATIONS NETWORK UNDER HARMFUL INTERFERENCE, BASED ON THE FUNCTIONAL INTEGRITY SCHEME

Objective: Calculate the telecommunications network stability of a railway station under exposure to destabilizing factors. **Methods:** The solution employed methods of system analysis, the communications networks reliability and longevity theory and general logical-and-probabilistic method, while calculations implemented the program complex of automated structural and logical modeling (PC ASM-2001). **Results:** A functional integrity scheme was developed for the operation of a railway station telecommunications network, with an estimation of its reliability under adverse factors. **Practical importance:** The suggested model may be used in designing railway telecommunications networks and the decision-making process pertaining to their control during operation. The results obtained strongly indicate to the possibility of applying the general logical-and-probabilistic method for researching the structurally complex railway station telecommunications network and determining ways to further improve it.

Stability, destabilizing factor, functional integrity scheme, logical criteria of functioning, performance function, probability function.

Введение

Телекоммуникационная сеть железнодорожной станции (ТКСЖДС) предназначена для обеспечения связью предприятий, организаций и всех структурных подразделений железнодорожного транспорта в соответствии с требованиями и правилами технической эксплуатации железных дорог.

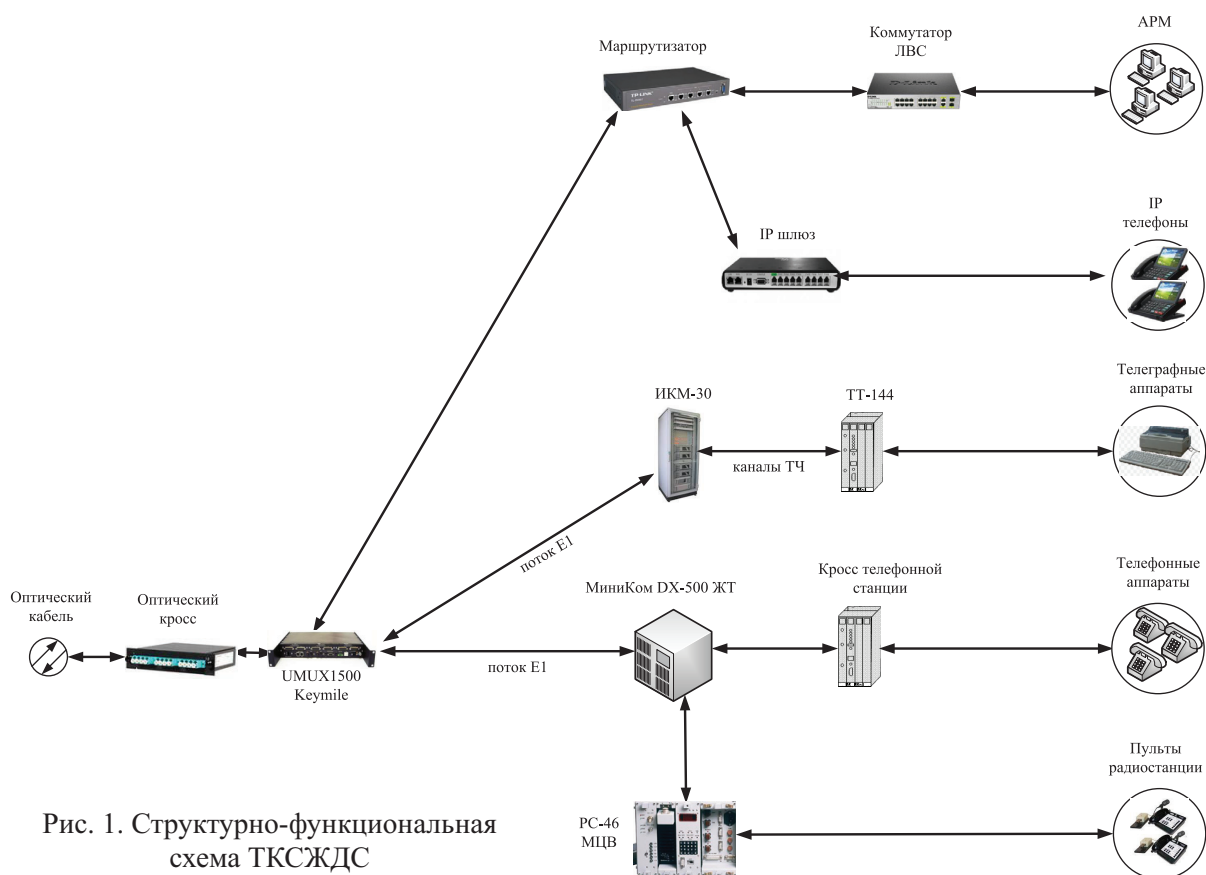
Для устойчивого функционирования и предоставления абонентам железнодорожной станции заданного качества услуг электросвязи состояние ТКСЖДС и ее элементов постоянно контролируется, а качество услуг поддерживается на заданном уровне. Однако, как показывает опыт эксплуатации, при возникновении нештатных ситуаций, обусловленных воздействием дестабилизирующих факторов (ДФ) и возникновением чрезвычайных ситуаций (ЧС), не только снижается качество предоставляемых услуг, но и происходят отказы в обслуживании абонентов. Необходимость повышения устойчивости функционирования

ТКСЖДС обуславливается возрастающими требованиями к качеству обслуживания абонентов ТКСЖДС в условиях ее функционирования в ограниченно ресурсной и неблагоприятной среде. Поэтому в настоящее время проблема количественной оценки устойчивости ТКСЖДС, функционирующих в условиях ДФ, достаточно актуальна.

В статье рассматривается подход к оценке устойчивости функционирования ТКСЖДС в условиях ДФ на примере ее расчета с использованием метода ОЛВМ [1], основанного на представлении ТКСЖДС в виде схемы функциональной целостности (СФЦ), на которой отображаются существенные логические условия процесса функционирования ТКСЖДС.

Постановка задачи

Пусть имеется ТКСЖДС (рис. 1), которая предоставляет абонентам железнодорожной станции различные виды услуг технологиче-



ской связи (рис. 2) [2]. Это обеспечивается за счет использования пассивных (оптический кабель, кроссы и т.д.) и активных элементов телекоммуникационного оборудования. К активным элементам ТКСЖДС относятся: цифровая коммутационная станция (МиниКом DX-500 ЖТ), стационарные радиостанции (модификации РС-46 МЦВ), системы передачи (ИКМ-30, мультиплексор UMUX1500 Keumile), сетевое оборудование (маршрутизаторы, коммутаторы и модемы) локальных вычислительных сетей (ЛВС), а также multifunctional абонентские терминалы.

На указанные элементы ТКСЖДС возможно воздействие дестабилизирующих факторов (рис. 3), каждый из которых приводит к нарушению работоспособности элементов с вероятностью p_j , а вероятность возникновения указанных факторов полагается известной и принимается равной p_j .

Требуется оценить устойчивость ТКСЖДС, функционирующей в условиях воздействий на ее элементы дестабилизирующих факторов: ДФ1 (стихийные бедствия), ДФ2 (погодноклиматического воздействия), ДФ3 (физические воздействия), ДФ4 (электромагнитные воздействия) и ДФ5 (информационные воздействия).

Решение

Известно [3], что под устойчивостью ТКСЖДС будем понимать комплексное свойство объектовой ТКС, заключающееся в ее способности при определенных условиях функционирования обеспечивать достоверную и безопасную передачу информации за время, не превосходящее заданное руководящими документами. Следовательно, в качестве показателя устойчивости ТКСЖДС целесообразно использовать функцию работоспособности, а для ее оценки – вероятность успешного функционирования сети в заданных условиях.

Анализ различных методов оценки устойчивости ТКС [4–9] показывает, что для решения поставленной задачи целесообразно использовать метод ОЛВМ [1, 10–12], обеспечивающий:

- моделирование и расчет показателей структурно-сложных систем;
- моделирование систем с учетом динамики функционирования и взаимодействия их элементов во времени;
- расчет функций работоспособности, вкладов и значимости элементов в сети, как характеристик целевой функции.



Рис. 2. Структурная схема классификации основных видов технологической связи на железнодорожном транспорте

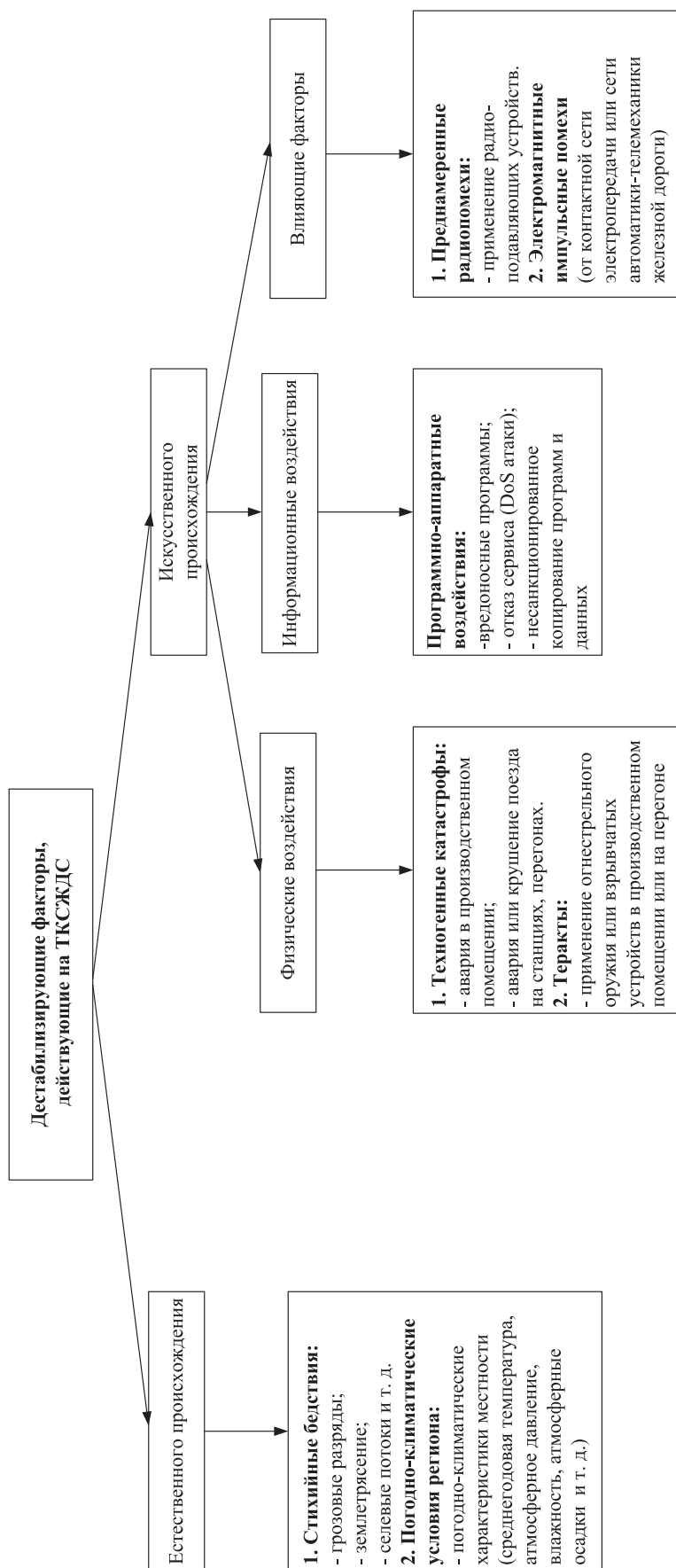


Рис. 3. Основные виды дестабилизирующих факторов, воздействующих на элементы ТКСЖД

Решение задачи содержит следующие этапы.

1. Формализованная постановка задачи

1.1. Построение в ПК АСМ-2001 исходной структурной схемы исследуемого свойства устойчивости ТКСЖДС в виде схемы функциональной целостности (СФЦ).

Под СФЦ понимается логически универсальное графическое средство структурного представления исследуемого свойства (устойчивость) ТКСЖДС.

Для построения СФЦ используется база графических примитивов ОЛВМ [1]. Для представления основных событий, соответствующих вершинам в СФЦ ТКСЖДС (см. рис. 6), используются функциональные вершины ($i1, i2, \dots, i73$), а для расширения функциональных возможностей СФЦ – фиктивные вершины ($j1, j2, \dots, j108$).

1.2. Определение исходных значений вероятностных параметров элементов сети, например, вероятность безотказной работы i -го элемента или вероятность сохранения работоспособности i -го элемента при воздействии ДФ.

1.3. Определение основных критериев, определяющих условия устойчивости, которые можно интерпретировать следующим образом: устойчивость функционирования ТКСЖДС равна произведению показателей устойчивости сети СПД, телефонной и радиосвязи и одной из сетей телеграфии или IP телефонии.

2. Построение логической модели устойчивости ТКСЖДС

Пример, демонстрирующий построение СФЦ для определения устойчивости пассивного элемента, показан на рис. 4. Видно, что на пассивный элемент воздействуют: ДФ1 (с вероятностью p_{70}), ДФ2 (с вероятностью p_{71}), ДФ3 (с вероятностью p_{72}). При этих воздействиях элемент может сохранять работоспособное состояние (вершины $i2, i3, i4$) с вероятностью p_2, p_3, p_4 и характеризуется структурной живучестью. С помощью фиктивных вершин ($j1, j2, j3$) показано состояние отказа элемента при случайных поражениях от воздействий ДФ1, ДФ2, ДФ3 соответственно.

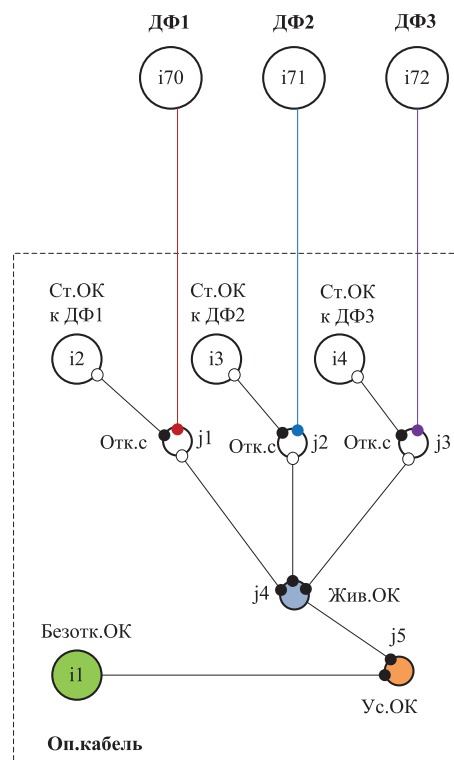


Рис. 4. СФЦ для определения устойчивости пассивного элемента ТКСЖДС

Под структурной живучестью [3] понимается способность системы сохранять (или не сохранять) работоспособность при случайных поражениях (не поражениях) ее элементов вследствие случайного возникновения поражающих факторов (ударов, взрывов, стихийных бедствий и т. д.).

Если на элемент не воздействуют внешние ДФ, его устойчивость характеризуется его структурной надежностью, под которой понимается способность системы (элемента) сохранять (или не сохранять) работоспособность при случайных возникновениях отказов/восстановлений ее элементов в нормальных (заданных) условиях эксплуатации (определение не противоречит ГОСТ 27.002-89).

Очевидно, что в общем виде вероятность безотказного состояния i -го элемента определяется по формуле

$$p_i = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} = \frac{1/t_{Bi}}{\frac{\lambda_i}{8760} + \frac{1}{t_{Bi}}}, \quad (1)$$

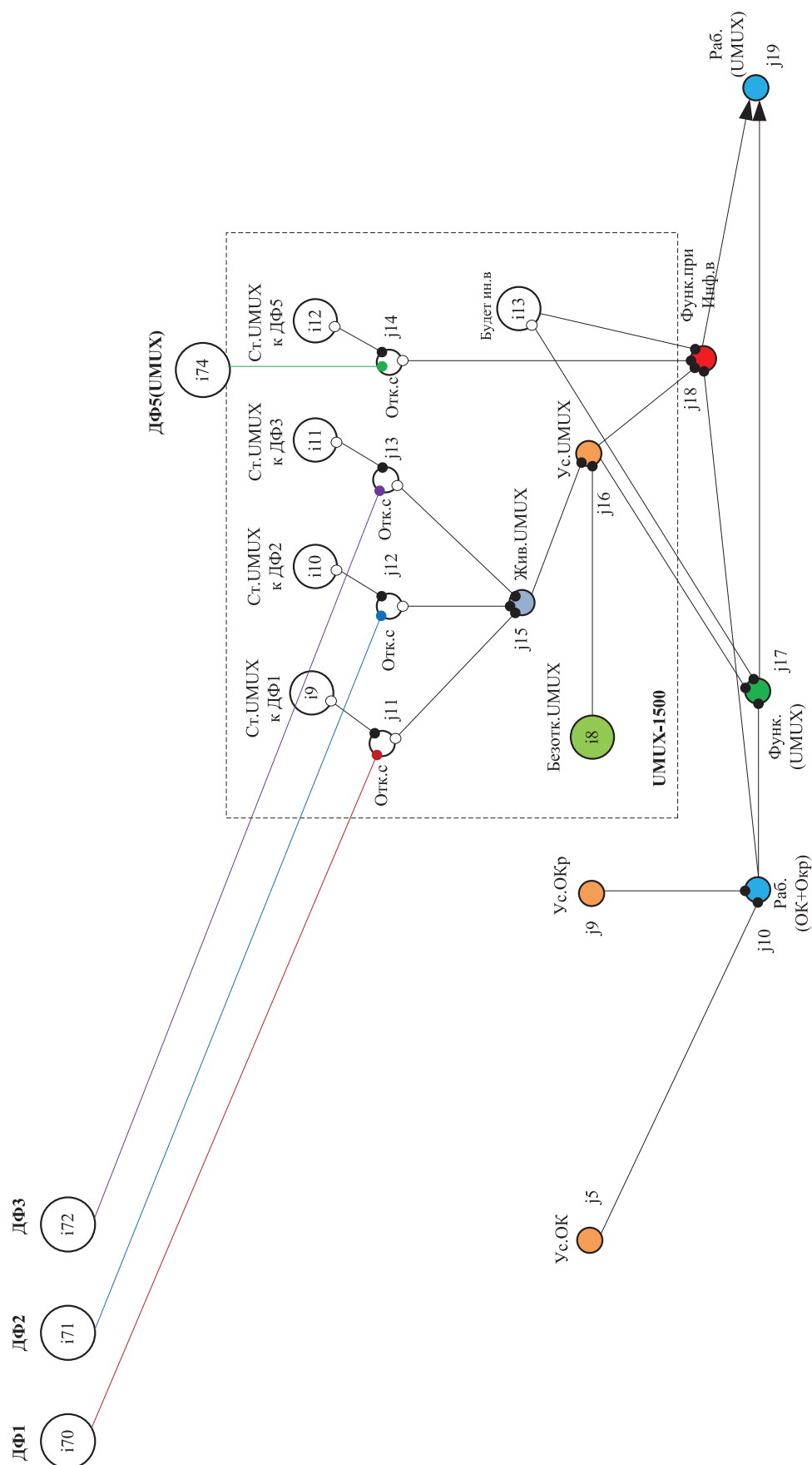


Рис. 5. СФЦ для определения устойчивости активного элемента ТКСЖД

где λ_i – интенсивность отказов i -го элемента; μ_i – интенсивность восстановления i -го элемента; 8760 – количество часов в календарном году; t_{vi} – время восстановления элемента i .

Таким образом, устойчивость пассивного элемента можно описать с помощью логических функций на выходе каждой вершины, т. е.:

$$y_5 = y_1 \cdot (y_2 \cup \bar{y}_{70}) \cdot (y_3 \cup \bar{y}_{71}) \cdot (y_4 \cup \bar{y}_{72}). \quad (2)$$

В свою очередь, устойчивость функционирования активного элемента (например, мультиплексора UMUX1500) зависит не только от физических деструктивных воздействий, но и кибервоздействий, реализуемых организованным нарушителем. Под организованным нарушителем понимается некая группа, представляющая интересы недружественной организации (государства), состоящая из высококвалифицированных, хорошо оснащенных техническими средствами специалистов в области информационной безопасности (ИБ), имеющих четкое распределение выполняемых функций, поставленных целей и задач.

Положим, что организованный нарушитель способен в любой момент времени оказать деструктивное воздействие (ДФ5) на сетевой элемент с вероятностью p_4 (функциональная вершина i74). Нарушитель принимает решение по выбору элемента ТКСЖДС в качестве цели воздействия, что характеризуется функциональной вершиной i13 (условие осуществимости информационного воздействия на нарушителя «1» – да, «0» – нет).

С помощью фиктивных вершин j18 и j19 отображаются условия устойчивости активного элемента (рис. 5), которые описываются с помощью логических функций на выходе каждой вершины, т. е.

$$y_{19} = [y_5 \cdot y_9 \cdot y_{16} \cdot \bar{y}_{13}] \cup [y_5 \cdot y_9 \cdot y_{16} \cdot y_{13}]. \quad (3)$$

С использованием полученных результатов была построена СФЦ (рис. 6) ТКСЖДС, функционирующей в условиях воздействия всех видов ДФ.

3. Построение расчетного многочлена вероятностной функции

В комплексах [13,14], реализующих технологию ПК АСМ-2001, обеспечивается автоматическое построение многочленов вероятностных функций. Основным допущением при этом является предположение о независимости в совокупности вероятностных параметров элементов и наличии групп несовместных событий [1].

4. Вычисление вероятностных показателей устойчивости ТКСЖДС

В программном комплексе ПК АСМ-2001 [13] и «Арбитр» [14] можно вычислять показатели устойчивости (надежности, живучести и безопасности), соответствующие государственным стандартам и руководящим документам, с точностью не хуже 0,01.

Для оценки устойчивости ТКСЖДС был использован программный комплекс АСМ-2001 и получены результаты, представленные на рис. 7.

На рис. 7 в виде гистограммы показаны значимости и вклады сетевых элементов в устойчивость ТКСЖДС, а P_c – вероятность сохранения работоспособности ТКСЖДС в условиях воздействия всех ДФ.

В общем случае определение значимости ξ_i отдельного i -го элемента ТКСЖДС определяется по формуле

$$\xi_i = \frac{P_{cp}}{P_i = 1} - \frac{P_{cp}}{P_i = 0}, \quad i = 1, 2, \dots, H, \quad (4)$$

где $\frac{P_{cp}}{P_i = 1}$ – вероятность сохранения работоспособности сети при абсолютной устойчивости i -го элемента; $\frac{P_{cp}}{P_i = 0}$ – вероятность сохранения работоспособности сети при достоверном отказе i -го элемента на рассматриваемом интервале времени функционирования, $t = 8760$ ч.

Наряду с характеристиками значимости все большее применение находят показатели положительного β_i^+ и отрицательного β_i^- вкладов элементов, $i = 1, 2, \dots, H$. Дело в том, что по-

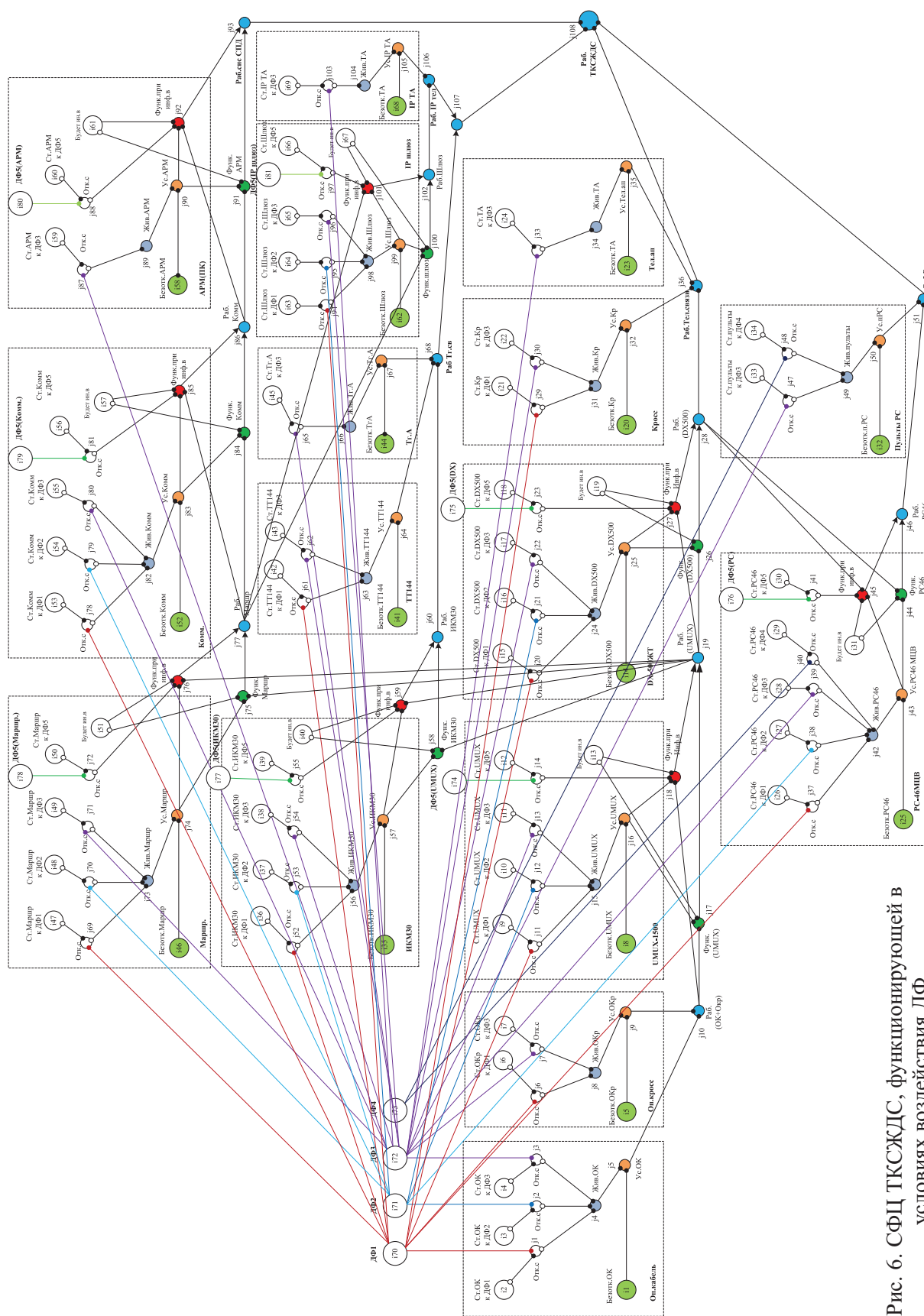


Рис. 6. СФЦ ТКСЖДС, функционирующей в условиях воздействия ДФ

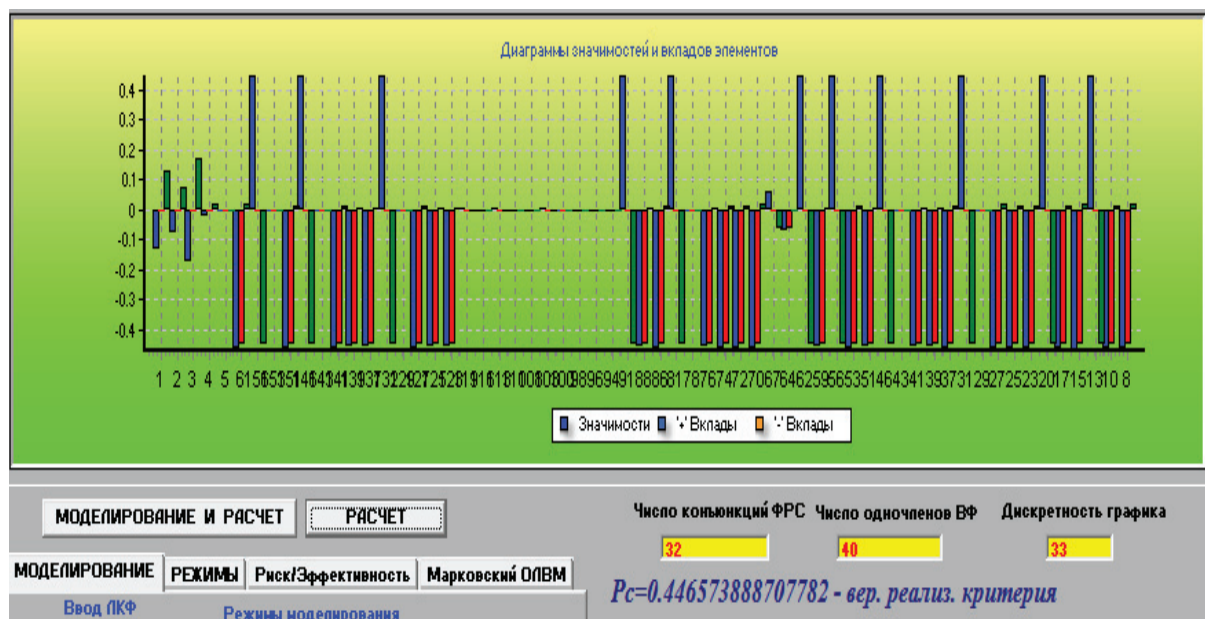


Рис. 7. Результаты моделирования ТКСЖДС

казатель значимости ξ_i не зависит от текущей величины собственного параметра P_i данного элемента, а диапазон значений вероятностного показателя значимости составляет $[-1, 0, 1]$. Поэтому характеристики вкладов β_i^+ и β_i^- показывают, на сколько изменится показатель устойчивости функционирования ТКСЖДС (P_c) при указанных изменениях параметра P_i элемента ТКСЖДС. Вклад β_i^+ и β_i^- элементов определяется соответственно формулам

$$\beta_i^+ = \frac{P_c}{P_i=1} - P_c, \quad (5)$$

$$\beta_i^- = \frac{P_c}{P_i=0} - P_c. \quad (6)$$

Результаты показывают, что устойчивость (вероятность сохранения работоспособности) ТКСЖДС в условиях дестабилизирующих факторов составляет около $P_c = 0,45$, что существенно ниже требуемого значения [3]. Повышение устойчивости функционирования ТКСЖДС может быть обеспечено резервированием основных «жизненно важных» элементов, уменьшением времени восстановления их работоспособности, а также выбором рациональной периодичности контроля параметров телекоммуникационного

оборудования [15]. Однако реализация указанных мер не приведет к значительному росту показателя устойчивости из-за высокой уязвимости узловых элементов ТКСЖДС от кибервоздействий, которые могут привести к нарушению конфиденциальности передаваемой информации, ее целостности и доступности. Это актуализирует задачу разработки методов защиты сетевых элементов ТКСЖДС от кибервоздействий организованного нарушителя.

Заключение

Разработана модель для расчета устойчивости ТКСЖДС с использованием метода ОЛВМ. Результаты решения поставленной задачи (см. (1)–(6)) показывают, что выбранный метод моделирования может быть использован для оценки не только устойчивости объектов ТКС, но и совокупности ЖДС, используемых для реализации заданного этапа перевозочного процесса и образующих железнодорожный участок.

Предложена структурно-логическая схема функциональной целостности ТКСЖДС, которая комплексно отображает взаимосвязь

элементов сети и влияние на их работоспособность заданной совокупности дестабилизирующих факторов, позволяет вычислять системные характеристики устойчивости и учитывать используемые на объектах методы резервирования оборудования.

Библиографический список

1. Поленин В.И. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства : монография / В.И. Поленин, И.А. Рябинин, С.К. Свиринов, И.А. Гладкова ; под ред. А.С. Можаяева. – Проект в рамках Концепции социально политического проекта РЕАН «Актуальные проблемы безопасности социума». – СПб. : РЕАН, 2011. – 416 с.

2. Юркин Ю.В. Оперативно-технологическая телефонная связь на железнодорожном транспорте: учебник для вузов ж.-д. транспорта / Ю.В. Юркин, А.К. Лебединский, В.А. Прокофьев, И.Д. Блиндер / под ред. Ю.В. Юркина. – М. : ФГОУ УМЦ по образованию на ж.-д. транспорте, 2007. – 264 с.

3. Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р 53111-2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. – М. : Стандартинформ, 2009. – 31 с.

4. Михайлов Р.Л. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на нее дестабилизирующих факторов / Р.Л. Михайлов, С.И. Макаренко // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2013. – № 4 (12) – С. 69–70.

5. Попков В.К. Математические модели живучести сетей связи / В.К. Попков. – Новосибирск : ВЦ СО РАН, 1990. – 235 с.

6. Попков В.К. Модели анализа устойчивости и живучести информационных сетей / В.К. Попков, В.П. Блукке, А.Б. Дворкин // Проблемы информатики. – 2009. – С. 63–78.

7. Князева Н.А. Повышение живучести информационно-коммуникационной сети путем структурного резервирования / Н.А. Князева, И.В. Грищенко // Вестник ДУИКТ. – 2013. – № 2. – С. 21–25.

8. Князева Н.А. Повышение структурной живучести телекоммуникационной сети / Н.А. Князева //

Intern. Journal “Information Models and Analyses”. – 2013. – Vol. 2, N 3. – P. 275–284.

9. Попков Г.В. О проблеме живучести телекоммуникационных сетей / Г.В. Попков // Вестн. Бурят. гос. ун-та. – 2014. – № 9.3. – С. 39–48

10. Можаяев А.С. Технология автоматизированного структурно-логического моделирования надежности, живучести, безопасности, эффективности и риска функционирования систем / А.С. Можаяев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2008. – С. 1–14.

11. Дурденко В.А. Логико-вероятностное математическое моделирование и оценка надежности системы контроля и управления доступом / В.А. Дурденко, А.А. Рогожин, Б.О. Баторов // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. – 2014. – № 1. – С. 7–19.

12. Рогожин А.А. Математическое моделирование и оценка надежности интегрированной системы безопасности при воздействии дестабилизирующих факторов / А.А. Рогожин, В.А. Дурденко, Б.О. Баторов // Вестн. Воронеж. гос. ин-та МВД России. – 2014. – № 1. – С. 75–86

13. Можаяев А.С. Арбитр. № 2003611101. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем. – М. : Роспатент РФ, 2003.

14. Можаяев А.С. ПК АСМ-2001. № 2003611099. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности, живучести и безопасности систем. – М. : Роспатент РФ, 2001.

15. Котов В.К. Научно-методические основы управления надежностью и безопасностью эксплуатации сетей связи железнодорожного транспорта: монография / В.К. Котов, В.Р. Антонец, Г.П. Лабеевская, В.В. Шмытинский. – М. : ФГБОУ УМЦ по образованию на ж.-д. транспорте, 2012. – 193 с.

References

1. Polenin V.I., Ryabinin I.A., Svirin S.K. & Gladkova I.A. *Primenenie obshchego logiko-veroyatnostnogo metoda dlya analiza tekhnicheskikh, voennykh organizatsionno-funktsional'nykh sistem i vooruzhen-nogo protivoborstva*: monografiya [Applying the gen-

eral logical-and-probabilistic method for analyzing technical and military organizational-functional systems and armed confrontation: a monograph], edited by A. S. Mozhayev. Project implemented as part of the concept behind the REAN “Current issues of social safety” socio-political project. Saint Petersburg, 2011, 416 p. (In Russian)

2. Yurkin Y. V., Lebedinskij A. K., Prokof'ev V. A. & Blinder I. D. *Operativno-tehnologicheskaya telefonnaya svyaz' na zheleznodorozhnom transporte* [Operational telephone communications in railway transport]: railway transport college textbook/edited by Y. V. Yurkin. Moscow, Railway Transport Training Center Publ., 2007, 264 p. (In Russian)

3. Russian Federation national standard. GOST P 53111–2008. *Ustojchivost' funktsionirovaniya seti svyazi obshchego pol'zovaniya* [Stability of functioning of the public communications network]. Moscow, Standartinform Publ., 2009, 31 p. (In Russian)

4. Mikhailov R. L. & Makarenko S. I. Otsenka ustojchivosti seti svyazi v usloviyakh vozdeystviya na nee destabilizirujushchikh faktorov [Evaluation of a communications network stability under exposure to destabilizing factors]. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy* [Radio and telecommunications systems], 2013, no. 4 (12), pp. 69–70. (In Russian)

5. Popkov V. K. *Matematicheskie modeli zhivuchesti setej svyazi* [Mathematical models of communication networks survivability]. Novosibirsk, CC SB RAS Publ., 1990, 235 p. (In Russian)

6. Popkov V. K., Blukke V. P. & Dvorkin A. B. Modeli analiza ustojchivosti i zhivuchesti informatsionnykh setej [Analysis methods for information network stability and survivability]. *Problemy informatiki* [Issues of Information Science], 2009, no. 4, pp. 63–78. (In Russian)

7. Knyazeva N. A. & Grishchenko I. V. Povyshenie zhivuchesti infokommunikatsionnoj seti putem strukturnogo rezervirovaniya [Increasing infocomm network survivability via structural redundancy]. *DUIKT Bulletin*, no. 2, pp. 21–25. (In Russian)

8. Knyazeva N. A. Povyshenie strukturnoj zhivuchesti telekommunikatsionnoj seti [Increasing the telecommunications network survivability]. *Intern. J. Information Models and Analyses*, 2013, vol. 2, no. 3, pp. 275–284. (In Russian)

9. Popkov G. V. O probleme zhivuchesti telekommunikatsionnykh setej [On the issue of telecommunications network survivability]. *The Buryat State University Bulletin*, 2014, no. 9.3, pp. 39–48. (In Russian)

10. Mozhaev A. S. Tekhnologiya avtomatizirovannogo strukturno-logicheskogo modelirovaniya nadezhnosti, zhivuchesti, bezopasnosti, jeffektivnosti i riska funktsionirovaniya sistem. [Automated structure-logical modeling technology for stability, survivability, safety, efficiency and functional risks of systems]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, controls, diagnostics], 2008, pp. 1–14. (In Russian)

11. Durdenko V. A., Rogozhin A. A. & Batorov B. O. Logiko-veroyatnostnoe matematicheskoe modelirovanie i otsenka nadezhnosti sistemy kontrolya i upravleniya dostupom [Logical-and-probabilistic mathematical modeling and appraisal of safety of a controls and access management system]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta* [The Voronezh State University Bulletin], 2014, no. 1, pp. 7–19. (In Russian)

12. Durdenko V. A., Rogozhin A. A. & Batorov B. O. Matematicheskoe modelirovanie i otsenka nadezhnosti integrirovannoj sistemy bezopasnosti pri vozdeystvii destabilizirujushchikh faktorov [Logical-and-probabilistic mathematical modeling and appraisal of stability of an integrated safety system under exposure to destabilizing factors]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta* [The Voronezh State University Bulletin], 2014, no. 1, pp. 75–86. (In Russian)

13. Mozhaev A. S. Arbiter. № 2003611101. *Programmnyj kompleks avtomatizirovannogo strukturno-logicheskogo modelirovaniya i rascheta nadezhnosti i bezopasnosti sistem* [Software suite for automated structural and logical modeling and system reliability and safety calculations]. Moscow, Rospatent RF, 2003 (In Russian)

14. Mozhaev A. S. PK ASM-2001. № 2003611099. *Programmnyj kompleks avtomatizirovannogo strukturno-logicheskogo modelirovaniya i rascheta nadezhnosti, zhivuchesti i bezopasnosti sistem* [Software suite for automated structural and logical modeling and system reliability, survivability and safety calculations]. Moscow, Rospatent RF, 2001 (In Russian)

15. Kotov V. K., Antonets V. R., Labetskaya G. P. & Shmytinskij V. V. *Nauchno-metodicheskie osnovy upravleniya nadezhnost'ju i bezopasnost'ju ekspluatatsii setej svyazi zheleznodorozhnogo transporta: monografia [Scientific and methodological basics of managing reliability and safety of operating rail transport communications network: a monograph]*. Moscow, Railway Transport Training Center Publ., 2012, 193 p. (In Russian)

*БЕКБАЕВ Гамзатдин Алеуатдинович – аспирант, gamzat-86@mail.ru; ПРИВАЛОВ Андрей Андреевич – доктор военных наук, профессор, aprivalov@inbox.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 625.172

В. П. Бельтюков, И. А. Симонюк**К ВОПРОСУ ОБ УЛУЧШЕНИИ СРЕДНЕСРОЧНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПУТЕВЫХ РАБОТ**

Дата поступления: 19.04.2016

Решение о публикации: 16.12.2016

Цель: Улучшение качества среднесрочного планирования путевых работ и снижение отказов в работе технических средств. **Методы:** Результативно применены комплексы существующих базовых методов изучения статистических данных, в том числе теория вероятности, теория надежности восстанавливаемых технических систем, методы планирования эксперимента, экспериментальные и аналитические исследования и системный подход. Впервые предлагается использовать предполагаемую интенсивность накопления остаточных деформаций и изменение затрат на содержание пути при среднесрочном планировании ремонтов. **Результаты:** Представлены пути улучшения существующей системы среднесрочного планирования путевых работ и способы их устранения; сделан вывод о необходимости учета прогнозных значений о техническом состоянии верхнего строения железнодорожного пути при среднесрочном планировании путевых работ; выявлены недостатки баз данных о техническом состоянии пути. **Практическая значимость:** Создана система практических рекомендаций по улучшению качества среднесрочного планирования путевых работ с использованием результатов прогнозирования изменения технического состояния верхнего строения железнодорожного пути, основанных на исследовании зависимости интенсивности накопления остаточных деформаций верхнего строения железнодорожного пути от наработки тоннажа или срока службы в годах для среднесрочного планирования путевых работ; новые универсальные методы прогнозирования изменения технического состояния верхнего строения железнодорожного пути, основанные на разработанной математической модели, применимы для использования в Системе оценки и прогнозирования состояния объектов эксплуатационной инфраструктуры пути Единой корпоративной автоматизированной системы управления состоянием инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Среднесрочное планирование, верхнее строение железнодорожного пути, прогнозирование, интенсивность накопления остаточных деформаций, пропущенный тоннаж.

Vladimir P. Belyukov, Cand. Eng., associate professor, bw@peterlink.ru; ***Ivan A. Simonyuk**, Cand. Eng., teaching fellow, simonyuk@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University)
CONCERNING THE IMPROVEMENT OF MID-TERM TRACKWORK PLANNING

Objective: Improve mid-term trackwork planning and reduce equipment failure. **Academic novelty:** For the first time, the assumed intensity of residual strain accumulation and the change in costs pertaining to track upkeep are suggested to be used for mid-term planning of maintenance. **Methods:** Sets of existing basic methods for researching statistical data were effectively employed, among those the theory of relativity, the theory of renewable technical systems reliability, experiment planning methods, experimental and analytical research and a systems approach. **Results:** Ways to improve and dispose of the existing mid-term trackwork planning system were provided; a conclusion was made concerning the necessity of accounting for prospective data on the technical condition of the rail track superstructure when doing mid-term planning of trackwork; disadvantages of databases on the technical condition of track were elucidated. **Practical importance:** The research resulted in the creation of a system of practical recommendations on improving the quality of mid-term trackwork planning with use of forecasting of the rail track superstructure condition change based on researching the dependence of intensity of

residual deformation of the rail track superstructure on accrued tonnage or service life in years for mid-term trackwork planning; new universal methods of forecasting the changes in the technical condition of the rail track superstructure based on the developed mathematical model are applicable for use in the System of estimation and forecasting of condition of the track's operational infrastructure of the Unified corporate automated system for rail transport infrastructure management.

Mid-term planning, rail track superstructure, forecasting, residual deformation accrual intensity, tonnage passed.

Введение

На совещании инфраструктурного комплекса ОАО «РЖД» президентом компании Олегом Белозеровым был поставлен ряд задач, одной из которых является повышение уровня и качества среднесрочного планирования путевых работ, а также необходимость снижения отказов в работе технических средств.

Среднесрочное планирование – один из основных видов планирования путевых работ в ОАО «РЖД», предусмотренных нормативно-техническими документами путевого хозяйства [1, 2]. Это планирование должно основываться на прогнозировании изменения технического состояния железнодорожного пути и экономических расчетах [1, 3]. Однако реально работающего автоматизированного механизма планирования путевых работ с использованием предполагаемой интенсивности накопления остаточных деформаций аппарат управления путевым комплексом ОАО «РЖД» не имеет, что говорит об актуальности поднимаемого вопроса.

Улучшение уровня планирования может быть достигнуто за счет внедрения современных подходов к решению этой задачи. Основной путь решения – исследование изменения технического состояния верхнего строения железнодорожного пути и его экономических показателей с построением прогнозных значений на трехлетнем горизонте планирования.

Математическая модель

В разработанных в ПГУПС методиках [4–6] для прогнозирования интенсивности накопления остаточных деформаций верхнего строения пути построена математическая модель (рис. 1), учитывающая процесс восстановления верхнего строения пути после устранения неисправностей [7]. Представленная на рисунке математическая модель получена на основании изучения теории надежности восстанавливаемых технических систем и обработки большого ряда статистических данных о техническом состоянии верхнего

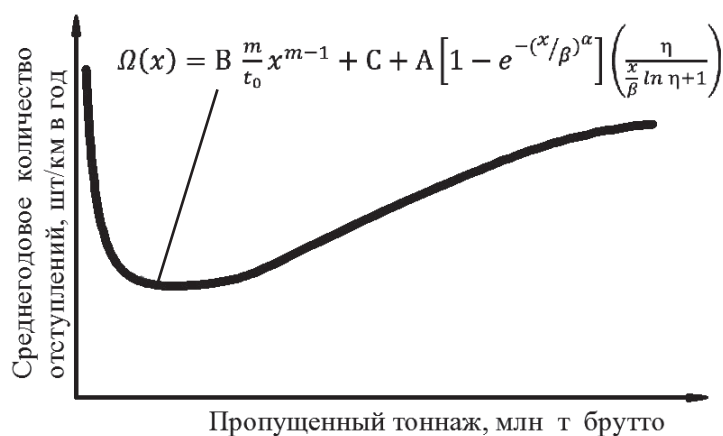


Рис. 1. Математическая модель интенсивности накопления остаточных деформаций верхнего строения железнодорожного пути

строения железнодорожного пути по данным автоматизированных систем управления путевого хозяйства. Особенностью такой модели является то, что она универсально применима при определении любых показателей интенсивности накопления остаточных деформаций рельсовой колеи. Модель позволяет адекватно и достоверно изучить показатели интенсивности накопления одиночного выхода рельсов, шпал, креплений, а также отступлений рельсовой колеи в плане и профиле в течение всего жизненного цикла (от одного капитального ремонта до следующего). Следовательно, применение математической модели дает возможность не только улучшить среднесрочное планирование, но и оптимизировать систему содержания верхнего строения железнодорожного пути в целом [8] и соответствует современным нормативам ОАО «РЖД» [9–12]. Становится возможным сопоставление поведения пути в разных эксплуатационных условиях и с различными его конструктивными особенностями, что дает повод к решению ряда других важных вопросов, как выбор оптимальной конструкции верхнего строения железнодорожного пути и исследование количественных значений о выходе из строя отдельных элементов верхнего строения, таких как рельсы, шпалы и крепления [13, 14].

Улучшение качества среднесрочного планирования может быть достигнуто за счет повышения объективности как статистических данных о техническом состоянии пути, так и данных о трудозатратах по результатам выполнения работ на перегоне или станции. Данные о трудозатратах, заносимые дистанцией пути в единую технологическую базу данных управления трудовыми ресурсами, в ряде случаев недостоверны. Например, работы по одиночной смене шпал выполнялись на фронте работ длиной 200 м, а в базе данных указано значение, в 100 раз превышающее фактическое, что явно не соответствует действительности. Причиной этому является человеческий фактор (ошибка при вводе данных или целенаправленный ввод информации, не отвечающей фактически выполненной работе).

Существующая система планирования ремонтов пути имеет определенные недостатки и нуждается в усовершенствовании с применением современных научных подходов. Отсутствие учета особенностей конкретного участка пути, изменения его состояния с наработкой тоннажа неизбежно ведут к нерациональному планированию ремонтов пути (ремонт либо не назначается и начинается его просрочка со стремительным ухудшением состояния пути, либо ремонт назначается на участке пути, на котором техническое состояние по-прежнему позволяет его эксплуатацию в безопасном и бесперебойном движении, с установленными скоростями и осевыми нагрузками без выполнения ремонта). Назначение ремонта пути по статическим критериям (выход рельсов, пропущенный тоннаж, срок службы (в годах), количество отступлений, частота отказов и др.) не всегда приводит к правильному результату, так как не учитывает динамику изменения состояния пути в прошлом и прогноз на перспективу. На рис. 2 изображен пример того, как с наработкой тоннажа изменяются показатели состояния пути на участках *A* и *B* с одинаковыми эксплуатационными и конструктивными параметрами на дату планирования и дату выполнения ремонта пути, так как показания состояния пути на участке *A* хуже, то на нем следует назначить ремонт, но на участке *B* выше интенсивность расстройств рельсовой колеи, а значит, на дату выполнения ремонта техническое состояние участков будет иметь противоположную ситуацию.

Таким образом, при среднесрочном планировании необходимо учитывать предполагаемую интенсивность накопления остаточных деформаций и изменение затрат на содержание пути. Практически прогнозные значения интенсивностей накопления остаточных деформаций верхнего строения железнодорожного пути предлагаются для использования в Системе оценки и прогнозирования состояния объектов эксплуатационной инфраструктуры пути Единой корпоративной автоматизированной системы управления состоянием ин-

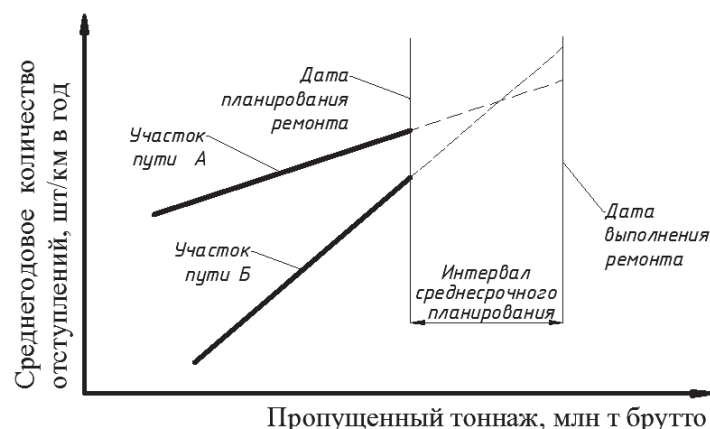


Рис. 2. Планирование ремонтов пути на участках с различной интенсивностью расстройств рельсовой колеи

фраструктуры железнодорожного транспорта (ЕКАСУИ).

Существующий объем статистических данных о техническом состоянии пути ОАО «РЖД» не всегда достаточен для прогнозирования интенсивности накопления остаточных деформаций или статистический ряд представляет собой «слабую тесноту» связи с теоретической функцией модели, т. е. величина достоверности аппроксимации данных меньше 0,5 ($R^2 < 0,5$). Поэтому предлагается использовать среднесетевые зависимости интенсивности накопления остаточных деформаций с параметрами, одинаковыми для участка, на котором будет выполняться прогноз [15]. Параметры среднесетевого тренда сопоставляются с параметрами зависимости для рассматриваемого участка через корректирующие коэффициенты. Значения корректирующих коэффициентов определены в ПГУПС для всех вариантов конструкций пути и условий эксплуатации на сети железных дорог, позволяющие наиболее достоверно получить данные о техническом состоянии пути на среднесрочный период прогнозирования.

Кроме недостаточности данных о техническом состоянии пути конкретного участка, есть проблема формирования выборок для исследования состояния пути. Суть проблемы лежит в процессе перехода работы одной программы (АСУ-П) на другую (ЕКАСУИ). С 2015 г. была прекращена поддержка АСУ-П,

но переход на ЕКАСУИ с полным переносом данных осуществлен не был. Наличие этого факта отрицательно сказывается на дальнейших исследованиях в области изучения процессов интенсивности накопления остаточных деформаций верхнего строения железнодорожного пути, так как предполагается, что процесс прогнозирования технического состояния пути должен осуществляться в автоматизированном режиме. Отсутствие данных затрудняет такой процесс и не позволяет совершенствовать методику прогнозирования технического состояния железнодорожного пути.

Заключение

Повышение уровня среднесрочного планирования и снижение отказов в работе технических средств, безусловно, является важной задачей в оперативной деятельности путевого комплекса, что приводит к повышению безопасности движения поездов и оптимальному распределению финансовых, материальных и трудовых ресурсов на содержание верхнего строения железнодорожного пути, но для этого необходимо выполнить ряд изменений в системе планирования ремонтов пути:

- 1) повысить достоверность баз данных ЕКАСУИ;
- 2) осуществить полный переход на новую ЕКАСУИ;

3) автоматизировать существующую систему среднесрочного планирования ремонтов пути с учетом предполагаемой интенсивности накопления остаточных деформаций и изменения затрат на содержание пути.

Библиографический список

1. Технические условия на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути. – Распоряжение ОАО «РЖД» № 75р от 18.01.2013 г.

2. Положение о системе ведения путевого хозяйства. – Утв. расп. ОАО «РЖД» от 31.12.2015 г. № 3212 р.

3. Бельтюков В.П. Среднесрочное планирование работ по ремонту верхнего строения пути / В.П. Бельтюков // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – № 2. – С. 23–25.

4. Методика прогнозирования технического состояния участков пути – Утв. ЦП ОАО «РЖД» 18.11.2011.

5. Методика экономической оценки прогнозируемых потребных путевых работ и затрат на содержание пути – Утв. ЦП ОАО «РЖД» 18.11.2011.

6. Методика оптимизации содержания пути по экономическим критериям – Утв. ЦП ОАО «РЖД» 18.11.2011.

7. Симонюк И. А. Прогнозирование интенсивности накопления остаточных деформаций верхнего строения железнодорожного пути для среднесрочного планирования путевых работ / И. А. Симонюк : дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – СПб. : ПГУПС, 2014. – 147 с.

8. Бельтюков В.П. Использование стоимости жизненного цикла для оптимизации технического обслуживания верхнего строения железнодорожного пути / В.П. Бельтюков, А.А. Третьяков // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. науч. тр. / под ред. В.С. Шварцфельда. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. – Вып. 3. – С. 42–47.

9. Гапанович В. А. На основе оптимизации стоимости жизненного цикла / В. А. Гапанович // Железнодорожный транспорт. – 2013. – № 6. – С. 26–34.

10. Ермаков В.М. Новый подход к планированию путевых работ / В.М. Ермаков // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 10. – С. 49–50.

11. ГОСТ Р 55443-2013. Железнодорожный путь. Номенклатура показателей надежности и функциональной безопасности. – М. : Стандартинформ, 2013. – 12 с.

12. Методика составления расчетной модели жизненного цикла километра железнодорожного пути. – Утв. вице-президентом ОАО «РЖД» В.А. Гапановичем 20.10.2012 г.

13. Андреев А.В. Влияние конструкции верхнего строения пути на стоимость жизненного цикла при различных климатических и эксплуатационных условиях / А.В. Андреев // Изв. ПГУПС. – 2014. – Вып. 3. – С. 36–39.

14. Бельтюков В.П. Прогнозирование и оптимизация затрат – основа планирования ремонтов / В.П. Бельтюков, И.А. Симонюк, А.В. Андреев, А.В. Сенникова // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 2. – С. 16–20.

15. Бельтюков В.П. Разработка методик прогнозирования технического состояния пути, затрат на содержание пути и оптимизации содержания пути по экономическим критериям / В.П. Бельтюков // Путь XXI века : сб. науч. трудов Междунар. науч.-практ. конф. 2 июня 2011 г., Санкт-Петербург / под ред. проф. Л.С. Блажко. – СПб. : ПГУПС, 2012. – С. 25–33.

References

1. *Tekhnicheskie usloviya na raboty po rekonstruktsii (modernizatsii) i remontu zheleznodorozhnogo puti* [Technical conditions for rail track overhaul (modernization) and maintenance]. Order of ОАО RZD no. 75r. dated 18.01.2013 (In Russian)

2. *Polozhenie o sisteme vedeniya putevogo khozyajstva* [Provision on rail track management]. Approved by decree of ОАО RZD dated Dec. 31, 2015, no. 3212r. (In Russian)

3. Bel'tjukov V.P. Srednesrochnoe planirovanie rabot po remontu verkhnego stroeniya puti [Mid-term planning of rail track superstructure maintenance]. *Put'i putevogo khozyajstva* [Rail track and track management], 2013, no. 2, pp. 23–25. (In Russian)

4. Metodika prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya uchastkov puti [Method of forecasting the technical condition of rail track sections]. Approved by TsPOAO RZD dated 18.11, 2011. (In Russian)
5. Metodika jekonomicheskoy otsenki prognoziruemykh potrebnnykh putevykh rabot i zatrat na soderzhanie puti [Economic evaluation methods for forecast necessary work and expenses pertaining to rail track maintenance]. Approved by Order of OAO RZD dated 18.11.2011. (In Russian)
6. Metodika optimizatsii soderzhaniya puti po jekonomicheskim kriteriyam [Method for optimizing track maintenance based on economic criteria]. Approved by Order of OAO RZD dated 18.11.2011 (In Russian)
7. Simonjuk I. A. *Prognozirovanie intensivnosti nakopleniya ostatochnykh deformatsij verkhnego stroeniya zheleznodorozhnogo puti dlya srednesrochnogo planirovaniya putevykh rabot* [Forecasting the intensity of residual deformations accrual in the rail track superstructure for mid-term trackwork planning]. Master's thesis. Saint Petersburg, 2014, pp. 60–62. (In Russian)
8. Bel'tjukov V. P., Tret'yakov A. A. Ispol'zovanie stoimosti zhiznennogo tsikla dlya optimizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniya verkhnego stroeniya zheleznodorozhnogo puti [Using the life-cycle cost for optimizing maintenance of the rail track superstructure]. *Proektirovanie razvitiya regional'noj seti zheleznykh dorog: sb. nauchnykh trudov* [Planning the development of a regional railroad network: edited volume]. Ed. by V. S. Shvartsfel'd. Khabarovsk, DVGUPS Publ., 2015, issue 3, pp. 42–47. (In Russian)
9. Gapanovich V. A. Na osnove optimizatsii stoimosti zhiznennogo tsikla [Based on life-cycle cost optimization]. *Zheleznodorozhnyj transport* [Rail Transport], 2013, no. 6, pp. 26–34. (In Russian)
10. Ermakov V. M. Novyj podkhod k planirovaniyu putevykh rabot [A new approach to planning trackwork]. *Zheleznodorozhnyj transport* [Rail Transport], 2012, no. 10, pp. 49–50. (In Russian)
11. GOST R 55443-2013. *Zheleznodorozhnyj put'. Nomenklatura pokazatelej nadezhnosti i funktsional'noj bezopasnosti* [Functional safety and reliability rate nomenclature]. Mosco, Standartinform Publ., 2013. (In Russian)
12. Metodika sostavleniya raschetnoj modeli zhiznennogo tsikla kilometra zheleznodorozhnogo puti [Method for creating a prediction model for a life-cycle of a one kilometer section of a rail track]. Approved by vice president of OAO RZD V. A. Gaspanovich on October 20, 2012. (In Russian)
13. Andreev A. V. Vliyanie konstruktssii verkhnego stroeniya puti na stoimost' zhiznennogo tsikla pri razlichnykh klimaticheskikh i jekspluatatsionnykh usloviyakh [The influence of the rail track superstructure on the cost of the track's life cycle under different climatic and operational conditions]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [The St. Petersburg Transport University Bulletin]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, issue 3, pp. 36–39. (In Russian)
14. Bel'tjukov V. P., Simonjuk I. A., Andreev A. V. & Sennikova A. V. Prognozirovanie i optimizatsiya zatrat – osnova planirovaniya remontov [Forecasting and optimization of costs as the basis for maintenance planning]. *Put' i putevoe khozyajstvo* [Rail track and track management], 2014, no. 2, pp. 16–20. (In Russian)
15. Bel'tjukov V. P. Razrabotka metodik prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya puti, zatrat na soderzhanie puti i optimizatsii soderzhaniya puti po jekonomicheskim kriteriyam [Developing the methods for forecasting the track's technical condition, track upkeep costs and optimization of track upkeep based on economic criteria]. *Put' XXI veka* [The 21st Century Way]: the June 2, 2011 international workshop edited volume. Ed. by L. S. Blazhko. Sankt Peterburg, PGUPS Publ., 2012, pp. 25–33. (In Russian)

БЕЛЬТЮКОВ Владимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, bw@peterlink.ru; *СИМОНЮК Иван Андреевич – канд. техн. наук, ассистент, simonyuk@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 656.22

Г. М. Groшев, Ю. И. Ефименко, А. В. Сугоровский, Ан. В. Сугоровский**ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИСПЕТЧЕРСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ УЧАСТКАХ**

Дата поступления: 30.09.2016

Решение о публикации: 06.10.2016

Цель: Важное место в оперативном управлении перевозками на основе плана формирования, графика движения поездов, технических норм использования перевозочных средств и инфраструктуры железных дорог занимает оперативное диспетчерское регулирование эксплуатационной работы. К настоящему времени недостаточно исследований, которые в полной мере позволяли бы оценить эффективность применяемых диспетчерских регулировочных приемов на участках, в узлах и сортировочных станциях с учетом специфики их работы и развитости инфраструктуры. Следует обосновать эффективность реализации диспетчерского приема «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на участке». **Методы:** Имитационное моделирование. При моделировании учтена неравномерность поступления поездов с внешней сети, для чего используются методы теории вероятностей. **Результаты:** Предложено формализованное представление реализации в имитационной модели регулировочного приема «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на участке». В результате экспериментов с имитационной моделью определены суммарные и средние суммарные задержки в ожидании обслуживания в течение первого месяца без применения приема «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на участке» и с его использованием. Установлено, что благодаря применению диспетчерского воздействия «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на железнодорожном участке» суммарные задержки в ожидании обслуживания меньше в среднем на 60 %, чем без его использования. В результате оценки экономической эффективности реализации приема диспетчерского регулирования «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на участке» установлено, что экономия эксплуатационных расходов в результате его применения для независимых участников перевозки может составить от 1 до 426 млн руб./год. **Практическая значимость:** Результаты исследования будут способствовать повышению эффективности диспетчерского регулирования эксплуатационной работы на участках.

Диспетчерское регулирование, эффективность, имитационное моделирование.

Gennadij M. Groshev, D. Eng, professor, spbgroshev@gmail.com; **Juriy I. Efimenko**, D. Eng., professor, zdsu@pgups.ru; **Artem V. Sugorovskij**, Cand. Eng., assistant professor, c123945@yandex.ru; * **Anton V. Sugorovskij**, Cand. Eng., gthdsq555@yandex.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) SUBSTANTIATION OF EFFECTIVENESS OF SUPERVISORY CONTROL AT RAILROAD SECTIONS

Objective: Provide rationalization for the effectiveness of implementing the dispatching technique “Changing the train crossing or overtaking points at a railroad section”. **Methods:** Simulation modeling. The modeling accounted for the irregularity of arrival of trains from an external network, to which end calculus of probability is employed. **Results:** The article suggests a formalized simulation model representation of the dispatching technique “Changing the train crossing or overtaking points at a railroad section”. Experiments with the simulation model produced total and average values of resultant delays in awaiting service during the first month without applying the technique “Changing the train crossing or overtaking points at a railroad section” and with it. It has been established that with using the “Changing the train crossing or overtaking points at a railroad section” dispatcher method, total delays in awaiting service are on average reduced by 60 % when compared to the case when the technique was not used. During the evaluation of economic effectiveness of implementing the “Changing the train crossing or overtaking points at a railroad section” dispatcher control technique it was established that the economy

of operational costs resulting from its implementation for independent participants in the carriage may constitute from 1 to 426 million rubles annually. **Practical importance:** The results of the research will aid in improving the effectiveness of dispatcher control of rail track operation.

Dispatcher control, effectiveness, simulation modeling.

Введение

Диспетчерское руководство является основным элементом системы оперативного управления эксплуатационной работой железных дорог.

В условиях внедрения принципов рыночной экономики и реализации структурной реформы диспетчерские коллективы продолжают активно применять различные оперативные регулировочные меры для бесперебойного продвижения поездов по участкам и станциям, эффективного использования вагонов, локомотивов и локомотивных бригад, инфраструктуры железных дорог [1–3].

К настоящему времени явно недостаточно исследований и методических разработок, которые позволяли бы оценить эффективность применяемых диспетчерских регулировочных приемов на участках, узлах и сортировочных станциях с учетом специфики их работы и развитости инфраструктуры [4, 5].

В данной статье методом имитационного моделирования обоснована эффективность реализации диспетчерского приема «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на участке» [6,7] на однопутном участке. При моделировании учтена неравномерность поступления поездов с внешней сети, для чего используются методы теории вероятностей.

Формализованное представление реализации в имитационной модели регулировочного приема «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на участке»

Потребность в рассмотрении необходимости, возможности и выгоды (с точ-

ки зрения повышения участковой скорости движения всех взаимосвязанных поездов) изменения схемы и (или) пункта скрещения или обгона возникает в случае отклонения в движении хотя бы одного поезда перед станцией скрещения на 1–2 мин от графического расписания.

В этом случае возможны два варианта работы:

- диспетчер либо продолжает работу с сохранением установленных графиком пунктов скрещения или обгона;
- либо осуществляет оперативные мероприятия по их изменению.

В результате регулировочных мер должны быть выполнены заданные размеры движения, время подвода поездов к участковым и сортировочным станциям, а также к станциям массовой погрузки и выгрузки, достигаться максимально возможная участковая скорость движения грузовых поездов и другие показатели действующего графика.

Формализованное представление реализации в имитационной модели регулировочного приема «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на участке» дано на рис. 1.

Имитационное моделирование

В результате экспериментов с имитационной моделью определены суммарные и средние суммарные задержки в ожидании обслуживания в течение первого месяца без применения приема «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на участке» и с его использованием. На рис. 2 представлены графики изменения этих задержек.

Из рис. 2 следует, что межоперационные простои в течение месяца имеют значительные

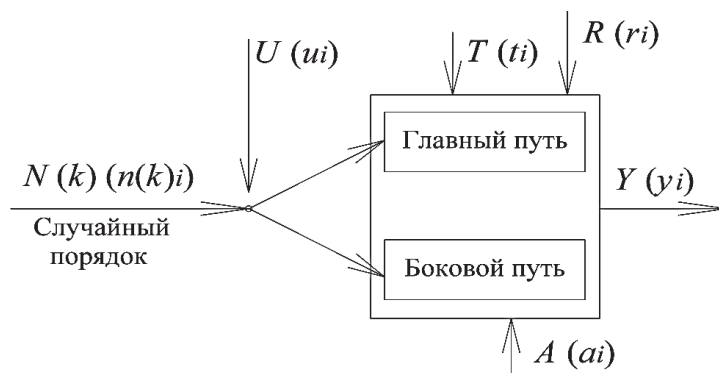


Рис. 1. Формализованное представление реализации в имитационной модели регулировочного приема «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на участке»: $N(k)(n(k)i)$ – входящий поток поездов, состоящий из k категорий, который характеризуется неравномерностью внутри года, месяца и суток; $T(t_i)$ – продолжительность операций, производимых с входным потоком поездов; $R(r_i)$ – ресурсы транспортной системы; $Y(y_i)$ – отклики модели; $A(a_i)$ – случайный компонент в технологии работы; $U(u_i)$ – управляющее воздействие [8–11]

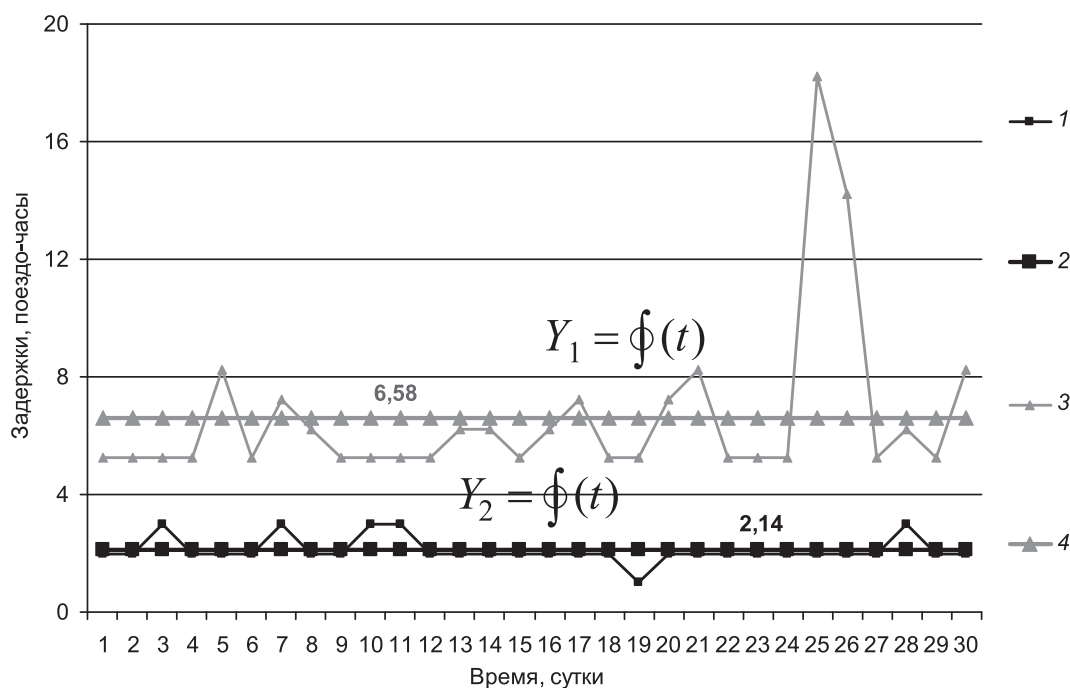


Рис. 2. Графики суммарных (1, 3) и средних суммарных (2, 4) задержек в ожидании обслуживания в течение первого месяца без применения приема «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на участке» (3, 4) и с его использованием (1, 2)

колебания, а средние суммарные задержки в ожидании обслуживания с применением диспетчерского приема (2,14 поезд-часа) ниже задержек без его применения (6,58 поезд-часа).

В результате дальнейших экспериментов с моделью определены суммарные задержки

в ожидании обслуживания за каждые сутки в течение года без применения приема «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на участке» и с его использованием. На рис. 3 представлены графики изменения этих задержек.

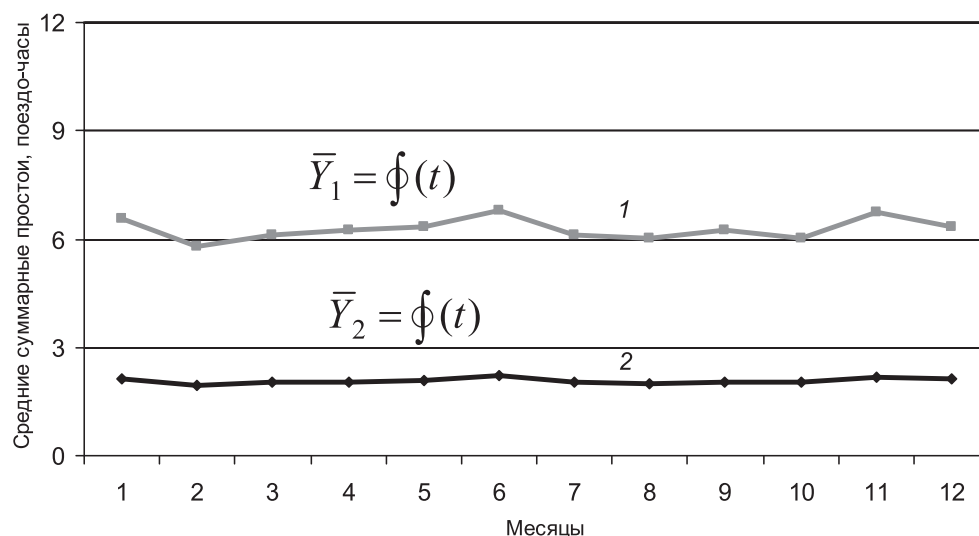


Рис. 3. Графики изменения средних суммарных задержек в ожидании обслуживания в течение года без применения приема «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на участке» (1) и с его использованием (2)

На рис. 3 видно, что благодаря применению диспетчерского приема суммарные задержки в ожидании обслуживания меньше в среднем на 60 %, чем без его использования.

Оценка экономической эффективности реализации приема диспетчерского регулирования «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на участке»

Целесообразность изменения схемы и пунктов скрещения или обгона поездов можно оценить через дополнительные эксплуатационные расходы, возникающие вследствие простоев составов в ожидании обгоняемых либо составов под скрещение, по причине сохранения установленных пунктов скрещения или обгона вместо их оптимизации по критерию «минимум (суммарный) задержек поездов при скрещении или обгоне» [12].

Оценка экономии эксплуатационных расходов от реализации регулировочного приема [13–15] в годовом исчислении для независимых участников перевозки (владельца инфраструктуры – ОАО «РЖД», оператора подвижного состава, грузовладельца) может

быть определена по приведенным ниже формулам соответственно.

Для ОАО «РЖД» экономия эксплуатационных расходов за счет сокращения простоя вагонов за год определена по формуле, тыс. руб.:

$$\Theta_{\text{в-ч}} = m \cdot \Delta Y \cdot e_{\text{в-ч}} \cdot 365 \cdot 10^{-3},$$

где m – количество вагонов в составе; ΔY – суточное сокращение времени на обработку поездов на станции, поездоч-ч; $e_{\text{в-ч}}$ – расходная ставка на 1 ваг. -ч, руб.:

$$\begin{aligned} \Theta_{\text{в-ч}} &= 71 \cdot 4,44 \cdot 11,68 \cdot 365 \cdot 10^{-3} = \\ &= 1343,93 \text{ тыс. руб.} \end{aligned}$$

Для оператора подвижного состава экономия эксплуатационных расходов за счет ускорения оборота собственных вагонов оператора за год определена по формуле, тыс. руб.:

$$\Theta_{\text{об.ваг}} = e_{\text{пн}}^y \cdot m \cdot \Delta Y \cdot 365 \cdot 10^{-3},$$

где m – количество вагонов в составе; ΔY – суточное сокращение времени на обработку поездов на станции, поездоч-ч; $e_{\text{пн}}^y$ – приведенная

стоимость 1 вагоно-часа простоя условного вагона:

$$\Theta_{\text{пто}} = 18,64 \cdot 71 \cdot 4,44 \cdot 365 \cdot 10^{-3} = 2144,76 \text{ тыс. руб.}$$

Для грузовладельца эффект от ускорения доставки грузов за год рассчитан по формуле, тыс. руб.:

$$\Theta_{\Delta t_{\text{гр}}} = \left[\Pi_{\text{гр}}^{\text{пр}} \cdot P_{\text{ст}} \cdot \Delta Y \cdot m \cdot \varepsilon_{\text{гр}} \cdot \frac{1}{24} \right] \cdot 365 \cdot 10^{-3},$$

где $\Pi_{\text{гр}}^{\text{пр}}$ – средняя цена 1 т груза при нахождении на грузовых станциях, руб.; $P_{\text{ст}}$ – статическая нагрузка вагона, т; ΔY – суточное сокращение времени на обработку поездов на станции, поезд-ч; m – количество вагонов в составе; $\varepsilon_{\text{гр}}$ – доля времени простоя вагона на грузовой станции в груженом состоянии:

$$\Theta_{\Delta t_{\text{гр}}} = [10221 \cdot 17,4 \cdot 4,44 \cdot 71 \cdot 0,5 \cdot 1/24] \times 365 \cdot 10^{-3} = 426319,88 \text{ тыс. руб.}$$

Заключение

В настоящей статье обоснована эффективность реализации диспетчерского приема «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на участке» с использованием имитационного моделирования.

В результате экспериментов с моделью установлено, что благодаря применению диспетчерского воздействия «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на участке» суммарные задержки в ожидании обслуживания меньше в среднем на 60 %, чем без его использования.

Оценка экономической эффективности реализации приема диспетчерского регулирования «Изменение пунктов скрещения или обгона грузовых поездов на участке» показала, что экономия эксплуатационных расходов в результате его применения для независимых участников перевозки может составить от 1 до 426 млн руб./год.

Библиографический список

1. Ефименко Ю. И. Железные дороги. Общий курс / Ю. И. Ефименко, В. И. Ковалёв, С. И. Логинов ; под ред. Ю. И. Ефименко. – СПб. : ПГУПС, 2013. – 503 с.
2. Грошев Г. М. Регулирование эксплуатационной работы железных дорог в современных условиях : учеб. пособие / Г. М. Грошев, А. Г. Котенко, А. В. Гоголева, И. В. Кашицкий, Н. В. Климова, А. Р. Норбоев, Ант. В. Сугоровский. – СПб. : ПГУПС, 2013. – 71 с.
3. Campagna A. The Rail and Road Freight Transport in the Co-Modality Approach / A. Campagna // Proc. of the Workshop on Multimodal Transport and ICT: Result and Recommendations. INTERREG IIC Project Port-Net. – 2006. – P. 78–86.
4. Сугоровский Ан. В. Обоснование целесообразности применения методов и приемов организации работы с вагонопотоком на сортировочной станции / Ан. В. Сугоровский // Изв. ПГУПС. – 2013. – Вып. 2 (35). – С. 74–81.
5. Сугоровский А. В. Развитие информационных технологий для повышения эффективности регулирования вагонопотоком / А. В. Сугоровский // Транспортные системы и технологии. – 2015. – № 2(2). – С. 26–37.
6. Galvez-Fernandez Verteilte C. Ansatz zur Lösungszeitabhängige Probleme der multimodalen Verkehrsnetze / C. Galvez-Fernandez, D. Khadraoui, H. Ayed, Z. Habbas, E. Alba // Fortschritte in Operations Research. – Hindawi: Hindawi Publishing Corporation, 2009. – 15 p.
7. Грошев Г. М. Имитационное моделирование оперативного регулирования на сортировочной станции / Грошев Г. М., Сугоровский А. В. // Вестник транспорта Поволжья. – 2013. – № 6 (42). – С. 10–15.
8. Сугоровский А. В. Подготовка исходных данных для ввода в имитационную модель функционирования пассажирской технической станции / А. В. Сугоровский // Изв. ПГУПС. – 2010. – Вып. 1. – С. 11–21.
9. Сугоровский А. В. Методы рационализации работы с вагонопотоком на сортировочной станции / А. В. Сугоровский // Вестник транспорта Поволжья. – 2013. – № 3 (39). – С. 44–53.

10. Ioannou Petros A. Intelligent freight transportation / Petros A. Ioannou. – Boca Raton Florida (USA): CRC Press Publ., 2008. – 342 p.

11. Brands T. Multimodal network design and assessment / T. Brands // 11th TRAIL Congress research. – November 2010. – P. 1–5.

12. Грошев Г. М. Диспетчерское регулирование на сортировочной станции / Г. М. Грошев, А. Г. Котенко, Ан. В. Сугоровский, М. М. Магомедов // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 2. – С. 47–54.

13. Грошев Г. М. Выбор способа доставки контейнеров между тыловым логистическим терминалом и морским торговым портом / Г. М. Грошев, В. Л. Белозеров, Н. В. Климова // Изв. ПГУПС. – 2015. – Вып. 2 (35). – С. 117–122.

14. Белозеров В. Л. Использование прогрессивных форм транспортных услуг при организации работы припортовой станции / В. Л. Белозеров, Г. М. Грошев, В. И. Ковалев, Н. В. Климова // Изв. ПГУПС. – 2013. – Вып. 2 (35). – С. 31–43.

15. Гапанович В. А. Системы автоматизации и информационные технологии управления перевозками на железных дорогах: учебник для вузов ж.-д. транспорта / В. А. Гапанович, А. А. Грачев и др. ; под ред. В. И. Ковалева, А. Т. Осьминина, Г. М. Грошева. – М. : Маршрут, 2006. – 544 с.

References

1. Efimenko Ju. I., Kovaljov V. I. & Loginov S. I. *Zheleznnye dorogi [Railroads]*. Basic course. Ed. by Ju. I. Efimenko. Sankt Peterburg, PGUPS Publ., 2013, 503 p. (In Russian)

2. Groshev G. M., Kotenko A. G., Gogoleva A. V., Kashitskij I. V., Klimova N. V., Norboev A. R. & Sugorovskij Ant. V. *Regulirovanie jekspluatatsionnoj raboty zheleznnykh dorog v sovremennykh usloviyakh [Controlling the field operation of railroads in a current setting]*. Sankt Peterburg, PGUPS Publ., 2013, 71 p. (In Russian)

3. Campagna A. The Rail and Road Freight Transport in the Co-Modality Approach. *Proc. of the Workshop on Multimodal Transport and ICT. Result and Recommendations*. INTERREGIIICProjectPort-Net, 2006, pp. 78–86.

4. Sugorovskij An. V. Obosnovanie tselesoobraznosti primeneniya metodov i priyomov organizatsii

raboty s vagonopotokom na sortirovochnoj stantsii. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [The St. Petersburg Transport University Bulletin]*, Sankt Peterburg, PGUPS Publ., 2013, issue 2 (35), pp. 74–81. (In Russian)

5. Sugorovskij A. V. Razvitiye informatsionnykh tekhnologiy dlya povysheniya jeffektivnosti regulirovaniya vagonopotokom [Developing information technologies for increasing the effectiveness of controlling the train car traffic volume]. *Transportnye sistemy i tekhnologii [Transport systems and technologies]*, 2015, no. 2 (2), pp. 26–37. (In Russian)

6. Galvez-Fernandez C., Khadraoui D., Ayed H., Habbas Z., Alba E. Ansatz zur Lösungszeitabhängige Probleme der multimodalen Verkehrsnetze. *Fortschritte in Operations Research*. Hindawi, Hindawi Publ. Corp., 2009, 15 p.

7. Groshev G. M. & Sugorovskij A. V. Imitatsionnoe modelirovanie operativnogo regulirovaniya na sortirovochnoj stantsii [Simulation modeling of dispatching control at a railway yard]. *Vestnik transporta Povolzh'ya [The Volga region transport bulletin]*, 2013, no. 6 (42), pp. 10–15. (In Russian)

8. Sugorovskij A. V. Podgotovka iskhodnykh dannykh dlya vvoda v imitatsionnuju model' funktsionirovaniya passazhirskoj tekhnicheskoy stantsii [Preparing input data for the simulation model of holding sidings functioning]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [The St. Petersburg Transport University Bulletin]*. Saint Peterburg, PGUPS Publ., 2010, issue 1, pp. 11–21. (In Russian)

9. Sugorovskij A. V. Metody ratsionalizatsii raboty s vagonopotokom na sortirovochnoj stantsii [Methods for streamlining work with traffic at a railway yard]. *Vestnik transporta Povolzh'ya [The Volga region transport bulletin]*, 2013, no. 3 (39), pp. 44–53. (In Russian)

10. Ioannou Petros A. *Intelligent freight transportation*. Boca Ration Florida (USA), CRC Press Publ., 2008, 342 p.

11. Brands T. Multimodal network design and assessment. *11th TRAIL Congress research*, 2010, pp. 1–5.

12. Groshev G. M., Kotenko A. G., Sugorovskij An. V. & Magomedov M. M. Dispetcherskoe regulirovanie na sortirovochnoj stantsii [Dispatcher controls at a railway yard]. *Zheleznodorozhnyj transport [Rail Transport]*, 2016, no. 2, pp. 47–54. (In Russian)

13. Groshev G. M., Belozerov V. L. & Klimova N. V. Vybor sposoba dostavki kontejnerov metodu tylovym logisticheskim terminalom i morskim trgovym portom [Selecting the container delivery method for between a back-end logistics terminal and commercial sea port]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [The St. Petersburg Transport University Bulletin]. Sankt Peterburg, PGUPS Publ., 2015, issue 2, pp. 117–122. (In Russian)
14. Belozerov V. L., Groshev G. M., Kovalev V. I. & Klimova N. V. Ispol'zovanie progressivnykh form transportnykh uslug pri organizatsii raboty priportovoj stantsii [The use of progressive forms of transport services in organizing operation of a port railway station]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [The St. Petersburg Transport University Bulletin]. Sankt Peterburg, PGUPS Publ., 2013, issue 2 (35), pp. 31–43. (In Russian)
15. Gapanovich V. A., Grachev A. A. et al. *Sistemy avtomatizatsii i informatsionnye tekhnologii upravleniya perevozkami na zheleznnykh dorogakh* [Automation systems and information technologies for managing railway transportation]: college textbook. Eds: V. I. Kovaleva, A. T. Os'minina, G. M. Grosheva. Moscow, Marshrut Publ., 2006, 544 p. (In Russian)

ГРОШЕВ Геннадий Максимович – доктор техн. наук, профессор, spbgroshev@gmail.com; ЕФИМЕНКО Юрий Иванович – доктор техн. наук, профессор, zdsu@pgups.ru; СУГОРОВСКИЙ Артем Васильевич – канд. техн. наук, старший преподаватель, c123945@yandex.ru; СУГОРОВСКИЙ Антон Васильевич – канд. техн. наук, gthdsq555@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 338.001.36

Е. П. Дудкин, С. В. Коланьков, Н. Н. Султанов**МЕТОДИКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ
ВЫБОРА КОНСТРУКЦИИ ТРАМВАЙНЫХ ПУТЕЙ**

Дата поступления: 04.05.2016

Решение о публикации: 16.12.2016

Цель: Разработка методики технико-экономического обоснования конструкций трамвайных путей, учитывающей особенности эксплуатации трамвая в городских условиях. **Методы:** За основу принята существующая методика выбора конструкции железнодорожного пути ОАО РЖД. Строительство путей в городе накладывает ряд особенностей: необходимость оперативного выполнения работ (в силу дискомфорта расположенных вблизи жилых объектов), остановку или ограничение движения автотранспорта, а также потерю выручки эксплуатирующей организации при вынужденном перерыве движения трамвая на данном маршруте. **Результаты:** Так как инвестором в ремонте и строительстве трамвайной линии, как правило, выступает городской бюджет, то данный проект не считается коммерческим, но имеет огромное социальное значение, поэтому необходимо проанализировать различные варианты конструкций трамвайных путей и выявить наиболее экономически эффективный на длительную перспективу. Методика позволяет отследить затраты, необходимые на эксплуатацию и ремонт, за весь жизненный цикл любой конструкции. **Практическая значимость:** Анализируя затраты на содержание конструкций, можно определить наиболее рациональный срок их эксплуатации и установить сферы их применения.

Конструкция трамвайных путей, методика технико-экономического обоснования, капитальные затраты, текущее содержание, жизненный цикл.

***Evgenij P. Dudkin**, D. Eng., professor, head of chair, kpgt@pgups.edu; **Sergej V. Kolan'kov**, D. Econ., associate professor, kolankov@mail.ru; **Nariman N. Sultanov**, Cand. Eng., 79046117746@yandex.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) **METHOD FOR TECHNICAL AND ECONOMIC SUBSTANTIATION OF TRAMLINE DESIGN SELECTION**

Objective: Develop a method for technical and economic substantiation of tramline design, with account for tram operation in an urban setting. **Methods:** The current OAO RZD rail track selection method was taken as the basis for the research. The construction of rail tracks in the city imposes certain limitations: the necessity for timely completion of the work (due to the inconvenience imposed upon adjacent residential sites), stopping or restricting vehicular traffic as well as loss of profits by the operating company during the forced interruption of tram operation on the particular route. **Results:** Since the investments for maintenance and construction of tram lines usually come from the municipal budget, this project is not considered commercial but is of vast social importance; therefore it is important to analyze various options of tram line designs and select the one that is the most economically viable in the long term. The method allows to trace the necessary operational and maintenance costs throughout the life-cycle of any part or design. **Practical importance:** By analyzing the operating costs of a particular structure, one can determine its optimum term of operation and establish its implementation areas.

Tram line structure, technical and economic substantiation method, capital cost, upkeep, life cycle.

Введение

Современные конструкции трамвайных путей весьма разнообразны: на шпальном, монолитном и плитном основаниях, с применением железнодорожных, трамвайных и бесшпальных рельсов [1–6]. Сметная стоимость строительства бесшпальных конструкций может превышать шпальные в 1,5–2 раза, вследствие чего необходимо технико-экономическое обоснование таких конструкций в зависимости от планируемого срока их эксплуатации, с учетом строительных, эксплуатационных и экономических показателей [7–9].

В настоящее время при выборе наиболее эффективного варианта технологии реконструкции, модернизации или капитального ремонта либо продолжает применяться методика оценки приведенных затрат (ПЗ), являющихся суммой капитальных вложений (К) и эксплуатационных затрат, либо используют методические рекомендации [10], в основном ориентирующиеся на вероятность получения какого-либо дохода за определенный период времени.

Расчет величины ПЗ выполняется в двух модификациях.

При применении первой модификации, которую можно назвать аннуитетной, результат расчетов имеет размерность «руб./год» и выбор лучшего варианта осуществляется по минимуму совокупных годовых затрат, которые считаются равными по годам и тем самым образуют так называемый аннуитет (от лат. *анну* – год). С одной стороны, здесь не требуется определять продолжительность расчетного периода, с другой – непонятно, какое значение норматива эффективности (E) следует использовать в расчетах.

Вторая модификация метода ПЗ предполагает приведение в сопоставимый вид с величиной K годовых эксплуатационных затрат и затрат на содержание постоянных устройств пути, которая умножается на продолжительность расчетного периода. В этом случае ПЗ имеют единицу измерения «руб.» и выбор лучшего варианта технологии реконструкции,

модернизации или капитального ремонта производится по минимуму суммы единовременных затрат и совокупных эксплуатационных затрат, которые понесет собственник объекта в течение расчетного периода.

Обращает на себя внимание, что при применении ПЗ в расчет принимаются только затраты, а возможные доходы не учитываются. По существу расчеты ПЗ отвечают на вопрос, что лучше: осуществить большие капитальные вложения и за счет этого в дальнейшем сэкономить на эксплуатационных расходах или, наоборот, меньше потратить в начале на капитальные вложения, но затем иметь повышенные эксплуатационные расходы.

Другими словами, областью применения метода ПЗ является оценка только так называемой сравнительной эффективности, т. е. выбор лучшего варианта из ряда альтернатив, в предположении, что каждый из рассматриваемых вариантов позволяет получить некий функциональный эффект. Данная методика не предназначена для оценки абсолютной экономической эффективности, т. е. не позволяет установить, является ли даже лучший вариант экономически эффективным (прибыльным), а если да, то насколько. Для ответа на эти вопросы необходимо использовать показатели чистого дисконтированного дохода, внутренней нормы доходности, срока окупаемости, индекса доходности или другие, рекомендованные в [10].

Показатели эффективности инвестиционных проектов

В настоящее время эффективность инвестиционных проектов рекомендуется определять при применении ряда показателей и критериев [10–12]. Когда оценивается эффективность коммерческих проектов, наиболее подходящими можно считать следующие показатели:

- чистый доход (ЧД, *net value*);
- чистый дисконтированный доход (ЧДД, *net present value*);
- внутренняя норма доходности (ВНД, *internal rate of return*);

– потребность в дополнительном финансировании (другие названия – ПФ, стоимость проекта, капитал риска);

– индексы доходности затрат и инвестиций (ИД, profitability index).

Данные показатели позволяют ответить на вопросы о том, сколько можно будет заработать при реализации оцениваемого проекта, какова рентабельность инвестиций, на сколько доходы от проекта превысят расходы инвестора.

Вместе с тем существуют проекты, реализация которых не предполагает получение чистой доходности. К таким проектам можно прежде всего отнести те, которые реализуются органами государственного управления, в частности для развития инфраструктуры, или частными инвесторами на условиях благотворительности.

В этих случаях целесообразно использовать показатель – срок окупаемости ($T_{ок}$, payback period) или, при выборе наиболее экономичного варианта капитальных вложений, т. е. при определении сравнительной эффективности, применять показатель ПЗ.

Поскольку строительство, капитальный ремонт и текущее содержание трамвайных путей дотируются (субсидируются) за счет бюджетных средств, нет оснований считать данные операции коммерческим проектом. Эффект проявляется главным образом в увеличении срока службы трамвайных путей, а также в некотором изменении годовых эксплуатационных расходов и потерь выручки от перевозочного процесса в течение продолжительности строительного периода [10]. Таким образом, при обосновании конструкции трамвайных путей в качестве основного показателя следует принять срок окупаемости, а для его определения использовать модифицированную методику расчета ПЗ. При этом можно отметить, что в соответствии с методическими рекомендациями [10] срок окупаемости может рассчитываться как с учетом дисконтирования, так и без него (так называемый простой срок окупаемости).

По нашему мнению, методически более верным было бы использование простого

срока окупаемости, что объясняется следующими соображениями.

При проведении процедуры дисконтирования предполагается, что некоторая часть получаемого чистого эффекта будет направляться на возврат капитальных вложений, а часть, в размере нормы дисконта, – формировать ЧД. Следовательно, при использовании процедуры дисконтирования на возврат капитальных вложений будет направляться ежегодно меньшая величина получаемого эффекта по сравнению с расчетом простого срока окупаемости. Поэтому срок окупаемости всегда больше простого срока окупаемости, что можно пояснить на следующем примере. Предположим, что были осуществлены капитальные вложения в размере 1000 ден. ед. Предполагается, что чистый эффект (доход) будет одинаков по годам и равен 250 ден. ед./год. Если рассчитать простой срок окупаемости, то он равен $T_{ок} = 1000/250 = 4$ года.

В то же время, если принять, что ставка дисконта установлена в размере $E = 19\%$ годовых при ежегодном учете и продолжительности расчетного периода 17 лет, величина дохода на капитал составит 50 ден. ед./год. Тем самым на возврат капитальных вложений ежегодно будет направляться $250 - 50 = 200$ ден. ед./год, и срок окупаемости с учетом дисконтирования $T_{ок} = 1000/250 = 5$ лет.

По нашему мнению, выдвигать предположение о том, что до достижения точки окупаемости инвестиций часть получаемого эффекта инвестор будет рассматривать в качестве прибыли (ЧД) не обосновано, так как до тех пор, пока полностью не окупилась произведенная затраты, какую-то часть поступающих средств прибылью никто считать не будет. О какой прибыли можно вести речь, если еще не все средства, затраченные на реализацию проекта, возвращены?

Предлагаемая методика технико-экономического обоснования

При разработке методики были учтены следующие характеристики, определяемые

конструктивными особенностями того или иного варианта трамвайных путей:

- строительные – время монтажа, надежность и простота крепления рельса к основанию, промышленные методы, механизация и автоматизация, независимость качества строительных и ремонтных работ от сезонности и температуры;

- эксплуатационные – увеличение срока службы, уменьшение эксплуатационных затрат, механизация и автоматизация текущего содержания и ремонта;

- экономические – затраты на строительство и эксплуатацию конструкции (повышение производительности и снижение трудозатрат).

Критериями эффективности новой конструкции трамвайного пути являются такие соотношения:

1) при сравнении m -го числа вариантов: $C_c^T \rightarrow \min$;

2) при парном сравнении вариантов: $C_c^1 - C_c^2 < 0$, что делает эффективным 1-й из рассматриваемых вариантов;

3) при определении простого срока окупаемости ($T_{ок}^{min}$) критерием выступает ЧД [10], который с этого момента времени становится и в дальнейшем остается неотрицательным:

$$ЧД = \begin{cases} < 0, & t \in [0, T_{ок}^{min}), \\ \geq 0, & t \geq T_{ок}^{min}, \end{cases}$$

где C_c^m , C_c^1 , C_c^2 – суммарные затраты (капитальных вложений и эксплуатационных расходов) по m -му, 1-му и 2-му вариантам конструкций пути; t – время с момента вложения инвестиций.

Обоснование простого срока окупаемости предлагается выполнять с учетом максимальной продолжительности жизненного цикла сравниваемых конструкций. Максимальный срок службы конструкций – 50 лет – принят по данным зарубежных исследований для конструкции на сплошном бетонном основании (основание служит 50 лет, через 25 лет производится замена рельсов) [13]. Эффект

от применения новой конструкции трамвайного пути заключается в увеличении сроков его службы и изменении годовых эксплуатационных расходов по его содержанию [2, 3, 7, 11, 12, 14–16].

Расчет суммарных затрат за 50 лет службы конструкций трамвайных путей может быть выполнен по следующим формулам:

на бесшпальном основании:

$$C_c^{бш} = C_{п} + E_{т.с} \cdot T_1 + C_{с.р} + E_{т.с} \cdot T_2, \quad (1)$$

на шпальном основании:

$$C_c^{ш} = C_{п} + E_{т.с} \cdot T_1 + C'_{п} + E_{т.с} \cdot T_2 + C'_{п} + E_{т.с} (50 - T_1 - T_2). \quad (2)$$

В (1), (2) $C_{п}$ – удельные капитальные вложения при строительстве, руб./км:

$$C_{п} = C_{см} + C_{уп},$$

где $C_{см}$ – сметная стоимость строительства 1 км путей, руб.; $C_{уп}$ – потери эксплуатирующей организацией при строительстве (ремонте), руб.:

$$C_{уп} = C_{д} \cdot t_i, \quad (3)$$

t_i – срок строительства (ремонта) i -й конструкции пути (дни); $C_{д}$ – потери дохода от перевозок эксплуатирующей организации за один день, руб./день; $E_{т.с}$ – расходы на текущее содержание 1 км конструкции в год, руб./км-год; T_1 – время до первого ремонта или смены рельсов, годы; T_2 – время от первого до второго ремонта (или от смены рельсов до окончания срока службы), годы; $C_{с.р}$ – удельные затраты при смене рельсов, руб./км:

$$C_{с.р} = C_{см.с.р} + C_{уп} - K_{в} \cdot \alpha_t, \quad (4)$$

$C_{см.с.р}$ – сметная стоимость смены рельсов, руб./км; $C_{уп}$ – потери эксплуатирующей организации, возникающие в период замены рельсов (находятся по формуле (3)), руб./км; $K_{в}$ – возвратная стоимость материалов 1 км

верхнего строения пути, руб./км, которая определяется как

$$K_B = 2000 \cdot P_p \cdot 0,8 \cdot \Pi_m (1 - P_m), \quad (5)$$

P_p – погонная масса рельсов, кг/м; 2000 – коэффициент, учитывающий протяженность двух ниток пути длиной 1 км; 0,8 – коэффициент, учитывающий износ рельсов на 20 % к моменту их сдачи в металлолом; Π_m – цена 1 кг металлолома (без НДС), руб./кг; P_m – расходы эксплуатирующей организации при сдаче рельсов в металлолом (с учетом НДС), руб./км; α_i – коэффициент приведения разновременных затрат

$$\alpha_i = \frac{1}{(1 + E)^i},$$

в данном случае можно принять $\alpha_i = 1$, поскольку рассчитывается простой срок окупаемости; C'_Π – удельные затраты при ремонте, руб./км:

$$C'_\Pi = C_p + C_{yp} - K_B, \quad (6)$$

где C_p – сметная стоимость ремонта, руб./км.

Пример суммирования (накапливания) текущего ЧД показан на рис. 1, где $T_{c.o}$ – срок окупаемости дополнительных капитальных вложений в конструкцию трамвайного пути на монолитном основании.

Порядок расчета стоимости жизненного цикла конструкции трамвайного пути следующий:

1) обосновывается максимальный срок службы конструкции (из всех рассматриваемых) – $T_{общ}$ (годы). Срок службы конструкций на бесшпальном основании составляет 50 лет (принят по данным зарубежных исследователей для бетонного основания), при условии сплошной смены рельсов через 25 лет эксплуатации ($T_{1,2} = 25$ лет);

2) определяются межремонтные интервалы (периодичность выполнения ремонтов) – T (годы). Для шпальной конструкции данный интервал варьируется в зависимости от кон-

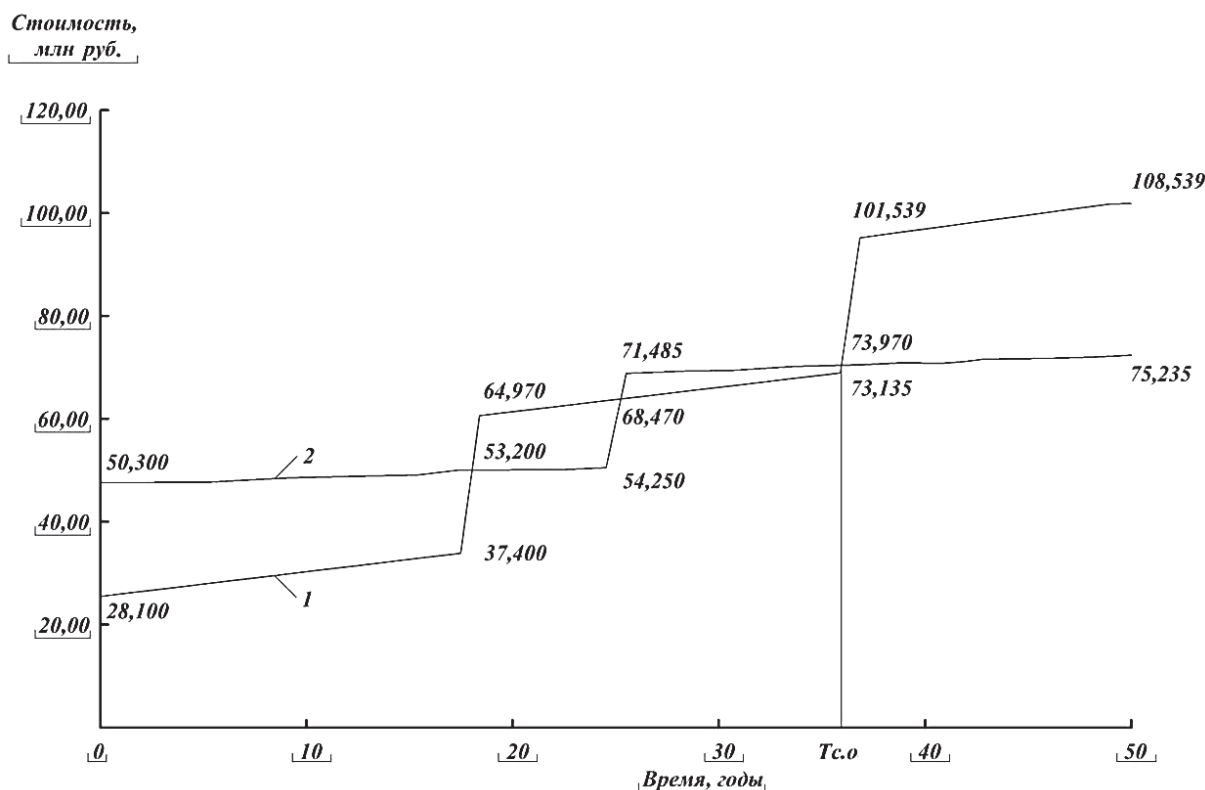


Рис. 1. Срок окупаемости конструкции трамвайного пути на шпальном (1) и монолитном (2) основании

струкции верхнего строения пути, эксплуатируемого подвижного состава, грузонапряженности и т. д.;

3) рассчитывается стоимость текущего содержания 1 км конструкции трамвайного пути – $E_{т.с}$ (млн руб./год);

4) находится, на основании графиков строительства (ремонта, смены рельсов) 1 км конструкции трамвайного пути, время строительства (ремонта или смены рельсов);

5) вычисляются показатели, используемые в формулах (3)–(6);

6) определяются суммарные затраты за рассматриваемый период (при условии, что коэффициент приведения разновременных затрат равен единице), предполагается одна сплошная смена рельсов для конструкции трамвайного пути на бесшпальном основании, расчет суммарных затрат ведется по формуле (1); для конструкции на шпальном основании, где предполагаются работы по капитальному ремонту через T лет эксплуатации, – по (2).

На основании полученных результатов составляется таблица.

Оценка простого срока окупаемости может выполняться как аналитическим [10], так и графоаналитическим методом.

При расчете простого срока окупаемости ($T_{ок}$) аналитическим методом необходимо определить сальдо денежного потока на каж-

дом шаге расчета и воспользоваться выражением

$$T_{ок} = m_- + \frac{|S_{m_-}|}{|S_{m_-}| + S_{m_+}}, \quad (7)$$

где m_- – номер шага расчета, на котором сальдо накопленного потока в последний раз остается еще отрицательным; S_{m_-} – сальдо накопленного потока на шаге m_- , принимаемое в расчет по модулю, руб.; S_{m_+} – сальдо накопленного потока на шаге $m_+ 1$, т. е. на следующем шаге, когда оно (сальдо) впервые становится положительным, руб.

При использовании формулы (7) принимается, что в пределах одного шага сальдо накопленного потока меняется линейно. Второе слагаемое выражения (7) показывает дробную часть года, которая может также находиться графоаналитическим методом. Например, предположим, что на шаге 4 сальдо накопленного потока равно –2,5 млн руб., а на шаге 5 – +0,8 млн руб. В этом случае можно построить график в виде рис. 2.

Заключение

Разработанная методика технико-экономического обоснования конструкции трамвайного пути позволяет выявить наиболее эф-

Основные ценообразующие показатели, используемые при расчете простого срока окупаемости

Наименование конструкции	Сметная стоимость, $C_{см}$, млн руб.	Стоимость ремонта (смены рельсов), $C_{см.р}$, млн руб.	Стоимость текущего содержания, $E_{т.с}$, млн руб.	Срок строительства, $t_{стр. 1 км}$, дни	Срок до ремонта или смены рельсов, $t_{к.р}$ или $t_{см.р}$, год	Потери организации, $C_{уп}$, млн руб.
1	2	3	4	5	6	7
Трамвайные пути на бесшпальном основании	47,65	18	0,15	27	25	8,1
Трамвайные пути на шпальном основании	26,5	–	0,5	30	18	9,0



Рис. 2. Графоаналитический метод определения дробной части периода (срока) окупаемости (в млн руб.)

фективную конструкцию трамвайного пути в зависимости от планируемого срока эксплуатации трамвайной линии, а также учесть особенности эксплуатации и финансирования данного участка.

В методике использованы элементы расчета показателей приведенных затрат и простого срока окупаемости, что позволяет применять ее в отношении объектов капитальных вложений, не предусматривающих получения чистой прибыли.

Библиографический список

1. Харт Д. Внедрение новых конструкций безбалластного пути / Д. Харт // Железные дороги мира. – 2007. – № 2. – С. 41–43.
2. Дудкин Е. П. Городской рельсовый транспорт : инновационные конструкции трамвайного пути на выделенном полотне / Е. П. Дудкин, Ю. Г. Параскевопуло, Н. Н. Султанов, Г. Ю. Параскевопуло // Транспорт Российской Федерации. – 2013. – № 4(47). – С. 51–53.
3. Дудкин Е. П. Использование фибробетона в конструкции трамвайных путей / Е. П. Дудкин, Ю. Г. Параскевопуло, Н. Н. Султанов // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 3–4 (40–41). – С. 77–79.
4. Косой Ю. М. Рельсовый путь на городской улице : учеб. пособие для вузов / Ю. М. Косой. – Нижний Новгород : Изд-во Нижневолгоград. гос. ун-та, 1992. – 99 с.
5. Вонфельдан Р. Новые путевые структуры / Р. Вонфельдан // Железные дороги мира. – 2006. – № 9. – С. 72–73.
6. Хасманн Х. Путь на плитном основании / Х. Хасманн // Железные дороги мира. – 2006. – № 4. – С. 14–16.
7. Косой Ю. М. Экономика городского электро транспорта / Ю. М. Косой. – Нижний Новгород : Литера, 1997. – 228 с.
8. Обервайгер Г. Опыт разработки и эксплуатации безбалластного пути / Г. Обервайгер // Железные дороги мира. – 2005. – № 1. – С. 47–49.
9. Нормативно-технологический отдел по инженерным сооружениям Центра обследования и диагностики инженерных сооружений – филиала открытого акционерного общества «Российские железные дороги» (Центр ИССО ОАО «РЖД»). Технически обоснованные нормы времени на работу по текущему содержанию пути. – Изд. 7-е, откор. и доп. – 2009. – № 8-605.
10. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (Вторая ред., испр. и доп.). – Утв. Минэкономки РФ, Минфином РФ и Госстроем РФ от 21 июня 1999 г. № ВК 477). – С. 33–56.
11. Обервайгер Г. Современный уровень развития верхнего строения пути на твердом основании / Г. Обервайгер // Intern. Verkehrswesen. – 1979. – N 1. – С. 51–52.
12. Kondapalli Sunil K. Life Cycle Benefit of Concrete Slab Track / Sunil K. Kondapalli, David N. Billow. – Skokie, Illinois, USA, SN2860, Portland Cement Association, 2008. – P. 6–8.
13. Бенин А. В. Лабораторные испытания конструкции трамвайного пути на циклические нагрузки / А. В. Бенин, Е. П. Дудкин, Ю. Г. Параскевопуло, Н. Н. Султанов // Транспорт Российской Федерации. – 2014. – № 4 (53). – С. 28–30.
14. Голованов А. П. Метод конечных элементов в статике и динамике тонкостенных конструкций / А. П. Голованов, О. Н. Тюленева, А. Ф. Шигабутдинов. – М. : Физматлит, 2006. – 392 с.
15. Клепиков С. Н. Расчет конструкций на упругом основании / С. Н. Клепиков. – Киев : Будівельник, 1967. – 183 с.
16. Зурнаджи В. А. Основания, фундаменты и механика грунтов / В. А. Зурнаджи, В. В. Николаев. – М. : Высшая школа, 1967. – 416 с.

References

1. Khart D. Vnedrenie novykh konstruksij bezballastnogo puti [Introducing new ballastless line structures]. *Zheleznye dorogi mira* [World Railways], 2007, no. 2, pp. 41–43. (In Russian)
2. Dudkin E. P., Paraskhevopulo Ju. G., Sultanov N. N. & Paraskhevopulo G. Ju. Gorodskoj rel'sovyy transport: innovatsionnye konstruksii tramvajnogo puti na vydelennom polotne [Urban rail transport: innovative tram line structures at a line section]. *Transport Rossijskoj Federatsii* [Russian Federation Transport], 2013, no. 4 (47), pp. 51–53. (In Russian)
3. Dudkin E. P., Paraskhevopulo Ju. G. & Sultanov N. N. Ispol'zovanie fibrobeta v konstruksii tramvajnykh putej [Use of fibrous concrete in constructing tram lines]. *Transport Rossijskoj Federatsii* [Russian Federation Transport], 2012, no. 3–4 (40–41), pp. 77–79. (In Russian)
4. Kossoj Ju. M. *Rel'sovyy put' na gorodskoj ulitse* [Tram rail on urban streets. College textbook]. Nizhny Novgorod, State University of Nizhny Novgorod Publ., 1992, 99 p. (In Russian)
5. Vonfel'dan R. Novye putevyje struktury [New rail line structures]. *Zheleznye dorogi mira* [World Railways], 2006, no. 9, pp. 72–73. (In Russian)
6. Khasmann Kh. Put' na plitnom osnovanii [Rail line on slab foundation]. *Zheleznye dorogi mira* [World Railways], 2006, no. 4, pp. 14–16. (In Russian)
7. Kossoj Ju. M. *Jekonomika gorodskogo jelektrotransporta* [Economics of urban electric transport]. Nizhny Novgorod, Litera Publ., 1997, 228 p. (In Russian)
8. Obervajger G. Opyt razrabotki i jekspluatatsii bezballastnogo puti [Ballastless rail line development and operation practice]. *Zheleznye dorogi mira* [World Railways], 2005, no. 1, pp. 47–49. (In Russian)
9. *Normativno-tekhnologicheskij otdel po inzhenernym sooruzheniyam Tsentra obsledovaniya i diagnostiki inzhenernykh sooruzhenij – filiala otkrytogo aktsionernogo obshchestva “Rossijskie zheleznye dorogi” (Tsentr ISSO OAO “RZhD”)* [Regulatory and planning utility department, branch of Russian Railways Open Joint-Stock Company (ISSO Center of OAO Rossijskie zheleznye dorogi) “Tekhnicheski obosnovannye normy vremeni na rabotu po tekushchemu soderzhaniju puti”. Technically feasible standards of time for rail line maintenance]. Edition 7, revised and enlarged. Moscow, 2009, no. 8–605. (In Russian)
10. *Metodicheskie rekomendatsii, po otsenke jeffektivnosti investitsionnykh proektov* [Guidance notes for efficiency assessment of investment projects]. Second edition, revised and enlarged. Approved by the Russian Federation Ministry of Economics, the Russian Federation Ministry of Finances and the Russian Federation State Committee for Construction on June 21, 1999, no. VK 477, pp. 33–56. (In Russian)
11. Obervajger G. Sovremennyy uroven' razvitiya verkhнего stroeniya puti na tverdom osnovanii [State-of-the-art solid base rail superstructure]. *Intern. Verkenrswesen*, 1979, no. 1, pp. 51–52.
12. Sunil K. Kondapalli & Davin N. Billou. *Zhiznennyy tsikl besshpal'noj konstruksii zheleznodorozhnogo puti* [Life cycle of a sleeperless track]. Illinois, USA, The Portland Cement Association, 2008, pp. 6–8.
13. Benin A. V., Dudkin E. P., Paraskhevopulo Ju. G. & Sultanov N. N. Laboratornye ispytaniya konstruksii tramvajnogo puti na tsiklicheskie nagruzki [Laboratory testing of tram rail design for cyclic loads]. *Transport Rossijskoj Federatsii* [Russian Federation Transport], 2014, no. 4 (53), pp. 28–30. (In Russian)
14. Golovanov A. P., Tjuleneva O. N. & Shigabudinov A. F. *Metod konechnykh jelementov v statike i dinamike tonkostennykh konstruksij* [Finite elements method in thin-walled structures under static and dynamic conditions]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006, 392 p. (In Russian)
15. Klepikov S. N. *Raschet konstruksij na uprugom osnovanii* [Structural analysis of an elastic-foundation design]. Kiev, Budivel'nik, 1967, 183 p. (In Russian)
16. Zurnadzhi V. A. & Nikolaev V. V. *Osnovaniya, fundamenta b mexanica gruntov* [Footings, foundations and soil dynamics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967, 416 p. (In Russian)

*ДУДКИН Евгений Павлович – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, kpgt@pgups.edu; КОЛАНЬКОВ Сергей Вячеславович – доктор экон. наук, доцент, kolankov@mail.ru; СУЛТАНОВ Нариман Надимбекович – канд. техн. наук, 79046117746@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 656.073

О. Б. Маликов, Е. Г. Курилов, Д. И. Илесалиев**НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПЕРЕВОЗКИ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ В КОНТЕЙНЕРАХ**

Дата поступления: 06.10.2016

Решение о публикации: 16.12.2016

Цель: Состоит в обосновании рационального способа организации перевозок сыпучих грузов на железнодорожном транспорте. Кроме того, задачей исследования является информирование научной общественности о влиянии выбора способов перегрузки сыпучих грузов на эффективность перевозки. Внимание сосредоточено на перевозках и перегрузках тех сыпучих грузов, которые относятся к наиболее ценным грузам и представляют собой готовую продукцию основных отраслей перерабатывающей промышленности, а также товары широкого потребления. Также проанализированы существующие способы погрузки–разгрузки сыпучих грузов при перевозке в контейнерах, дана характеристика каждого способа и их значимость в организации перевозок.

Методы: Анализ и обобщение, существующие способы сбора исходной информации, методов ее обработки в обосновании эффективности перевозки сыпучих грузов в контейнерах. **Результаты:** Выявлена зависимость расходов на доставку одной тонны перевозимых грузов на объемную массу этого груза. Обоснован наиболее рациональный способ доставки сыпучих грузов в контейнере. **Практическая значимость:** Заключается в возможности снижения простоев транспортных средств за счет использования предложенных рекомендаций по выбору рациональных способов перегрузки грузов, а также в создании условий для повышения перерабатывающей способности складов сыпучих грузов.

Контейнер, мягкий контейнер «биг-бег», контейнерный вкладыш «лайнер-бег», сыпучий груз, поддон, транспортный пакет, погрузка, разгрузка, перевозка железнодорожным транспортом, объемная масса.

Oleg B. Malikov, D. Eng., professor, stadnitskey@mail.ru (Emperor Alexander I St.Petersburg State Transport Univeristy); **Evgenij G. Kurilov**, postgraduate, delet_91@mail.ru; ***Daurenbek I. Ilesaliev**, teaching fellow, ilesaliev@mail.ru (Tashkent Institute of Rail Transport Engineers) CONCERNING SOME FINANCIAL VIABILITY ISSUES OF CONTAINERIZED BULK CARGO SHIPMENT

Objective: The goal is to substantiate a sustainable way of organizing bulk cargo shipment via rail transport. Additionally, the goal of the research is to inform the scientific community about the influence the selection of bulk cargo transshipment methods has on shipment efficiency. Emphasis is laid on shipments and transshipments of bulk cargo which is classified as premium and constitute end products of the main processing industries and consumer commodities. Additionally, existing ways of loading and unloading of bulk cargo when shipped in containers, are examined, with characteristics given for each method, along with estimation of its relevance in the organization of shipments. **Methods:** Analysis and assimilation of the existing methods of gathering initial data and its processing for the purpose of substantiating efficiency of containerized bulk cargo shipment. **Results:** A relation was established between the costs for shipment of one ton of cargo and the bulk density thereof. The most rational way of containerized bulk cargo delivery was substantiated. **Practical importance:** An option was elucidated to reduce vehicle downtime by way of applying the suggested recommendations on selecting rational ways of cargo transshipment and creating conditions for increasing the estimated capacity of bulk cargo warehouses.

Container, “big bag” type soft container, “liner bag” container insert, bulk cargo, pallet, unit load, loading, unloading, rail transportation, bulk weight.

При перевозках сыпучих грузов требуются хорошо оснащенные складские системы [1–4], а также значительные капиталовложения на строительство новых и реконструкции существующих погрузочно-разгрузочных мощностей [5–9]. Контейнерные перевозки в наибольшей степени удовлетворяют требованиям грузоотправителей к качеству доставки своих грузов [10–14]. В настоящее время перевозки сыпучих грузов в контейнерах еще мало изучены. На это и направлено наше исследование.

У грузовладельцев появляется желание перевозить грузы более крупными транспортными партиями, т.е. чтобы в контейнер помещалось как можно большее количество груза в каждой транспортной партии (рис. 1).

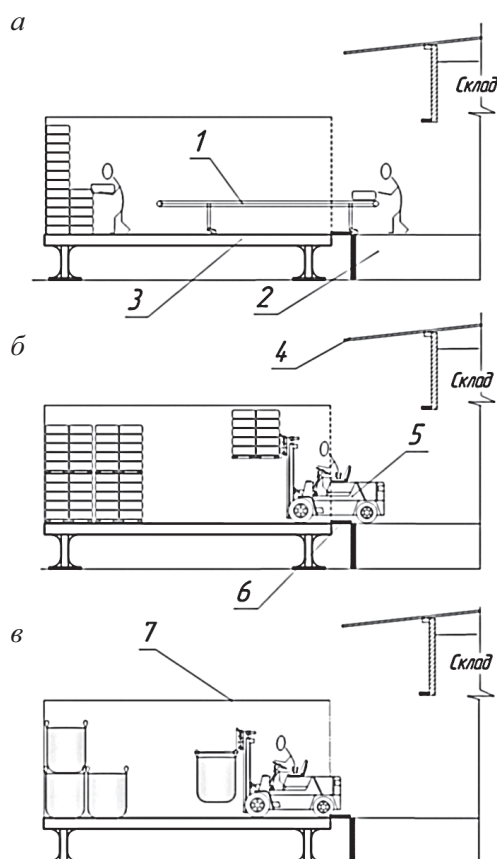


Рис. 1. Технология погрузки-разгрузки сыпучих грузов в мешках (а), транспортных пакетах (б) и в «биг-бег» (в): 1 – передвижной конвейер; 2 – грузовая рампа; 3 – опорная рампа для контейнера; 4 – навес; 5 – электропогрузчик; 6 – перегрузочный мостик; 7 – 20-футовый контейнер

Это может быть достигнуто при применении контейнерного вкладыша и заполнении максимально внутреннего объема контейнера сыпучими грузами. Правильность такого решения с экономической точки зрения достоверно может быть подтверждена (или опровергнута) расчетами экономических показателей по существующим способам перевозок сыпучих грузов в контейнерах.

Определение общей стоимости доставки 1 т сыпучих грузов в контейнере

Перевозка сыпучих грузов в контейнерах осуществляется по четырем способам (табл. 1).

Общая стоимость доставки 1 т груза может быть определена по формуле

$$C = \frac{1}{q} \cdot (C_{\text{пер}} + C_{\text{тара}} + C_{\text{пог}} + C_{\text{разг}}),$$

где q – размер транспортной партии груза, т; $C_{\text{пер}}$ – стоимость перевозки груза, руб.; $C_{\text{тара}}$ – стоимость тары и упаковки груза, руб.; $C_{\text{пог}}$ – стоимость погрузки транспортной партии груза, руб.; $C_{\text{разг}}$ – стоимость разгрузки транспортной партии груза, руб.

Стоимость простоя транспортных средств под погрузкой или выгрузкой может быть включена в стоимость соответствующих ППР, а стоимость маневровых работ будет одинакова в обоих рассматриваемых вариантах независимо от способа перевозки сыпучих грузов.

При исследовании области экономической эффективности перевозки были выполнены многочисленные расчеты стоимости перевозок (табл. 2).

Расчет контейнерной отправки железнодорожным транспортом

Стоимость перевозок грузов принималась по Тарифному руководству № 1 (Прейскуранту 10-01), часть 2 с коэффициентом индекса-

ТАБЛИЦА 1. Способы перевозки сыпучих грузов в 20-футовых контейнерах

Способ доставки		Преимущество	Недостатки
I	В мешках поштучно (рис. 1, а)	Целесообразен при малых грузопотоках; снижение расходов на закрепление грузов	Снижение производительности погрузочно-разгрузочных работ (ППР); увеличение простоев
II	В мешках, уложенных в транспортный пакет (рис. 1, б)	Повышение производительности ППР; сокращение простоев	Дополнительные расходы на поддоны; неполное использование контейнера
III	В «биг-бег» (рис. 1, в)	Повышение производительности ППР; сокращение простоев	Особые условия при перемещении с помощью погрузчика; неполное использование контейнера
IV	С применением (рис. 2)	Возможность полной загрузки контейнеров; быстрота разгрузки	Цикличность использования вкладыша зависит от запаса его прочности

ТАБЛИЦА 2. Сыпучие грузы, перевозимые в контейнере

Пищевые сыпучие грузы		Непищевые сыпучие грузы	
Наименование	Объемная масса, γ , т/м ³	Наименование	Объемная масса, γ , т/м ³
Мука	0,7	Минеральные удобрения	0,7
Рис	0,7	Нитраты	1,0
Сахар	0,75	Сера	0,84
Солод	0,67	Цемент	1,2
Соль	0,98		

ции 3,159, как было установлено с 27 октября 2012 г., по схеме № 93 – плата за перевозку каждого собственного (арендованного) груженого контейнера в собственных (арендованных) вагонах на расстояние 1000 км.

Стоимость расходов на тару и упаковку

Расходы на упаковку сыпучих грузов в мешки с вместимостью 50 кг составляют

$$C_{\text{тара}}^I = N_{\text{меш}} \cdot S_{\text{меш}} = S_{\text{меш}} \cdot \frac{q}{q_{\text{меш}}},$$

где $N_{\text{меш}}$ – необходимое количество мешков для затарки необходимой транспортной партией q ; $q_{\text{меш}}$ – вместимость тары (55×105), 50 кг; $S_{\text{меш}}$ – стоимость одного мешка, руб.

Расходы на формирование транспортного пакета

$$\begin{aligned} C_{\text{тара}}^{II} &= N_{\text{меш}} \cdot S_{\text{меш}} + N_{\text{под}} \cdot S_{\text{под}} = \\ &= S_{\text{меш}} \cdot \frac{q}{q_{\text{меш}}} + S_{\text{под}} \cdot \frac{q}{G}, \end{aligned}$$

где $N_{\text{под}}$ – необходимое количество поддонов, шт.; $S_{\text{под}}$ – стоимость поддона, руб.; G – средняя масса транспортного пакета, кг.

Расходы на упаковку сыпучих грузов в «биг-бег» с вместимостью 1000 кг

$$C_{\text{тара}}^{\text{III}} = N_{\text{биг}} \cdot S_{\text{биг}} = S_{\text{биг}} \cdot \frac{q}{q_{\text{биг}}},$$

где $N_{\text{биг}}$ – необходимое количество «биг-бег» для затарки необходимой транспортной партии q ; $q_{\text{биг}}$ – вместимость тары (75×75×150); $S_{\text{биг}}$ – стоимость одного «биг-бег», руб.

Расходы на покупку контейнерных вкладышей

$$C_{\text{тара}}^{\text{IV}} = N_{\text{вкл}} \cdot S_{\text{вкл}},$$

где $N_{\text{вкл}}$ – необходимое количество контейнерных вкладышей; $S_{\text{вкл}}$ – стоимость одного контейнерного вкладыша, руб.

Определение стоимости погрузки (или выгрузки) из контейнеров

Определение стоимости ППР производилось по методике проф. О. Б. Маликова [15]:

$$\begin{aligned} C_{\text{пог}} = & \frac{w \cdot q \cdot 3П \cdot 1,36}{T \cdot t_{\text{ППР}}} + \\ & + [S_{\text{о.р}} \cdot (\alpha_{\text{о.р}} + \beta_{\text{о.р}} + H_{\text{и}}) + \\ & + S_{\text{ЭП}} \cdot (\alpha_{\text{ЭП}} + \beta_{\text{ЭП}} + H_{\text{и}}) + \\ & + S_{\text{конв}} \cdot (\alpha_{\text{конв}} + \beta_{\text{конв}} + H_{\text{и}}) + \\ & + 1,1 \cdot B_{\text{гр}} \cdot B_{\text{о.р}} \cdot S_{\text{гр}} \cdot (\alpha_{\text{гр}} + \beta_{\text{гр}} + H_{\text{и}})] + \\ & + S_{\text{рв}} \cdot (\alpha_{\text{рв}} + \beta_{\text{рв}} + H_{\text{и}}) + \\ & + S_{\text{пм}} \cdot (\alpha_{\text{пм}} + \beta_{\text{пм}} + H_{\text{и}})] \cdot \frac{1}{365}, \end{aligned}$$

здесь w – трудоемкость погрузки (или разгрузки) 1 т груза, чел-ч/т; 3П – заработная плата рабочего в месяц, руб./месяц; 1,34 – коэффициент взносов в пенсионный фонд и фонд социального страхования; T – среднее число рабочих дней в месяце, 21 день/месяц; $t_{\text{ППР}}$ – время погрузки–разгрузки грузов из контейнера, ч; $S_{\text{о.р}}$ – стоимость опорной рампы контейнера, руб.; $\alpha_{\text{о.р},\%}$ – норма амортизационных отчислений за год на полное восстановление

и капитальный ремонт опорной рампы контейнера; $\beta_{\text{о.р}}$ – норма отчислений на текущий ремонт опорной рампы контейнера; $H_{\text{и}}$ – ставка налога на имущество (в соответствии со ст. 380 НК РФ принимаем 2,2%); $S_{\text{ЭП}}$ – стоимость электропогрузчика, руб.; $\alpha_{\text{ЭП}}$ – норма амортизационных отчислений за год на полное восстановление и капитальный ремонт электропогрузчика; $\beta_{\text{ЭП}}$ – норма отчислений на текущие ремонты электропогрузчика; $S_{\text{конв}}$ – стоимость передвижного конвейера, руб.; $\alpha_{\text{конв}}$ – норма амортизационных отчислений за год на полное восстановление и капитальный ремонт электропогрузчика; $\beta_{\text{конв}}$ – норма отчислений на текущие ремонты электропогрузчика; $B_{\text{гр}}$ – ширина крытой грузовой рампы с козырьком, 5,5 м; $B_{\text{о.р}}$ – ширина опорной рампы контейнера, 3 м; $S_{\text{гр}}$ – удельная стоимость 1 м² крытой грузовой рампы, руб.; $\alpha_{\text{гр}}$ – норма амортизационных отчислений за год на полное восстановление и капитальный ремонт грузовой рампы (в %); $\beta_{\text{гр}}$ – норма отчислений на текущие ремонты грузовой рамп; 1,1 – коэффициент, учитывающий стоимость освещения грузовой рамп; $S_{\text{р.в}}$ – стоимость раздвижных ворот из склада на рампу, с электроприводом, руб.; $\alpha_{\text{р.в}}$ – норма амортизационных отчислений за год на полное восстановление и капитальный ремонт раздвижных ворот; $\beta_{\text{р.в}}$ – норма отчислений на текущие ремонты раздвижных ворот; $S_{\text{пм}}$ – стоимость перегрузочного мостика, руб.; $\alpha_{\text{пм}}$ – норма амортизационных отчислений за год на полное восстановление и капитальный ремонт перегрузочного мостика; $\beta_{\text{пм}}$ – норма отчислений на текущий ремонт перегрузочного мостика; 365 – число дней в году.

Выполнив вычисления и преобразования, получаем

$$\begin{aligned} C_{\text{пог}}^{\text{I}} &= 581,1 \cdot w \cdot q + 262,5, \\ C_{\text{пог}}^{\text{II}} &= 996,3 \cdot w \cdot q + 492,4, \\ C_{\text{пог}}^{\text{III}} &= 863,5 \cdot w \cdot q + 492,4, \end{aligned} \quad (1)$$

где $518,1 \cdot w \cdot q$ – расходы на заработную плату при погрузке (или выгрузке) транспортной партии груза (одного контейнера), руб.; 262,5 руб./ваг. – суммарные эксплуатационные

расходы по содержанию и ремонту опорной рампы контейнера, электропогрузчика, грузовой рампы, ворот из склада на рампу, а также на перегрузочный мостик.

Трудоемкость работ w определялась по «Межотраслевым нормам времени на погрузку, разгрузку вагонов, автотранспорта и складские работы» в следующих размерах:

$w = 0,254$ чел.-ч/т – для варианта погрузки или разгрузки штучных грузов (мешки с сыпучим грузом от 50–80 кг) передвижным конвейером;

$w = 0,073$ чел.-ч/т – для варианта погрузки или разгрузки пакетированных грузов на поддонах при помощи электропогрузчика грузоподъемностью 1,5 т;

$w = 0,073$ чел.-ч/т – для варианта погрузки или разгрузки «биг-бег» электропогрузчиком грузоподъемностью 1,5 т.

При определении общей стоимости доставки грузов расходы на погрузку и разгрузку грузов принимались равными, т. е. стоимость, вычисленная по формуле (1), удваивалась.

Определение стоимости ППР проведем по IV способу (рис. 2):

$$C_{\text{пог}} = \frac{w \cdot q \cdot 3П \cdot 1,36}{T \cdot t_{\text{пог}}} + S_{\text{ок}} \cdot (\alpha_{\text{ок}} + \beta_{\text{ок}} + H_{\text{и}}) \cdot \frac{1}{365},$$

$$C_{\text{разг}} = \frac{w \cdot q \cdot 3П \cdot 1,36}{T \cdot t_{\text{разг}}} + S_{\text{ок}} \cdot (\alpha_{\text{ок}} + \beta_{\text{ок}} + H_{\text{и}}) \cdot \frac{1}{365}.$$

Выполнив вычисления и преобразования, получаем

$$C_{\text{пог}} = w \cdot q \cdot 1295,3 + 1495,$$

$$C_{\text{разг}} = w \cdot q \cdot 1523,8 + 1495, \quad (2)$$

где $t_{\text{пог}}$ – время погрузки сыпучих грузов в контейнер с применением отпускных труб (см. рис. 2, а); $t_{\text{разг}}$ – время разгрузки сыпучих грузов из контейнера самотеком в приемный бункер (см. рис. 2, б); $S_{\text{ок}}$ – стоимость

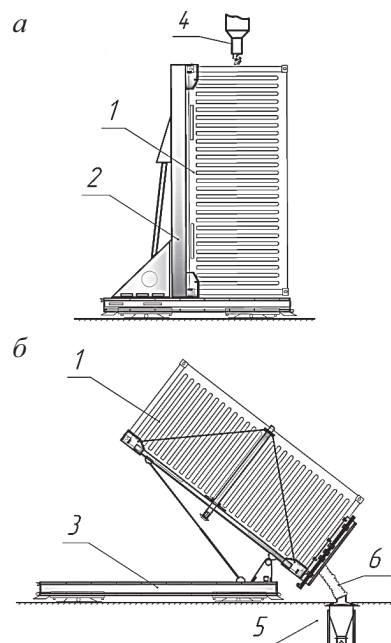


Рис. 2. Технология погрузки (а), разгрузки (б) сыпучих грузов с помощью опрокидыватель-контейнеров: 1–20-футовый контейнер; 2 – погрузочный механизм до 0–90°; 3 – разгрузочный механизм до 0–70°; 4 – питатель перегрузочного бункера; 5 – приемный бункер; 6 – выгрузочный рукав вкладыша

опрокидывателя-контейнеров, руб.; $\alpha_{\text{о.р}}$ – норма амортизационных отчислений за год на полное восстановление и капитальный ремонт опрокидыватель-контейнеров (в %); $\beta_{\text{о.р}}$ – норма отчислений на текущий ремонт опрокидыватель-контейнеров.

Трудоемкость работ w определялась по «Межотраслевым нормам времени на погрузку, разгрузку вагонов, автотранспорта и складские работы» в следующих размерах:

$w = 0,019$ чел.-ч/т – для варианта погрузки сыпучих грузов в контейнер отпускными трубами диаметром 220 мм;

$w = 0,014$ чел.-ч/т – для варианта разгрузки сыпучих грузов самотеком в приемный бункер.

При определении общей стоимости доставки сыпучих грузов расходы на погрузку и разгрузку грузов суммировались по формуле (2).

Результаты расчетов эффективности перевозок сыпучих грузов в контейнерах приведе-

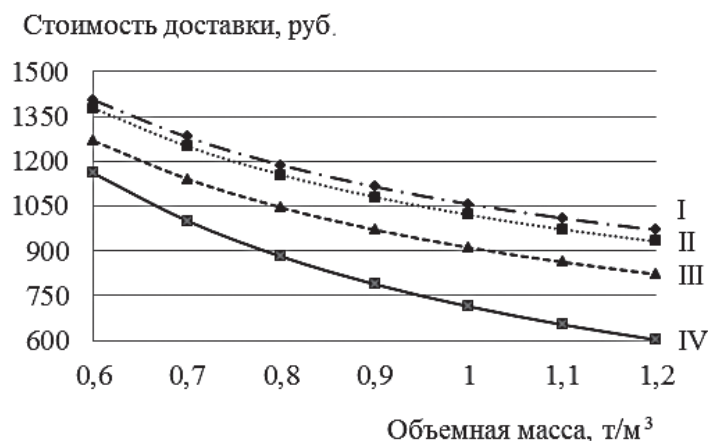


Рис. 3. Зависимость расходов от стоимости доставки 1 т объемной массы сыпучего груза по I–IV способам перевозки

ны на рис. 3. На нем видно, что общие расходы на перевозку сыпучих грузов изменяются в зависимости от объемной массы груза по принятым способам с одинаковой закономерностью. Минимальное значение их достигается при способе IV, при котором общие расходы доставки сокращаются в среднем на 200–300 руб. за 1 т перевозимого груза. Перевозка сыпучих грузов в «биг-бег» сокращает расходы всего на 100–150 руб. относительно способа I. Для достижения наибольшего экономического эффекта перевозку сыпучих грузов в контейнерах следует организовывать по способу IV.

Заключение

По результатам исследований экономической эффективности перевозок сыпучих грузов в контейнерах могут быть сделаны следующие выводы. Перевозка сыпучих грузов в контейнере по способу IV более целесообразна, так как отсутствует физическая потеря перевозимых грузов; не нужна очистка контейнера после перевозки сыпучего груза; простота механизма используемого в технологическом процессе погрузки–выгрузки; возможность временного хранения груза при перевалке на открытых площадках, что позволяет экономить средства на постройку складских помещений.

Библиографический список

1. Гомбосэд С. Определение производительности автопогрузчиков на контейнерном терминале / С. Гомбосэд, О. Б. Маликов // Вестн. транспорта Поволжья. – Самара : Самарск. гос. ун-т путей сообщения. – 2013. – Вып. 5 (41). – С. 46–52.
2. Курилов Е. Г. Развитие приграничного терминала на международном транспортном коридоре / Е. Г. Курилов // Логистика : современные тенденции развития : материалы XV Междунар. науч.-практ. конференции. 7–8 апреля 2016 г. : материалы докл. / отв. ред. В. С. Лукинский. – СПб. : ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2016. – С. 200–203.
3. Маликов О. Б. Определение себестоимости контейнеро-операции на приграничном терминале / О. Б. Маликов, С. Гомбосэд // Современные проблемы транспортного комплекса России. – Магнитогорск : Магнитогор. гос. техн. ун-т им. Г. И. Носова, 2013. – Вып. 3. – С. 91–96.
4. Панова Ю. Н. Способы пропускной способности морских контейнерных портов / Ю. Н. Панова, Е. К. Коровяковский // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщения. – Ростов-н/Д. : Ростов. гос. ун-т путей сообщения, 2012. – Вып. 2 (46). – С. 139–144.
5. Алексеев А. В. К вопросу определения рациональных конструктивных параметров гравитационных транспортирующих устройств для загрузки сыпучих грузов в транспортные средства / А. В. Алексеев // Наука и техника транспорта. – М. : Моск. гос. ун-т путей сообщения, 2012. – Вып. 3. – С. 60–67.

6. Горюшинский В. С. Совершенствование погрузочно-разгрузочных и транспортно-складских операций с твердым топливом на экипировочных пунктах станций / В. С. Горюшинский, М. П. Губарев, В. В. Шулепов // Вестн. транспорта Поволжья. – Самара : Самарск. гос. ун-т путей сообщения, 2008. – Вып. 3. – С. 40–46.

7. Илесалиев Д. И. Определение оптимальных значений параметров погрузочно-разгрузочного участка тарно-штучных грузов / Д. И. Илесалиев // Изв. ПГУПС. – 2015. – Вып. 3 (44). – С. 55–63.

8. Панова Ю. Н. Факторы строительства тыловых контейнерных терминалов / Ю. Н. Панова, Е. К. Коровяковский // Вестн. Тихоокеан. гос. ун-та. – Хабаровск : Тихоокеан. гос. ун-т, 2012. – Вып. 1. – С. 103–112.

9. Третьяков Г. М. Совершенствование грузовой работы с массовыми сыпучими грузами на железнодорожном транспорте / Г. М. Третьяков, В. В. Денисов, И. И. Кононов // Вестн. транспорта Поволжья. – Самара : Самарск. гос. ун-т путей сообщения, 2015. – Вып. 4 (52). – С. 69–74.

10. Горюшинский В. С. Межрегиональные перевозки зерновых грузов / В. С. Горюшинский, В. В. Денисов, Н. Н. Мосина // Вестн. транспорта Поволжья. – Самара : Самарск. гос. ун-т путей сообщения, 2010. – Вып. 3. – С. 104–107.

11. Резер С. Б. Модель организации управления контейнерными перевозками в логистической цепи / С. М. Резер, С. Б. Левин // Транспорт : наука, техника, управление. – 2015. – Вып. 2. – С. 3–8.

12. Лёвин С. Б. Модель управления контейнерной компанией в логистической цепи / С. Б. Левин // Мир транспорта. – 2014. – № 2 (51). – С. 46–54.

13. Роменкова В. А. Транспортировка зерна в контейнерах / В. А. Роменкова, Н. С. Ломакина // Современные наукоемкие технологии. – Пенза : Издат. Дом «Академия естествознания», 2014. – Вып. 5-1. – С. 148–150.

14. Турутин И. В. Исследование воздействия сыпучего груза на торцевую стену специализированного вагона для перевозки щепы / И. В. Турутин // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщения. – Ростов н/Д., 2009. – Вып. 4 (36). – С. 40–47.

15. Маликов О. Б. Логистика пакетных перевозок штучных грузов / О. Б. Маликов, Е. К. Кровя-

ковский, Д. И. Илесалиев // Изв. ПГУПС. – 2014. – Вып. 4 (41). – С. 51–57.

References

1. Gombosed S.& Malikov O. B. Opredelenie proizvoditel'nosti avtopogruzchikov na kontejnernom terminale [Determining forklift capacity at container terminal]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [The Volga region transport bulletin]. Samara, Samara State Transport University Publ., 2013, issue 5 (41), pp. 46–52. (In Russian)

2. Kurilov E. G. Razvitie prigranichnogo terminala na mezhdunarodnom transportnom koridore [Development of a near-border terminal in an international transportation corridor]. *Logistika: sovremennye tendentsii razvitiya*. Materialy XV Mezhdunar. nauch.-prakt. konferentsii [Logistics: modern development trends. Materials of the 25th International Workshop]. April 7–8, 2016. Publishing editor V. S. Lukinskij. Saint Petersburg, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping Publ., 2016, pp. 200–203. (In Russian)

3. Malikov O. B.& Gombosed S. Opredelenie sebestoimosti kontejnero-operatsii na prigranichnom terminale [Determining the net cost of a container operation at a near-border terminal]. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii* [Current issues of the Russian transportation industry]. Magnitogorsk, Magnitogorsk N. I. Nosov State University of Engineering Publ., 2013, issue 3, pp. 91–96. (In Russian)

4. Panova Ju. N.&Korovyakovskij E. K. Sposoby propusknoj sposobnosti morskikh kontejnerykh portov [Throughput capacity of sea port terminals]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* [The Rostov State University of Transport Bulletin]. Rostov-on-Don, Rostov State University of Transport Publ., 2012, issue 2 (46), pp. 139–144. (In Russian)

5. Alekseev A. V. K voprosu opredeleniya ratsional'nykh konstruktivnykh parametrov gravitacionnykh transportirujushchikh ustroystv dlya zagruzki sypuchikh грузов v transportnye sredstva [Concerning the issue of feasible design parameters of gravity handlers for loading bulk cargo into hauling units]. *Nauka i tekhnika transporta* [Transport Science and Techno-

logy]. Moscow, Moscow State University of Transport Publ., 2012, issue 3, pp. 60–67. (In Russian)

6. Gorjushinskij V. S., Gubarev M. P. & Shulepov V. V. Sovershenstvovanie pogruzochno-razgruzochnykh i transportno-skladskikh operatsij s tverdyim toplivom na jekipirovochnykh punktakh stantsij [Improving loading/unloading and logistical operations with solid fuel at station coal-handling terminals]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [The Volga region transport bulletin]. Samara, Samara State Transport University Publ., 2008, issue 3, pp. 40–46. (In Russian)

7. Ilesaliev D. I. Opredelenie optimal'nykh znachenij parametrov pogruzochno-razgruzochnogo uchastka taro-shtuchnykh грузов [Establishing optimum parameter values for a loading-unloading section of unit loads]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [The Saint Petersburg Transport University Bulletin]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2015, issue 3 (44), pp. 55–63. (In Russian)

8. Panova Ju. N. & Korovyakovskij E. Faktory stroitel'stva tylovykh kontejnernykh terminalov [Back-end container terminal construction factors]. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta* [The Pacific National University Bulletin]. Khabarovsk, Pacific National University Publ., 2012, issue 1, pp. 103–112. (In Russian)

9. Tret'yakov G. M., Denisov V. V. & Kononov I. I. Sovershenstvovanie gruzovoj raboty s massovymi sypuchimi грузами na zheleznodorozhnom transporte [Improving loading operations with mass bulk cargo in rail transport]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [The Volga region transport bulletin]. Samara, Samara State Transport University Publ., 2015, issue 4 (52), pp. 69–74. (In Russian)

10. Gorjushinskij V. S., Denisov V. V. & Mosina N. N. Mezhtseional'nye perevozki zernovykh грузов [Interregional shipment of grain cargo]. *Vestnik*

transporta Povolzh'ya [The Volga region transport bulletin]. Samara, Samara State Transport University Publ., 2010, issue 3, pp. 104–107. (In Russian)

11. Rezer S. B. & Ljovin S. B. Model' organizatsii upravleniya kontejnernymi perevozkami v logisticheskoy tsepi [Organization model for management of container shipments in a logistics chain]. *Transport, nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport, science, technology, management], 2015, issue 2, pp. 3–8. (In Russian)

12. Ljovin S. B. Model' upravleniya kontejnernoj kompaniej v logisticheskoy tsepi [Management model for a container shipment company as part of a logistics chain]. *Mir transporta* [World of Transport], 2014, no. 2 (51), pp. 46–54. (In Russian)

13. Romenkova V. A. & Lomakina N. S. Transportirovka zerna v kontejnerakh. [Containerized shipment of grain]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern knowledge-intensive technologies]. Penza, Natural Science Academy Publ., 2014, issue 5–1, pp. 148–150. (In Russian)

14. Turutin I. V. Issledovanie vozdejstviya sypuchego gruz na tortsevuju stenu spetsializirovannogo vagona dlya perevozki shchepy [Research of impact of bulk cargo on the side wall of a specialized wood chip shipment car]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* [The Rostov State University of Transport Bulletin]. Rostov-on-Don, 2009, issue 4 (36), pp. 40–47. (In Russian)

15. Malikov O. B., Korovyakovskij E. K. & Ilesaliev D. I. Logistika paketnykh perevozk shtuchnykh грузов [Logistics of unitized loads transportation of packaged cargo]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [The St. Petersburg Transport University Bulletin]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, issue no. 4 (41), pp. 51–57. (In Russian)

МАЛИКОВ Олег Борисович – доктор техн. наук, профессор, stadnitskey@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); КУРИЛОВ Евгений Григорьевич – аспирант, delet_91@mail.ru; *ИЛЕСАЛИЕВ Дауренбек Ихтиярович – ассистент, ilesaliev@mail.ru (Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта).

УДК 05.22.08

П. А. Михайловский**ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ**

Дата поступления: 05.09.2016

Решение о публикации: 16.12.2016

Цель: Получить выражения для расчета сопротивления изоляции рельсовой линии, позволяющего учесть протекание электрического тока через отдельные элементы рельсового скрепления. **Методы:** В данной статье были использованы эмпирические методы исследования, а именно статистический, экспериментальный и сравнение. Проведены эксперименты по различным методикам, далее выполнено сравнение полученных результатов. Для определения электрических параметров элементов изоляции рельсовых цепей проведены статистический метод, сбор информации, по результатам которой определены закон распределения и функция распределения. **Результаты:** Полученные значения сопротивлений изоляции сравнены с общепринятой методикой измерения изоляции прибором ИСБ, значения отличаются на 8,96 %. Следовательно, полученная эквивалентная схема параметров изоляции была выбрана верно. На результатах предложенной методики в дальнейшем необходимо определить элемент скрепления рельсовой линии dx – одна шпала и пересчитать параметры рельсовых цепей. Данная работа имеет большую практическую ценность. При пересчете параметров рельсовых цепей возникнет возможность более точно определять максимально возможную длину рельсовых цепей, при увеличении длины рельсовых цепи уменьшается их количество на участке пути и снижается соответственно количество аппаратуры. Также возможно уточнить максимально возможное значение напряжения на входе путевого приемника, при увеличении напряжения уменьшится количество сбоев рельсовых цепей, что снизит время простоя поездов и уменьшит сбои в графике движения поездов. **Практическая значимость:** На сети железных дорог верхнее строение пути подвергается загрязнению минеральными веществами и металлической стружкой, образуемой при шлифовке рельсов подвижным составом. В связи с этим происходит снижение сопротивления изоляции рельсовой линии и сокращается расчетная длина рельсовых цепей.

Рельсовая цепь, заземлители, контрольный режим, токи в земле, сопротивление изоляции рельсовой линии.

Pavel A. Mikhajlovsky, postgraduate student, pashoock@mail.ru (Emperor Nicholas II Moscow State Transport University) TRACK CIRCUIT INSULATION RESISTANCE TEST

Objective: Obtain expressions for calculating track circuit insulation resistance allowing for accounting in the flow of current through individual elements of rail fastening. **Methods:** This article employed empirical methods of research, namely statistical, experimental and comparison. Experiments were conducted based on different methods and the results obtained were compared. To determine the electrical parameters of track circuit insulation elements, the statistical method was used and information was accumulated whose results were employed to determine the distribution law and the distribution function. **Results:** The obtained insulation resistance results were compared to the commonly established insulation measurement method via the ISB resistance meter device and the readings differ by 8.96 %. Therefore, the resulting equivalent circuit representation of insulation parameters was selected correctly. The results of the suggested method should further be used to determine the connecting element of the dx – single sleeper rail circuit and re-calculate the rail circuit parameters. This work is of much practical value. The recalculation of rail circuit parameters will enable a more precise determination of the maximum

possible length of rail circuits; with increased length of the rail circuits their number on a rail section is reduced, thus reducing the amount of equipment. Additionally, one can ascertain the maximum possible resistance value at the input of the track pick-up unit; with increased voltage comes a reduced chance of failure of track circuits. This will cut train downtime and eliminate schedule delays. **Practical importance:** On railway networks, the track superstructure is subject to pollution with inorganic substances and metal shavings created by the rolling stock buffing the rails. For that reason, the rail track insulation resistance is reduced, as is the design length of the track circuits.

Rail track circuit, grounding rods, control mode, terrestrial currents, track circuit insulation resistance.

Введение

На сети железных дорог верхнее строение пути подвергается загрязнению минеральными веществами и металлической стружкой, образуемой при шлифовке рельсов подвижным составом. В связи с этим происходит снижение сопротивления изоляции рельсовой линии и уменьшение работоспособности рельсовых цепей. Пониженное сопротивление изоляции рельсовой линии $r_{\text{и}}$ является неблагоприятным для контрольного режима рельсовых цепей. Ограничивающим режимом работы рельсовых цепей служит контрольный режим, способный идентифицировать излом рельсовой линии [1].

В настоящее время существует несколько патентных способов измерения сопротивления изоляции рельсовой линии. Рассмотрим их.

Способ измерения сопротивления изоляции рельсовой линии [2] заключается в том, что в рельсовую линию на одном ее конце подают сигнал переменного тока, а на другом конце рельсовой линии предварительно измеряют напряжение, ток и сдвиг его фазы не менее чем при четырех состояниях сопротивления изоляции рельсовой линии, причем два из них предельные. При холостом ходе и коротком замыкании вычисляют входные сопротивления Z_{xx} и $Z_{\text{кз}}$, а по ним – волновое сопротивление $Z_{\text{в}}$, коэффициент распространения Y , и по формуле $r_{\text{и}} = Z_{\text{в}}/Y$ рассчитывают сопротивление изоляции.

Недостатком данного способа являются значительные погрешности измерения при больших затуханиях в рельсовых линиях, что имеет место в реальных условиях.

Также возможно измерять данные значения не в конце рельсовой цепи, а на расстоянии 0,5 км, что уменьшит влияние затухания в рельсах. Недостатками данных способов является: отсутствие картины растекания тока через отдельные элементы рельсового скрепления, требование к симметричности рельсовой линии.

Существует большое количество приборов по измерению импульсного сопротивления заземляющих устройств [3]. Для рельсовых цепей тональных частот данные приборы не подходят.

Устройство [4] относится к электроэнергетике, к предпроектным изысканиям при проектировании и сооружении заземляющих устройств, в частности при вертикальном электрическом зондировании земли. Задачей изобретения является повышение точности измерения в местах с местными поверхностными включениями с удельным электрическим сопротивлением, отличным от удельного электрического сопротивления земли. В результате использования предлагаемого устройства повышается точность измерения. Достигается вышеуказанный результат тем, что измерения производятся в нескольких местах вокруг заземлителя, что повышает точность измерения.

Данный способ не подходит для измерения сопротивления балласта рельсовой линии, так как рельсы находятся в непосредственной близости друг с другом.

Одним из наиболее актуальных считается способ измерения сопротивления рельсовой линии прибором ИСБ-2 ОАО «Инжиниринг АТ». Прибор внесен в Государственный ре-

есть средств измерений, регистрационный № 43484-09.

Измеритель сопротивления балласта ИСБ-2 предназначен для измерения сопротивления балласта железнодорожных рельсовых цепей. Из-за того, что все вышеперечисленные способы не подходят для измерения сопротивления рельсовой линии, необходимо использовать прибор ИСБ-2.

Недостатком данного прибора является то, что измерение производится в расчете на один километр, при этом не рассматривается сопротивление отдельных узлов креплений. Поэтому необходимо определить, из каких элементов состоит рельсовое крепление при протекании электрического тока и построить электрическую схему замещения [5].

Схема рельсового крепления

Опишем общий вид рельсошпальной решетки (рис. 1).

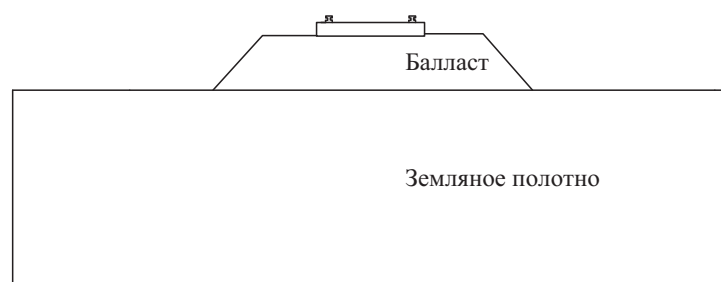


Рис. 1. Общий вид рельсошпальной решетки

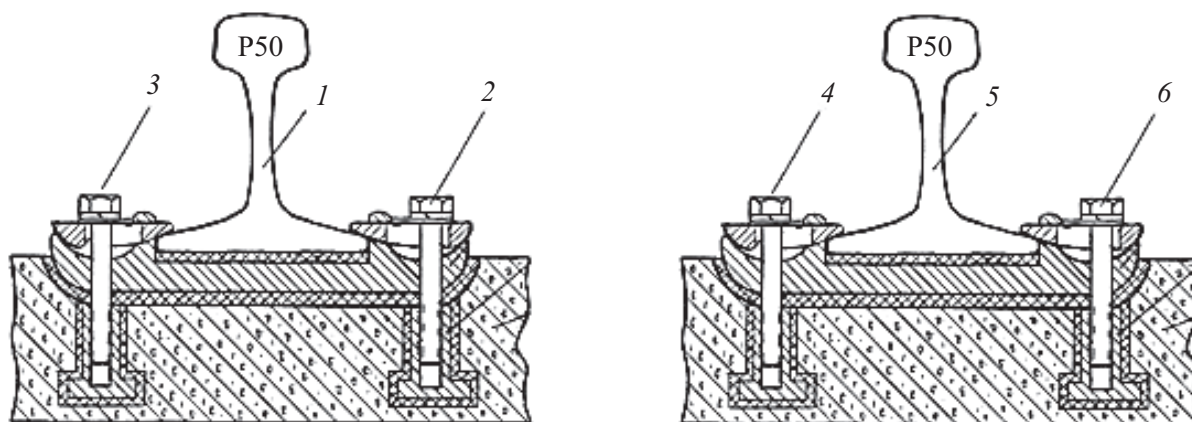


Рис. 2. Рельсовое крепление типа КБ:
1, 5 – рельсы; 2–4, 6 – крепежные болты (то же для рис. 3)

Рассмотрим рельсовые линии как заземляющие проводники. Расчет распространения сигнального тока в рельсовой линии производится на основании схемы замещения, в которой рассматривается стекание тока в землю с элементарного участка рельса длиной dx (одна шпала) [6]. Переходное сопротивление между заземлителем и землей определяется площадью соприкосновения и удельным сопротивлением материалов. На практике земля имеет сложную неоднородную структуру, и в результате влияния внешних эксплуатационных факторов (загрязнение мазутом, металлической стружкой, минеральными солями и т. д.) появляется верхний хорошо проводящий слой, оценить проводимость которого на практике весьма проблематично [7]. Наиболее распространенным в данный момент является крепление типа КБ. Рассмотрим, из каких элементов оно состоит (рис. 2).

Перспективные новые рельсовые крепления типа АРС в данный момент изучать проблематично, так как они установлены на

РЖД недавно и не подверглись в полной мере влиянию погодных и эксплуатационных факторов. Электрическое сопротивление отдельных узлов крепления находится в пределах от 5 до 20 мОм, что при расчетах можно принять за бесконечность [8].

Согласно основным требованиям к изолирующим втулкам из реактопластов для рельсовых креплений по ТУ 32 ЦП 748-86 (введены с 1 июля 1986 г. взамен ТУ 6-05-1809-77) электрическое сопротивление в сухом состоянии – не менее 106 Ом, что соответствует точкам измерения 1–2, 1–3, 5–4, 5–6 на рис. 3.

Согласно ГОСТ Р 54747-2011 от 07.01.2012 электрическое сопротивление железобетонной шпалы должно быть не менее 10 кОм, что соответствует точкам измерения 2–4 на рис. 3.

Статистические данные

Первоначально производились измерения на звеносборочной базе. Сопротивление от-

дельных узлов крепления показывает верхний предел измерения, при расчетах режимов работы рельсовых цепей $r_{\text{и}}$ можно принять за бесконечность. Это обусловлено тем, что новые крепления не подверглись влияниям эксплуатационных и погодных факторов.

При измерении эксплуатационных условий было обнаружено пониженное сопротивление изоляторов, менее 10 Ом, измеренное на постоянном токе:

$r_{\text{и}} < 10 \text{ Ом}$	$r_{\text{и}} = \infty$
67,8 %	32,2 %

Для расчетов такие значения можно принять равными 0.

Так как изоляторы между рельсом и шпалой соединены параллельно, что было проверено экспериментально, изоляция имеет пониженное сопротивление (менее 10 Ом), если один из изоляторов имеет пониженное сопротивление. Снижение сопротивления изоляторов зависит от эксплуатационных влияний – мазут, металлическая стружка с грязью. Также следует учесть, что шпальные

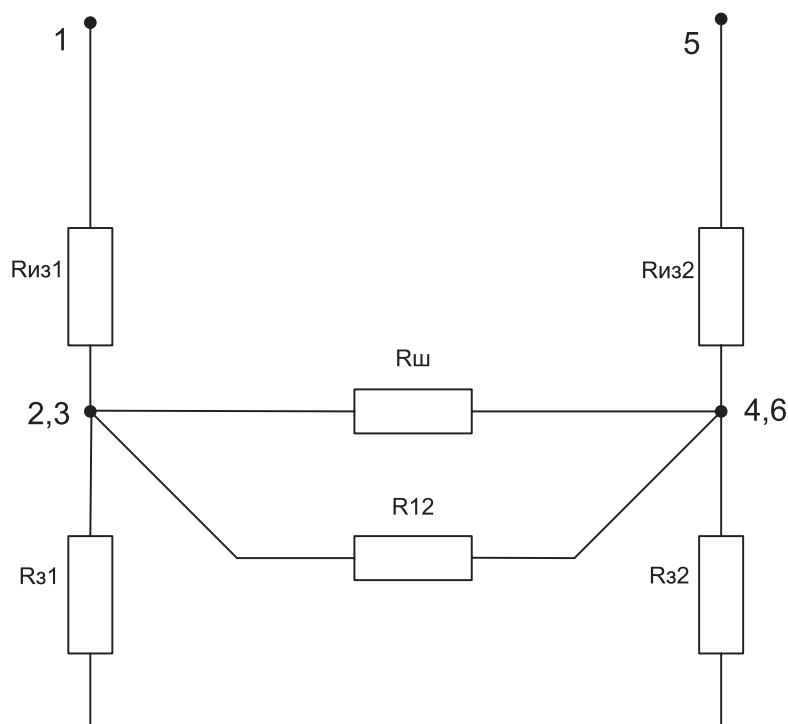


Рис. 3. Электрическая схема замещения элемента dx рельсовой цепи

болты поливают маслом для уменьшения влияния коррозии. В результате чего появляется верхний, хорошо проводящий слой и распространение электрического сигнала проходит по многослойной проводящей среде. Данная смазка смешивается с металлической стружкой и другими примесями, в результате чего полученная масса становится электрическим проводником.

Вероятность того, что изолятор имеет сопротивление менее 10 Ом, $P = 0,678$.

Описание статистических характеристик и процесса растекания токов в земле приведено в литературе [9–12].

Рассмотрим значения сопротивления шпалы, измеряемое в точках 2–4.

При сухой теплой погоде (от +8 до +20 °С) получим

Интервал, кОм	P
0–2	0,24
2–4	0,26
4–6	0,12
6–8	0,12
8–10	0,1
10–12	0,1
12–14	0,04
14–16	0,02

Построим гистограмму для данных значений (рис. 4).

Так как в рельсовой линии шпалы соединены параллельно, определим $r_{\text{ш}}$ из расчета 1840 шпал на 1 км по формуле

$$r_{\text{ш}} = 1840 / N \sum \frac{1}{R_{\text{ш}i}} + \dots + \frac{1}{R_{\text{ш}i}},$$

где N – число измеренных шпал, i – номер шпалы.

Расчетное значение $r_{\text{ш}} = 1,25$ Ом·км.

Далее производилось измерение $r_{\text{ш}}$ общепринятым прибором ИСБ-2.

Измеряемое фактическое значение $r_{\text{ш}} = 1,138$ Ом·км. Погрешность измерений 8,96%.

Следовательно, уточненная модель растекания тока на участке dx выбрана правильно. Погрешность появилась в результате погрешности измерительных приборов, влияния ДТМ на измерения ИСБ-2, влияния импульсных помех тягового тока.

По закону распределения по методу χ^2 , т.е. закону Релея с доверительной вероятностью 0,23, доверительный интервал равен 0–16 кОм.

Построим функцию распределения для данных значений (рис. 5).

Заключение

Предложенная методика позволяет получить более точное значение $r_{\text{ш}}$ чем существующие приборы и методики [2, 4, 13–15], в том числе ИСБ-2.

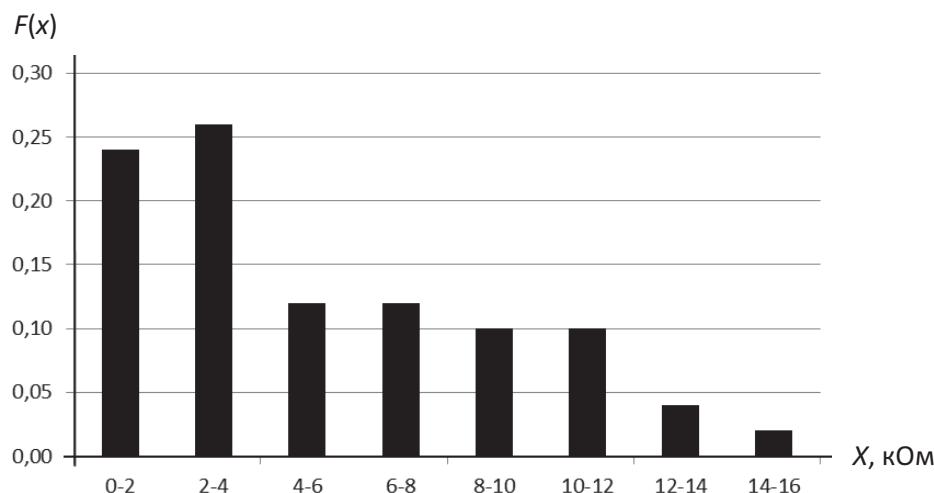


Рис. 4. Гистограмма сопротивления шпалы

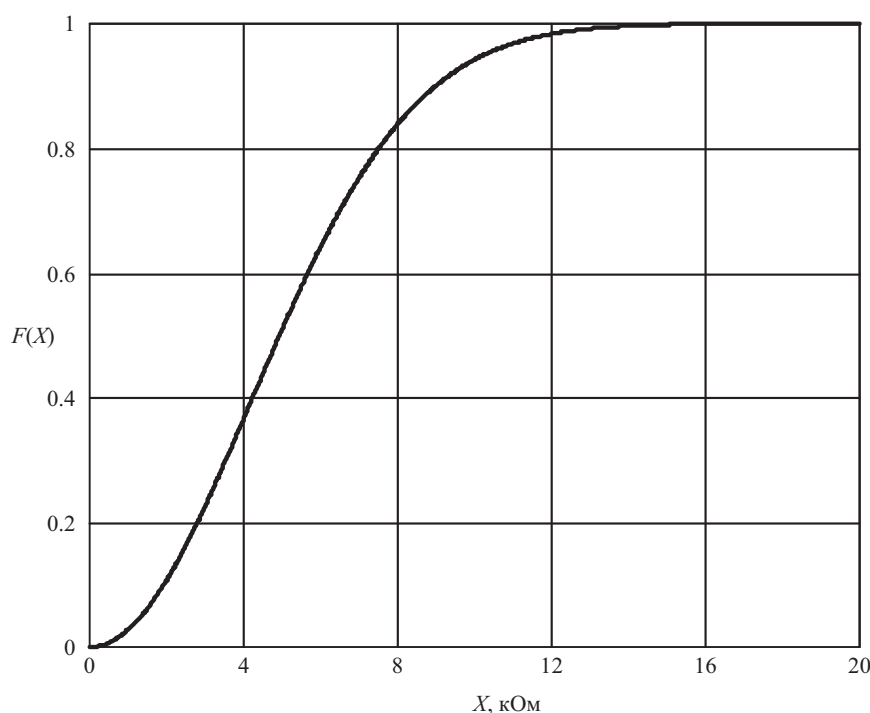


Рис. 5. График функции распределения случайной величины

Библиографический список

1. Брылеев А. М. Теория, устройство и работа рельсовых цепей / А. М. Брылеев, Ю. А. Кравцов, А. В. Шишляков. – М. : Транспорт, 1978. – 344 с.
2. Патент 2176800. МПК G01R27/16, G01R27/18. Способ измерения сопротивления изоляции рельсовой линии / Е. М. Тарасов, А. С. Белоногов (РФ). Заявитель и патентообладатель Самарский институт инженеров железнодорожного транспорта, 2000128079/09, заявлено 09.11.2000, опубликовано : 10.12.2001. С1.
3. Джура Д. А. Приборы для измерения импульсного сопротивления заземляющих устройств / Д. А. Джура, В. Н. Селиванов // Труды Кольск. науч. центра РАН. – 2013. – № 4 (17). – 138 с.
4. Патент 2208232. МПК G01R27/20, G01R27/18. Способ измерения сопротивления заземлителя и устройство для его осуществления / Е. В. Халин, С. И. Коструба (РФ). Заявитель и патентообладатель Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства, 2002111835/09, заявлено 07.05.2002, опубликовано : 20.07.2003. С1.
5. Косарев А. Б. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта / А. Б. Косарев, Б. И. Косарев. – М. : Интекст, 2008. – 480 с.
6. Косарев А. Б. Электромагнитные процессы в системах энергоснабжения железных дорог переменного тока / А. Б. Косарев, Б. И. Косарев, Д. В. Сербиненко. – М. : ВМГ-Принт, 2015. – 349 с.
7. Бургсдорф В. В. Заземляющие устройства электроустановок / В. В. Бургсдорф, А. И. Якобс. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
8. Дмитриев В. С. Совершенствование систем автоблокировки / В. С. Дмитриев, В. А. Минин. – М. : Транспорт, 1987. – 143 с.
9. Шор Я. Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности / Я. Б. Шор. – М. : Сов. радио, 1962. – 562 с.
10. Лисенков В. М. Методы анализа и синтеза рельсовых цепей (статистический подход) / В. М. Лисенков. – М. : ВИНТИ РАН, 2014. – 202 с.
11. Марголин Н. Ф. Токи в земле / Н. Ф. Марголин. – М. ; Л. : Гос. энергетич. изд-во, 1947. – 100 с.
12. Матросов В. Л. Дифференциальные уравнения и уравнения с частными производными /

В. Л. Матросов, Р. М. Асланов, М. В. Топунов. – СПб. : ВЛАДОС, 2011. – 376 с.

13. Михайлов М. И. Электромагнитные влияния на сооружения связи / М. И. Михайлов, Л. Д. Разумов, С. А. Соколов. – М. : Связь, 1979. – 264 с.

14. Патент 75478. МПК G01R27/18. Устройство измерения потенциала «Рельс–Земля» на электрифицированной железной дороге с тягой на постоянном токе / А. В. Дементьев, В. А. Дементьев, Е. А. Лазарев, Л. В. Лазарева, А. В. Мятёж (РФ). Заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Электродиагност-Железнодорожник», 2008108804/22, заявлено 06.03.2008, опубликовано : 10.08.2008. U1.

15. Патент 2208804. МПК G01R27/20, G01R27/18. Устройство для вертикального электрического зондирования земли / Е. В. Халин, С. И. Коструба (РФ). Заявитель и патентообладатель Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства, 2002111835/09, заявлено 07.05.2002, опубликовано : 20.07.2003. C1.

References

1. Bryleev A. M., Kravtsov Ju. A., Shishlyakov A. V. *Teoriya, ustrojstvo i rabota rel'sovykh tsepej* [Theory, arrangement and operation of rail track circuits]. Moscow, Transport Publ., 1978, 344 p. (In Russian)

2. Tarasov E. M., Belonogov A. S. *Sposob izmereniya soprotivleniya izolyatsii rel'sovoj linii* [Rail track insulation resistance measurement method]. Russian Federation Patent no. 2176800. MPK G01R27/16, G01R27/18. Patent applied for and owned by the Samara Institute of Railway Transport Engineers, 2000128079/09, submitted 09.11.2000, published: 10.12.2001. C1. (In Russian)

3. Dzhura D. A., Selivanov V. N. *Pribory dlya izmereniya impul'snogo soprotivleniya zazemlyajushchikh ustroystv* [Devices for measuring impulse resistance of grounding connections]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Works of the Kola RAS Research Center], 2013, no. 4 (17), 138 p. (In Russian)

4. Khalin E. V., Kostuba S. I. *Ustrojstvo dlya vertikal'nogo jelektricheskogo zondirovaniya zemli* [Earth electric resistivity sounding device]. Russian

Federation Patent no. 2208804. MPK G01R27/20, G01R27/18. Patent applied for and owned by the State Research Institution Russian National Research Institute of Agriculture Electrification, 2002111835/09, submitted 07.05.2002, published: 7/20/2003. S1. (In Russian)

5. Kosarev A. B., Kosarev B. I. *Osnovy jelektromagnitnoj bezopasnosti sistem jelektronsnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta* [Basics of electromagnetic safety for rail transport power supply systems]. Moscow, Intekst Publ., 2008, 480 p. (In Russian)

6. Kosarev A. B., Kosarev B. I., Serbinenko D. V. *Jelektromagnitnye protsessy v sistemakh jenergosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka* [Electromagnetic processes in railway AC power supplies]. Moscow, VMG-Print Publ., 2015, 349 p. (In Russian)

7. Burgsdorf V. V., Yakobs A. I. *Zazemlyajushchie ustrojstva jelektroustanovok* [Electric plant grounding connections]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1987, 400 p. (In Russian)

8. Dmitriev V. S., Minin V. A. *Sovershenstvovanie sistem avtoblokirovki* [Improving of the automatic block systems]. Moscow, Transport Publ., 1987, 143 p. (In Russian)

9. Shor Ya. B. *Statisticheskie metody analiza i kontrolya kachestva i nadjozhnosti* [Quality and stability analysis and control methods]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1962, 562 p. (In Russian)

10. Lisenkov V. M. *Metody analiza i sinteza rel'sovykh tsepej (statisticheskij podkhod)* [Rail track circuit analysis and synthesis methods (a statistical approach)]. Moscow, VINITI (Russian Institute for Scientific and Technical Information) RAS Publ., 2014, 202 p. (In Russian)

11. Margolin N. F. *Toki v zemle* [Terrestrial currents]. Moscow, Leningrad, Gosjenergoizdat, 1947, 100 p. (In Russian)

12. Matrosov V. L., Aslanov R. M., Topunov M. V. *Differentsial'nye uravneniya i uravneniya s chastnymi proizvodnymi* [Differential equations and partial differential equations]. Moscow, Vldos Publ., 2011, 376 p. (In Russian)

13. Mikhajlov M. I., Razumov L. D., Sokolov S. A. *Jelektromagnitnye vliyaniya na sooruzheniya svyazi* [Electromagnetic impact on communication facilities]. Moscow, Svyaz' Publ., 1979, 264 p. (In Russian)

14. Dement'ev A. V., Dement'ev V. A., Lazarev E. A., Lazareva L. V., Myatezh A. V. *Ustrojstvo izmereniya potentsiala "Rel's-Zemlya" na jelektrifitsirovannoj zheleznoj doroge s tyagoj na postoyannom toke* [Potential measurement device "Rail-Earth" on an electrified railway with direct current traction]. Russian Federation Patent no. 75478. MPKG01R27/18. Patent applied for and owned by Jelektrodiagnost-Zheleznodorozhnik Limited Liability Company, 2008108804/22, submitted 06.03.2008, published: 8/10/2008. U1. (In Russian)

15. Khalin E. V., Kostruba S. I. *Sposob izmereniya soprotivleniya zazemlitelya i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya* [Grounding resistance measurement method and device]. Russian Federation Patent no. MPK G01R27/20, G01R27/18. Patent applied for and owned by the State Research Institution Russian National Research Institute of Agriculture Electrification, 2002111835/09, submitted 07.05.2002, published: 20.07.2003.C1. (In Russian)

МИХАЙЛОВСКИЙ Павел Андреевич – аспирант, pashoock (Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II).

УДК 656.073:658.8

О. Д. Покровская, Е. К. Коровяковский**ТЕРМИНАЛИСТИКА – ОРГАНИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
В ТРАНСПОРТНЫХ УЗЛАХ**

Дата поступления: 25.08.2016

Решение о публикации: 27.09.2016

Цель: Охарактеризовать функциональное и междисциплинарное положение терминалистики как самостоятельного направления логистики и транспортной науки, а также обосновать ее научно-практическую актуальность. **Методы:** Использован аналитический метод исследования. **Результаты:** Предложено новое направление научно-практических изысканий транспортных узлов, терминальных сетей и транспортно-складской инфраструктуры – терминалистика. Дано определение терминалистики как логистики терминальных сетей и транспортных узлов – науки об организации, проектировании, управлении, структуре и конфигурации сетей грузовых терминалов, включая вопросы количества и дислокации узлов, функционально-технологического состава, прогнозной и экспертной оценок, а также транспортную, инфраструктурную, интеграционную, экономическую и экологическую составляющие работы региональных терминальных сетей. Описано словообразование нового термина. В графической форме представлены междисциплинарные связи терминалистики как самостоятельного направления, выделенного из логистики и общей теории систем. Охарактеризованы три ключевых составляющих терминалистики: техническая, управленческая и экономическая. Комплексность решений терминалистики заключается в рассмотрении не просто определенных фрагментов многогранной деятельности транспортных узлов, но и сущности любых логистических объектов во всех проявлениях и взаимосвязи решаемых вопросов. В графической форме (авторское представление терминалистики в виде сотовой структуры) показано функциональное положение терминалистики в системе базовых научных дисциплин. Установлено, что основополагающими научными дисциплинами для терминалистики являются теоретические основы логистики, общей теории систем, экономики и транспортной инфраструктуры. Проведен анализ литературных источников транспортной науки. В результате получено, что в большинстве научных работ акцент сделан на путевом развитии узлов (в том числе перспективное генеральное планирование и интеграция в населенный и/или промышленный центр), а также на экономико-географических особенностях их функционирования и технической оснащенности. При этом выявлено, что логистический аспект функционирования транспортных узлов как ключевых элементов транспортно-логистических систем регионов и страны не получил должного внимания в научной литературе. Этим объясняется актуальность терминалистики, адаптированной к реалиям рынка и сфокусированного на комплексном исследовании и проектировании логистических объектов различного формата. В графической форме показаны миссия и объект изучения терминалистики. Анализируются подходы к дефиниции и типологии транспортных узлов. Выявлено, что в железнодорожной литературе доминируют такие подходы как техническая оснащенность, путевое развитие и экономико-географическое положение. В качестве выводов указывается, что усложнение ассортимента логистического сервиса, множество подходов к организации работы транспортных узлов, повышение качественных требований объективно требуют оформления в самостоятельную отрасль всех знаний о транспортных узлах с позиций современной логистики. Терминалистика позволит концентрированно оформить теоретико-методологическую базу связанных дисциплин и подходов в единое научное направление знаний о транспортных узлах. **Практическая значимость:** Дана характеристика функциональной области терминалистики, а также описан круг практических вопросов, которые может решить терминалистика как новое научное направление. Комплексность решений, которые позволяет принимать методология терминалистики, определяет эффективность исследования, проектирования и развития транспортных узлов и терминальных сетей. Для ОАО «РЖД» применение научно-практических результатов терминалистики позволит

повысить клиентоориентированность сервиса, реализуемого в транспортных узлах, а также сформировать условия для перехода компании в статус логистического провайдера полного цикла и рационально построить терминальную сеть на территории страны.

Терминалистика, транспортные узлы, терминальные сети.

***Oksana D. Pokrovskaya**, Cand. Eng., associate professor, insight1986@inbox.ru (Siberia State Transport University); **Evgenij K. Korovyakovskij**, Cand. Eng., associate professor, head of chair, ekorky@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State University of Transport). **TERMINALISTICS: ORGANIZATION AND MANAGEMENT IN TRANSPORT HUBS**

Objective: Describe the functional and interdisciplinary position of terminalistics as an individual area in logistics and transportation science and substantiate its applied research relevance. **Methods:** An analytical research method was employed. **Results:** Terminalistics was suggested as a new area in the applied research of transport hubs, terminal networks and storage-retrieval infrastructure. Terminalistics was defined as the logistics of terminal networks and transport hubs; a science of organization, planning, managing, structuring and configuring cargo terminal networks, including the matters of the quantity and deployment of hubs, the functional and technological composition, predictive and expert assessments as well as the transportational, infrastructural, integrative, economic and environmental constituents of the operation of regional terminal networks. The derivation of the new term is described. The interdisciplinary connections of terminalistics as an individual area that is distinguished from logistics and general systems theory are presented in graphical form. Three key elements of terminalistics are described: technical, managerial and economic. The complexity of solutions pertaining to terminalistics involves examining not only the individual fragments of the multi-faceted activity of transport hubs but also the nature of all logistical entities in all their aspects and the interrelation of the matters in question. Graphics (a proprietary representation of terminalistics in an alveolate structure) display the functional position of terminalistics in the system of basic scientific disciplines. It was established that for terminalistics the founding scientific disciplines are the theory of logistics, the general systems theory and the theory of economics and transport infrastructure. Literary sources of transportation science were analyzed. It was concluded that in the majority of research papers the emphasis is put on hub layouts (including long-term general planning and integration in a populated and/or industrial center) and the economic and geographical features of their functioning and technological infrastructure. Additionally, it was established that the logistical aspect of the functioning of transport hubs as key elements in the transport and logistical systems of regions and the country as a whole, was not given proper attention in the research literature. This explains the relevance of terminalistics adapted to the market realities and focused on the integrated research and planning of logistical entities of various formats. The mission of terminalistics and its object of study are represented graphically. Approaches to definitions and typology of transport hubs are analyzed. It was established that the railway-themed literature is dominated by such topics as technical infrastructure, track layout and economic and geographical position. It is concluded that the complication of the range of logistic services, the multiple approaches toward organizing the transport hub operation and the increasing of qualitative requirements, all effectively require formalization of all the knowledge on transport hubs that the modern logistics provides, into a separate subject area. Terminalistics allows for a concentrated formalization of the theoretical and methodological background of the related disciplines and approaches in a unified research area dedicated to transport hubs. **Practical importance:** The functional area of terminalistics was described, and a range of practical issues that terminalistics can tackle as a new research area was delineated. The complexity of solutions that the terminalistics methodology allows for, establishes the effectiveness of researching, planning and development of transport hubs and terminal networks. For OAO RZD the implementation of applied terminalistics research will grant an ability to ensure an increasingly more customer-oriented service provided at transport hubs and form conditions for the company's transfer to a status of a full-cycle logistics provider and the efficient construction of a terminal network within the country.

Terminalistics, transport hubs, terminal networks.

В данной статье предлагается новая теория исследования, рационального построения и развития терминальных сетей в целом и транспортных узлов в частности – теория терминалистики. Она представляет собой интегрированное научное направление логистики [1–7].

Логика словообразования термина «терминалистика» следующая. Для удобства применения термина предложен английский эквивалент понятия. Интеграция понятий «Terminal» (от англ. терминал) + logistics (от англ. логистика) = **terminalistics**. Под терминалистикой предлагается понимать терминальную логистику, логистику инфраструктуры транспортно-логистических узлов и терминальных сетей (the infrastructural logistics of transport and logistical hubs and terminal networks).

Терминалистика – наука об организации, проектировании, управлении, структуре и конфигурации сетей грузовых терминалов, включая вопросы количества и дислокации узлов, функционально-технологического состава, прогнозной и экспертной оценок, с учетом потоковых процессов транспортно-технологического, экономического происхождения и связанного мультипликативного эффекта работы терминальных сетей [1, 5].

В отличие от логистики, рассматривающей в качестве предмета все виды потоков, независимо от их происхождения в цепи доставки, терминалистика ограничивает предмет изучения только потоками, порождаемыми и преобразуемыми в логистической инфраструктуре. В фокусе внимания терминалистики, как следует из ее названия (см. выше), находятся терминалы, транспортно-логистические узлы и другие объекты логистической инфраструктуры.

К основным задачам, которые может решать терминалистика, относятся:

1) проектирование терминальных сетей, включая определение ее структуры, количества и дислокации узлов (грузовых терминалов), внутренней модульной структуры, функционального и технического оснащения терминалов;

2) выбор вида (сочетания видов) транспорта для реализации транспортного обслуживания терминальных сетей, построение и расчет рациональных схем доставки грузов (включая мультимодальную) через терминальную сеть, интегрированную в сеть транспортных коридоров;

3) разработка альтернативных вариантов транспортно-логистического обслуживания регионов;

4) экономическая, экспертная полифакторная оценка эффективности работы терминальных сетей.

На рис. 1 показаны междисциплинарные связи терминалистики как самостоятельного направления, выделенного из логистики и общей теории систем. Каждая составляющая определяет методологию проектирования и управления терминальными сетями, их структурой и организацией перевозок грузов через них.

Так, **техническую составляющую** терминалистики представляют такие смежные дисциплины, которые изучают внутреннюю технико-технологическую структуру транспортных узлов как сложных систем: теория систем, взаимодействие видов транспорта и др.

Управленческая (структурная) составляющая представлена логистикой и ее направлениями; ее задачей является эффективное управление потоковыми процессами при функционировании такой транспортно-логистической системы как терминальная сеть.

Как видно на рис. 1, вторая составляющая находится на более высоком уровне, поскольку масштаб решаемых задач выходит за пределы конкретной узловой единицы терминальной сети – грузового терминала и связан с проектированием рациональных схем грузодвижения, внутри- и межрегионального направления.

И, наконец, **экономическая (расчетная) составляющая** (на высшем уровне проектирования и управления терминальными сетями) позволяет определить с помощью экономического анализа и экспертных оце-

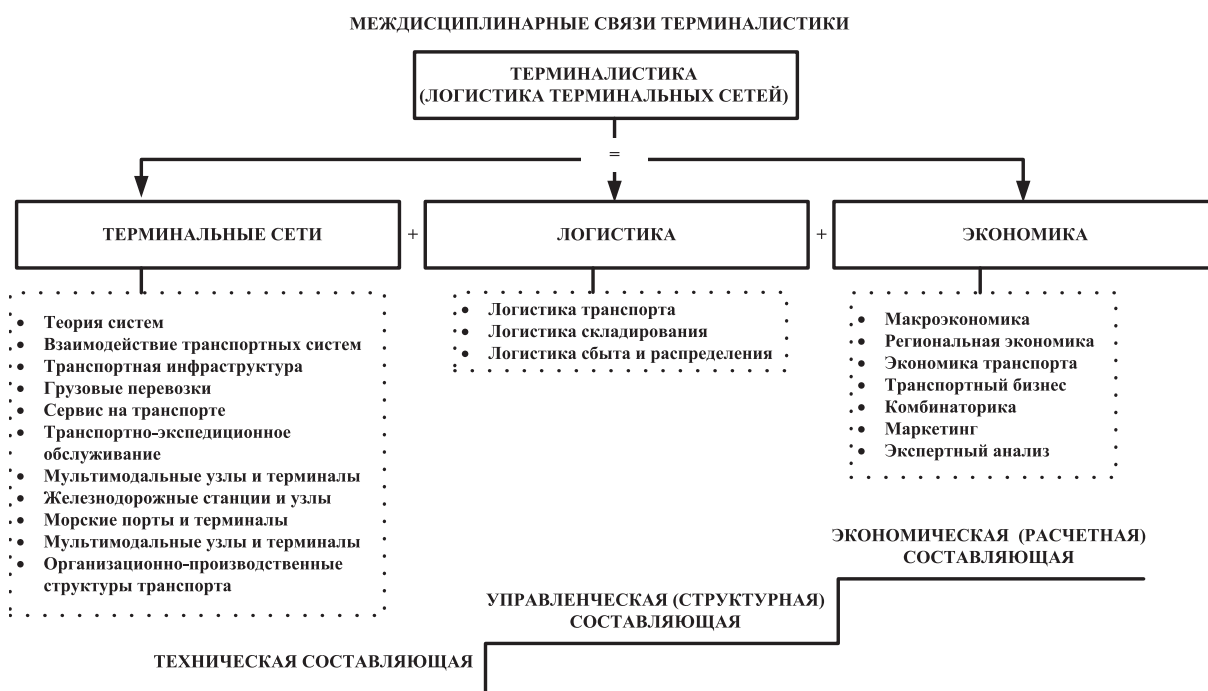


Рис. 1. Междисциплинарные связи терминалистики [2]

нок рациональность структуры терминальной сети, скорректировать ее при необходимости и обеспечить реализацию перевозок с минимальными затратами, мультипликативный эффект [2].

Парадоксально, что при ключевой роли логистических объектов (ЛО) различной сложности и функциональной роли в цепях поставок, их огромном и постоянно растущем количестве (от складов с минимумом функций до логистических центров провайдеров полного цикла) отсутствует комплексная междисциплинарная научная доктрина, фокусирующая свое внимание на всестороннем изучении таких объектов – от классификационной типологии и вопросов пространственно-количественного формирования терминальных сетей до проектирования и эксплуатации логистических центров в цепях поставок всех уровней. Комплексность такого направления означает не просто рассмотрение какого-то фрагмента многогранной деятельности транспортных узлов, но и сущности ЛО во всех проявлениях и взаимосвязи решаемых вопросов.

Так, существующие научные направления рассматривают только узкую группу проблем,

связанных с организацией эффективной работы ЛО, не уделяя должного внимания остальным его «ипостасям». Например, дисциплина «Транспортно-грузовые системы» уделяет внимание только техническому аспекту функционирования транспортных узлов, включая проектирование грузовых фронтов, маневровых площадок, технологию и организацию работы погрузо-разгрузочной техники, технические расчеты производственных и складских мощностей. Даже *логистика* дает довольно скудные обзоры множества типов и дефиниций транспортных узлов, почти не рассматривает историю возникновения ЛО (в частности, складов, терминалов, терминальных перевозок).

Отдельные области логистической науки дают представление о работе ЛО и его месте в цепях поставок лишь односторонне: логистика запасов – об искусстве управления запасами в ЛО, логистика складирования – о вопросах эффективного размещения товаров на складе и оптимизации складского хозяйства, логистика закупок – об эффективных способах управления закупками и материальными потоками на складе, логистика транспорта –

о взаимодействии видов транспорта в узлах, выборе вида транспорта для обслуживания терминалов.

Экономическая география – построение пространственного каркаса транспортно-логистических комплексов, увязка логистических мощностей с инфраструктурой транспортных коридоров.

Экономика транспорта – экономические аспекты повышения эффективности и инвестиционной привлекательности транспортных узлов, маркетинговые исследования, способы взаимодействия с клиентурой.

Региональная экономика – вопросы кластеризации и построения глобальных логистических систем.

Безусловно, все эти и многие другие вопросы организации работы транспортных узлов

важны, но, к сожалению, не систематизированы в интегрированное направление, позволяющее рассматривать указанные вопросы не локально, а комплексно.

На рис. 2 показано функциональное положение терминалистики в системе базовых научных дисциплин в виде сотовой структуры. Ближайшие от центральной «терминалистики» соты – это ключевые научные знания, на которых основано теоретическое и методологическое обеспечение терминалистики: транспортно-грузовые системы, теория складских систем, взаимодействие транспортных систем, станции и узлы, складская и транспортная логистика. Краеугольные камни терминалистики как науки, из которых образовано данное направление, – это вершины структуры: общая теория систем, логистика,

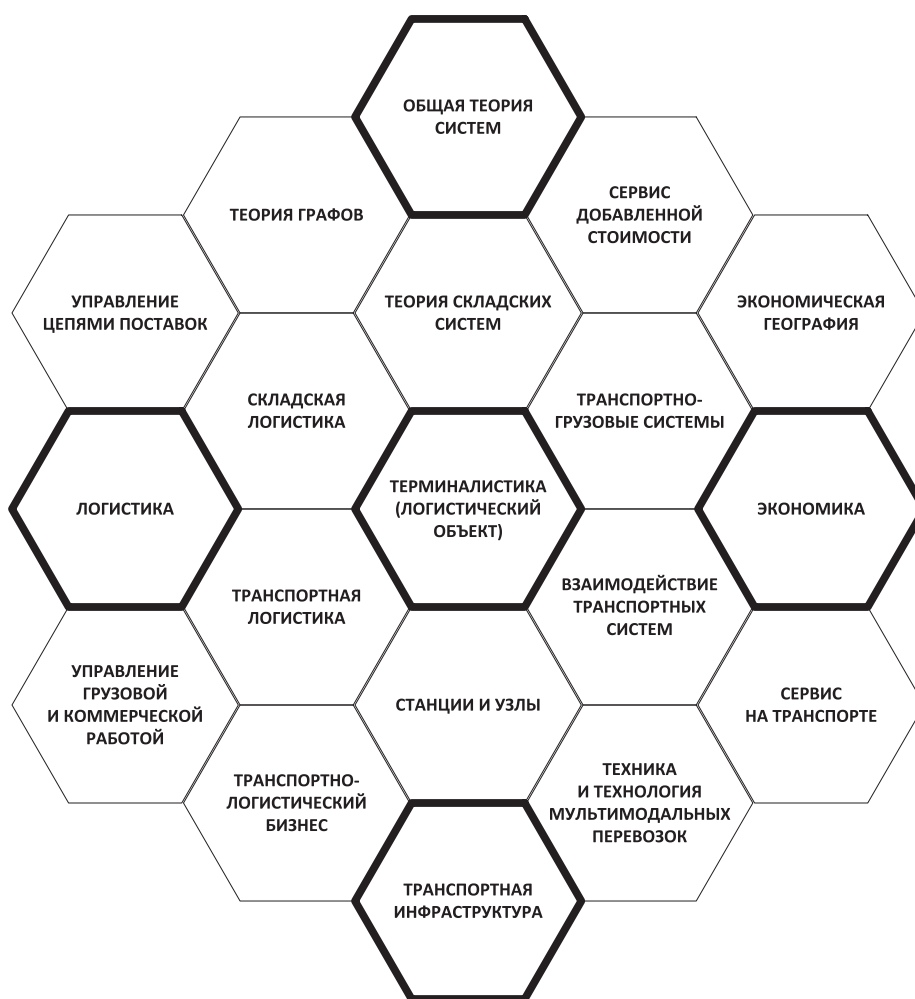


Рис. 2. Функциональное положение терминалистики в системе базовых научных дисциплин

экономика и транспортная инфраструктура. Частные теории расположены по внешнему периметру сотовой структуры.

Как показал анализ литературных источников, в транспортной науке транспортный узел традиционно рассматривался как ключевой элемент инфраструктуры для трансформации (передачи) грузопотоков с одних направлений на другие, а также для обслуживания крупных населенных и промышленных пунктов [8–14].

В простейшем случае положение терминалистики как полидисциплинарного направления в общенаучной системе можно изобразить в виде рис. 3.

В большинстве научных работ акцент сделан на путевом развитии узлов (в том числе перспективное генеральное планирование и интеграция в населенный и/или промышленный центр) [8–14], а также на экономико-географических особенностях их функционирования и технической оснащенности [8–10, 13, 14].

К сожалению, логистический аспект работы транспортных узлов и их интеграции в терминальную сеть страны до сих пор не получил достаточного внимания. Этим вопросом в различной постановке занимались та-

кие отечественные ученые как В. И. Апатцев [8], С. Ю. Елисеев [15], А. С. Балалаев [16], О. Б. Маликов [17,18] и др.

При этом четко выделяются два подхода к сущности ЛО железных дорог – физическое представление (грузовой терминал) [8–14] как низшей ступени их развития и виртуальное (информационный центр) [15, 16, 19, 20] как высшей.

Авторский подход терминалистики, сформулированный в [1–5], предполагает рассмотрение ЛО всех типов во всем их многообразии, т. е. комплексно, не опровергая ни один из перечисленных выше подходов, но интегрируя их в единую систему знаний о ЛО.

Вместе с тем условия работы транспортных объектов изменились. Очевидно, что перечисленными выше аспектами область исследования транспортных узлов не может и не должна ограничиваться. Фокус известных направлений логистической науки связан с конкретными функциональными областями логистики – складирование, управление запасами, транспортировка – и не включает в рассмотрение комплекс указанных функций. В то же время развитие современного рынка давно поставило перед наукой и практикой вопросы комплексного оказания транспортно-

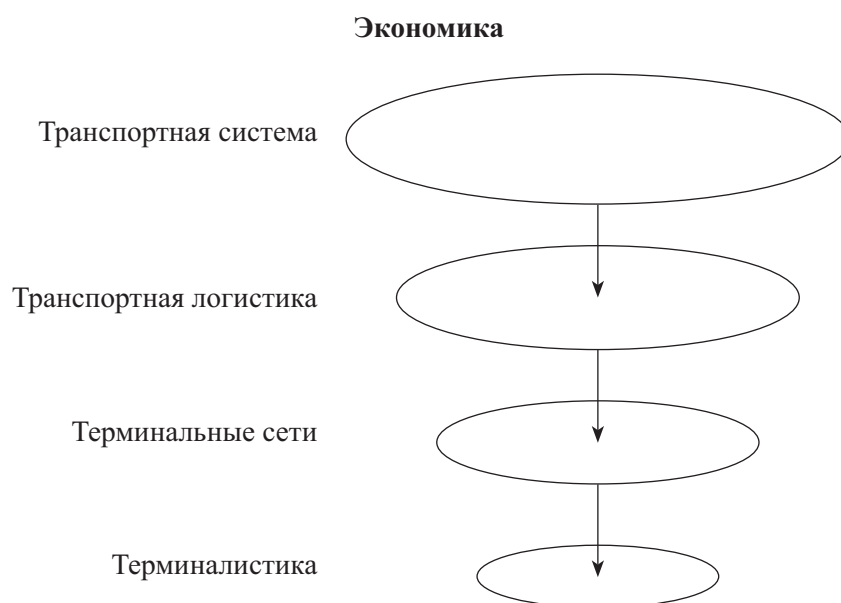


Рис. 3. Системные взаимосвязи терминалистики как нового научного направления

логистического и складского сервиса. Общественное требование времени – клиентоориентированность сервиса, логистические технологии работы, работа в одно окно, представление бесшовной сквозной услуги. Этим требованиям должна отвечать и система теоретических основ проектирования и развития транспортных узлов как ЛО [6, 7].

Комплексность транспортно-логистического и складского сервиса актуализирует группу ряда взаимосвязанных вопросов: количество, дислокация и зоны обслуживания транспортных узлов; эффективное сочетание видов транспорта для обслуживания транспортных узлов; концепция формирования и проектирования транспортных узлов; содержательное и параметрическое описание работы транспортных узлов; классификация и идентификация транспортных узлов; систематизация и расширение знаний в области логистики (аспект пространственного формирования терминальных сетей как совокупности транспортных узлов) [5].

Это прежде всего требует актуализации имеющегося научно-практического опыта в сфере проектирования и эксплуатации транспортных узлов в части логистического аспекта. Следует переходить к комплексным решениям логистики «под ключ», к чему давно уже пришли провайдеры полного цикла. Обновление, группировка функциональных областей логистики объективно требует оформления в эволюционный уровень развития логистики как науки – ее комплексное, междисциплинарное направление – терминалистику.

Этапы фрагментарного развития отдельных областей логистики (информации, запасов, складирования, транспорта) уже пройдены. В современном мире логистика выходит на сетевой, комплексный уровень развития указанных областей во взаимосвязи. И именно в транспортных узлах фокусируются, пересекаются все перечисленные сферы [3].

В связи с этим назрела необходимость выделения самостоятельного научного направления, адаптированного к реалиям рынка и сфокусированного на комплексном логисти-

ческом изучении транспортных узлов и терминальных сетей – терминалистики, науки о формировании, проектировании и управлении терминальными сетями, узловыми элементами которых являются ЛО различного формата (транспортные узлы).

Ключевое отличие терминалистики от известных в настоящее время научных направлений в ее интегрированной миссии и фокусе на ЛО любой сложности (от складов и терминалов до транспортных узлов и логистических городов), что показано на рис. 4.

В фокусе изучения терминалистики находится ЛО – логистический объект в соответствии с иерархией. В частности, транспортный узел любой сложности может быть изучен с позиций терминалистики во всех аспектах его функционирования, а не только с позиций описанного выше традиционного подхода.

Под **ЛО** предлагается понимать объекты инфраструктуры, физически обеспечивающие реализацию транспортно-складского обслуживания различных клиентов, сосредоточенные по совокупности признаков в пространственно определенном районе. В частности, **железнодорожными** предлагается называть ЛО, относящиеся к терминально-складской инфраструктуре железных дорог, выполняющие функции узловых элементов терминально-логистической системы по техническому обеспечению и практическому выполнению услуг погрузки, выгрузки, хранения и распределения грузов, включая доведение грузов до конечного потребителя, при взаимодействии с участниками системы доставки и другими видами транспорта [5].

Терминалистика формирует комплексную методологию исследования ЛО, основываясь на связанных и базовых теориях. В качестве связанных теорий выступают техника и технология работы склада, а также региональная экономика. Базовыми теориями выступают логистические. Так, внешняя логистика предполагает проектирование терминальных сетей, а внутренняя – проектирование узло-



Рис. 4. Область и объект исследования терминалистики [5]

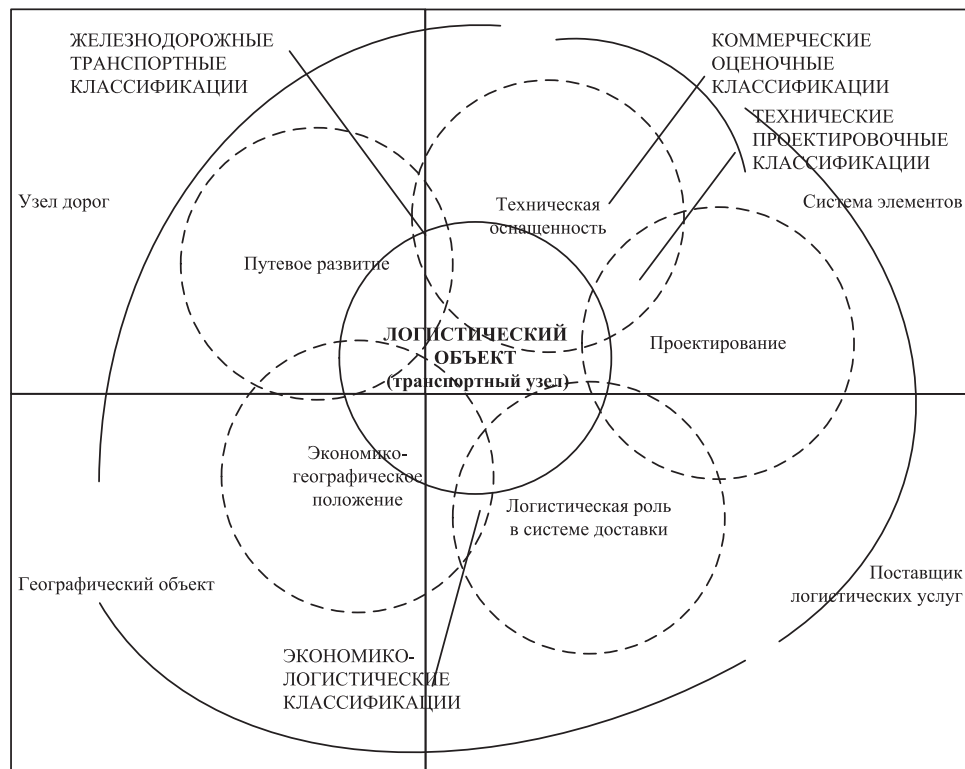


Рис. 5. Сравнение существующих классификаций транспортных узлов (составлено на основе анализа работ [8–25])

вых ЛО терминальных сетей – терминалов, транспортных узлов.

Рассмотрим отличие подхода терминалистики от традиционного подхода на примере дефиниций и типологии транспортных узлов, а также места и состава подходов, имеющих в железнодорожной литературе. На рис. 5 показаны результаты анализа научной транспортной литературы, посвященной транспортным узлам, в частности их классификации.

Наблюдаются следующие подходы к типологии транспортных узлов с учетом их дефиниций: железнодорожный (транспортный узел – узел дорог, географический объект) [8–14]; коммерческий оценочный и технический проектировочный (транспортный узел – система элементов, локальный транспортно-складской объект) [17, 18, 21–24]; экономико-логистический (транспортный узел – географический объект, поставщик логистических услуг) [15, 16, 19, 20].

Ключевыми признаками этих классификаций являются: путевое развитие, техническая оснащенность, проектирование, логистическая роль в системе доставки, экономико-географическое положение. Например, железнодорожный аспект понимания и типологии транспортных узлов охватывает только такие области как техническая оснащенность, путевое развитие и экономико-географическое положение.

Терминалистика же, согласно рис. 3 и 4, позволяет концентрированно оформить теоретико-методологическую базу связанных дисциплин и подходов в единое научное направление знаний о транспортных узлах. Все указанные области (ареалы) формируют комплекс исследований для терминалистики.

Думается, сегодня более чем достаточно оснований искать новые пути соединения накопленного научно-методологического и практического опыта для изучения транспортных узлов.

Усложнение ассортимента логистического сервиса, множество подходов к организации работы транспортных узлов, повышение качественных требований объективно требуют

оформления в самостоятельную отрасль всех знаний о транспортных узлах с позиций современной логистики.

Таким образом, терминалистика, как методологическое направление, даст экономически и технологически обоснованные решения по проектированию терминальных сетей и транспортных узлов как основы транспортно-логистических систем регионов, начиная от формирования концепции грузодвижения и строительства узловых ЛО и заканчивая комплексными программами транспортно-логистического развития инфраструктуры отдельных регионов и всей страны [26, 27].

Библиографический список

1. Покровская О.Д. Терминалистика как новое научное направление / О.Д. Покровская // Путь науки. The Way of Science. – 2014. – № 3 (3). – С. 21–24.
2. Покровская О.Д. Транспортно-логистические системы регионов, терминалистика / О.Д. Покровская // Экономика России : прошлое, настоящее, будущее : колл. монография / под общ. ред. Н.А. Адамова. – М. : Ин-т исследования товародвижения и конъюнктуры оптового рынка, 2014. – С. 116–143.
3. Pokrovskaya O.D. Terminalistica as a new methodology for the study of transport and logistics systems of the regions / O.D. Pokrovskaya // Sustainable economic development of regions: monograph. Vol. 3. Ed. by L. Shlossman. – Vienna: East West Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH, 2014. – P. 154–177.
4. Pokrovskaya O.D. Chi terminelistica reale come una nuova direzione scientific / O.D. Pokrovskaya // Italian Science Review. – 2016. – Vol. 1 (34). – P. 112–116. – URL: <http://www.ias-journal.org/archive/2016/january/Pokrovskaya.pdf> (дата обращения: 20.08.2016).
5. Покровская О.Д. О сущности терминалистики как нового научного направления / О.Д. Покровская // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2016. – № 7–1. – С. 61–66.
6. Покровская О.Д. Содержательное описание логистического центра и его роли в системе

МТК / О.Д. Покровская, Е.К. Коровяковский // Изв. ПГУПС. – 2014. – Вып. 3 (40). – С. 22–28.

7. Покровская О.Д. Логистика терминалов: перспективное направление логистики / О.Д. Покровская, Е.К. Коровяковский // Изв. ПГУПС. – 2015. – Вып. 3 (44). – С. 155–164.

8. Ефименко Ю.И. Железнодорожные станции и узлы / Ю.И. Ефименко, В.И. Апатцев, Н.В. Правдин и др. / под ред. В.И. Апатцева, Ю.И. Ефименко. – М. : ФБГОУ «УМЦ по образованию на ж.-д. транспорте», 2014. – 450 с.

9. Правдин Н.В. Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы) / Н.В. Правдин, С.П. Вакуленко, А.К. Головнич и др. / под ред. Н.В. Правдина, С.П. Вакуленко. – М. : Маршрут, 2014. – 1086 с.

10. Бройтман Э.З. Железнодорожные станции и узлы / Э.З. Бройтман. – М. : Маршрут, 2004. – 372 с.

11. Числов О.Н. Научно-методический комплекс классификации железнодорожных узлов (на примере Северо-Кавказской железной дороги – филиала ОАО «РЖД») / О.Н. Числов, В.В. Хан // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 24–28. – URL : <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=16956> (дата обращения: 20.08.2016).

12. Савченко И.Е. Железнодорожные станции и узлы / И.Е. Савченко, С.В. Земблинов, И.И. Страковский. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1967. – 467 с.

13. Земблинов С.В. Основы построения транспортных узлов / С.В. Земблинов, В.А. Бураков, А.М. Обермейстер, А.А. Поляков, В.А. Персианов, К.К. Таль, В.П. Ходатаев / под общ. ред. С.В. Земблинова. – М. : Транспорт, 1959. – 447 с.

14. Стыковые пункты транспортных узлов / под ред. К.Ю. Скалова, Г.С. Молярчук. – М. : Транспорт, 1977. – 184 с.

15. Елисеев С.Ю. Система логистического управления взаимодействием с морскими и речными портами и другими видами транспорта: монография / С.Ю. Елисеев. – М. : ВИНТИ РАН, 2005. – 96 с.

16. Балалаев А.С. Транспортно-грузовые системы железных дорог : учеб. пособие / А.С. Балала-

ев, И.А. Чернышова, А.Ю. Костенко. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2006. – 108 с.

17. Маликов О.Б. Перевозки и складирование товаров в цепях поставок : монография / О.Б. Маликов. – М. : ФБГОУ «УМЦ по образованию на ж.-д. транспорте», 2014. – 536 с.

18. Журавлев Н.П., Маликов О.Б. Транспортно-грузовые системы : учебник для вузов ж.-д. транспорта. – М. : ФБГОУ «УМЦ по образованию на ж.-д. транспорте», 2005. – 438 с.

19. Прокофьева Т.А. Логистические центры в транспортной системе России / Т.А. Прокофьева, В.И. Сергеев : учеб. пособие. – М. : Издат. дом «Экономическая газета», 2012. – 522 с.

20. Миротин Л.Б. Логистика, технология, проектирование складов, транспортных узлов и терминалов / Л.Б. Миротин, А.В. Бульба, В.А. Демин. – Ростов н/Д. : Феникс, 2009. – 408 с.

21. Классификация складских помещений Knightfrank. – URL : <http://www.knightfrank.ru/resources/pdf/research/ind.pdf> (дата обращения: 20.08.2016).

22. Europlatforms. ECE/TRANS/WP.24/2011. URL : <http://www.europlatforms.eu/> (дата обращения : 20.08.2016).

23. Дыбская В.В. Управление складированием в цепях поставок / В.В. Дыбская. – М. : Альфа-Пресс, 2009. – 720 с.

24. Еловой И.А. Терминологический словарь-справочник по транспортной логистике (на русском, немецком и французском языках) / И.А. Еловой, Е.В. Малиновский, Л.П. Лазарева, Н.А. Гришанкова, Т.С. Ярош, Т.А. Грибач. – Гомель : БелГУТ, 2011. – 167 с.

25. Ваксман С.А. Транспортные системы городов: терминологический словарь / С.А. Ваксман, И.Н. Пугачев, Ю.И. Куликов. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. – 151 с.

26. Покровская О.Д. «Сбитый прицел» клиентоориентированности / О.Д. Покровская // Ресурс журн. «РЖД-Партнер», публ. от 20.06.2016, мнения. – URL : <http://www.rzd-partner.ru/interviews/mneniia/sbityi-pritsel-klientoorientirovannosti/?print> (дата обращения : 20.08.2016).

27. Покровская О.Д. Нелогичная логистика / О.Д. Покровская, О.Б. Маликов // Гудок. – 2016. – 21.07. – Вып. № 122 (26027). – С. 4. – URL : <http://>

www.gudok.ru/newspaper/?ID=1344429&archive=2016.07.21 (дата обращения: 20.08.2016).

References

1. Pokrovskaya O. D. Terminalistika kak novoe nauchnoe napravlenie. Put' nauki [Terminalistics as a new research area]. *The Way of Science*, 2014, no. 3 (3), pp. 21–24. (In Russian)
2. Pokrovskaya O. D. Transportno-logisticheskie sistemy regionov, terminalistika [Regional transport and logistics systems, terminalistics]. *Jekonomika Rossii: proshloe, nastoyashchee, budushchee: ucheb. posobie* [Russian Economy: the past, the present and the future. Textbook]. Ed. by N.A. Adamova. Moscow, Institut issledovaniya tovarodvizheniya i konjunktury optovogo rynka Publ., 2014, pp. 116–143. (In Russian)
3. Pokrovskaya O. D. Terminalistics as a new methodology for the study of transport and logistics systems of the regions. *Sustainable economic development of regions: monograph*. Ed. by L. Shlossman. Vienna, East West Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH, 2014, vol. 3, pp. 154–177.
4. Pokrovskaya O. D. Chi terminelistica reale come una nuova direzione scientific. *Italian Science Review*, 2016, vol. 1 (34), pp. 112–116. URL: <http://www.ias-journal.org/archive/2016/january/Pokrovskaya.pdf> (retrieved on: 20.08.2016).
5. Pokrovskaya O. D. O sushchnosti terminalistiki kak novogo nauchnogo napravleniya [On the nature of terminalistics as a new research area]. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [Current issues of humanities and natural science], 2016, no. 7–1, pp. 61–66. (In Russian)
6. Pokrovskaya O. D. & Korovyakovskij E. K. Soderzhatel'noe opisanie logisticheskogo tsentra i ego roli v sisteme MTK [Informal description of a logistics center and its role in the ITC system]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [The Saint Petersburg Transport University Bulletin]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, issue 3 (40), pp. 22–28. (In Russian)
7. Pokrovskaya O. D. & Korovyakovskij E. K. Logistika terminalov: perspektivnoe napravlenie logistiki [Terminal logistics: an upcoming trend in logistics]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [The Saint Petersburg Transport University Bulletin]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2015, issue 3 (44), pp. 155–164. (In Russian)
8. Efimenko Ju. I., Apattsev V. I. & Pravdin V. I. *Zheleznodorozhnye stantsii i uzly* [Railway stations and hubs]. Eds: V. I. Apattsev, Ju. I. Efimenko. Moscow, FBGOU UMTs ZhDT Publ., 2014, 450 p. (In Russian)
9. Pravdin N. V., Vakulenko S. P. & Golovnich A. K. *Proektirovanie infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta (stantsii, zheleznodorozhnye i transportnye uzly)* [Planning the rail transport infrastructure (stations, railway and transport hubs)]. Eds: N. V. Pravdin, S. P. Vakulenko. Moscow, Marshrut Publ., 2006, 2014. 1086 p. (In Russian)
10. Brojtman E. Z. *Zheleznodorozhnye stantsii i uzly* [Railway stations and hubs]. Moscow, Marshrut Publ., 2004, 372 p. (In Russian)
11. Chislov O. N. & Khan V. V. Nauchno-metodicheskij kompleks klassifikatsii zheleznodorozhnykh uzlov (na primere Severo-Kavkazskoj zheleznoj dorogi – filiala OAO «RZD») [A methodological complex of railway hub classification (as exemplified by the North-Caucasian Railway, a branch of OAO RZD)]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Current science and education issues], 2014, no. 6, pp. 24–28. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=16956> (retrieved on: 20.08.2016). (In Russian)
12. Savchenko I. E., Zemblinov S. V. & Strakovskij I. I. *Zheleznodorozhnye stantsii i uzly* [Railway stations and hubs]. Edition 2, revised and enlarged. Moscow, Marshrut Publ., 1967, 467 p. (In Russian)
13. Zemblinov S. V., Burakov V. A., Obermeister A. M., Poyalkov A. A., Persianov V. A., Tal' K. K. & Khodataev V. P. *Osnovy postroeniya transportnykh uzlov* [Basics of transport hub construction]. Ed. by S. V. Zemblinova. Moscow, Transport Publ., 1978, 1959, 447 p. (In Russian)
14. *Stykovye punkty transportnykh uzlov* [Transport hub division joints]. Eds: K. Ju. Skalova, G. S. Mol'yarchuk. Moscow, Transport Publ., 1977, 184 p. (In Russian)
15. Eliseev S. Ju. *Sistema logisticheskogo upravleniya vzaimodejstviem s morskimi i rechnymi portami i drugimi vidami transporta* [A logistical manage-

ment system for interaction with sea and river ports and other types of transportation]: a monograph. Moscow, VINITI (Russian Institute for Scientific and Technical Information) RAS Publ., 2005, 96 p. (In Russian)

16. Balalaev A. S., Chernyshova I. A. & Kostenko A. Ju. *Transportno-gruzovye sistemy zheleznikh dorog* [Railway transport and cargo systems]: textbook. Khabarovsk, DVGUPS Publ., 2006, 108 p. (In Russian)

17. Malikov O. B. *Perevozki i skladirovanie tovarov v tsepyakh postavok* [Transport and storage of goods in supply chains]: a monograph. Moscow, FBGOU UMTs ZhDT Publ., 2014, 536 p. (In Russian)

18. Zhuravlev N. P. & Malikov O. B. *Transportno-gruzovye sistemy* [Cargo transportation systems]: railway college textbook. Moscow, FBGOU UMTs ZhDT Publ., 2005, 438 p. (In Russian)

19. Prokof'eva T. A. & Sergeev V. I. *Logisticheskie tsentry v transportnoj sisteme Rossi* [Logistic centers in Russia's transport system]: a textbook. Moscow, Jekonomicheskaya gazeta Publ., 2012, 522 p. (In Russian)

20. Mirotin L. B., Bul'ba A. V. & Demin V. A. *Logistika, tekhnologiya, proektirovanie skladov, transportnykh uzlov i terminalov* [Logistics, technology and planning of warehouses, transport hubs and terminals]. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2009, 408 p. (In Russian)

21. *Klassifikatsiya skladskikh pomeshchenij Knight-frank* [A Knight Frank classification of warehouse premises]. URL: <http://www.knightfrank.ru/resources/pdf/research/ind.pdf> (retrieved on: 20.08.2016). (In Russian)

22. *Europlatforms*. ECE/TRANS/WP.24/2011. URL: <http://www.europlatforms.eu/> (retrieved on: 20.08.2016). (In Russian)

23. Dybskaya V. V. *Upravlenie skladirovaniem v tsepyakh postavok* [Storage management in supply chains]. Moscow, Alfa-Press Publ., 2009, 720 p. (In Russian)

24. Elovoy I. A., Malinovskij E. V., Lazareva L. P., Grishankova N. A., Yarosh T. S. & Gribach T. A. *Terminologicheskij slovar'-spravochnik po transportnoj logistike (na russkom, nemetskom i frantsuzskom yazykakh)* [Dictionary of transport logistics terms (In Russian, German and French)]. Gomel', BelGUT Publ., 2011, 167 p. (In Russian)

25. Vaksman S. A., Pugachev I. N. & Kulikov Ju. I. *Transportnye sistemy gorodov: terminologicheskij slovar'* [Urban transport systems: a dictionary of terms]. Khabarovsk, Tikhookeanskij gosudarstvennyj universitet [Pacific National University] Publ., 2013, 151 p. (In Russian)

26. Pokrovskaya O. D. «*Sbityj pritsel*» klientoorientirovannosti. *Resurs zhurnala «RZhD-Partner»* [The hindsight of customer centricity. Materials of the "RZD-Partner" magazine]. URL [http://www.rzd-partner.ru/interviews/mnenia/sbityi-pritsel – klientoorientirovannosti/?print](http://www.rzd-partner.ru/interviews/mnenia/sbityi-pritsel-klientoorientirovannosti/?print) (retrieved on: 20.08.2016). (In Russian)

27. Pokrovskaya O. D. & Malikov O. B. *Nelogichnaya logistika* [Illogical logistics]. *Gudok*, 2016, 21.07, issue 122 (26027), p. 4. URL: <http://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1344429&archive=2016.07.21> (retrieved on: 20.08.2016). (In Russian)

*ПОКРОВСКАЯ Оксана Дмитриевна – канд. техн. наук, доцент, insight1986@inbox.ru (Сибирский государственный университет путей сообщения); КОРОВЯКОВСКИЙ Евгений Константинович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, ekorky@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 656.073:658.8

О. Д. Покровская, О. Б. Маликов**ВОПРОСЫ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ИЕРАРХИИ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Дата поступления: 25.08.2016

Решение о публикации: 16.12.2016

Цель: Предложить систему иерархии железнодорожных складских объектов с позиций эволюции логистического сервиса. **Методы:** Использован аналитический метод исследования. **Результаты:** Разработан эволюционно-функциональный подход, применимый в качестве методологии исследования зарождения и развития транспортных узлов. Предложено определение логистического объекта в общем случае как объекта инфраструктуры, физически обеспечивающего реализацию транспортно-складского обслуживания различных клиентов, сосредоточенный по совокупности признаков в пространственно определенном районе. Проведен анализ существующего в нормативной документации подхода к иерархии железнодорожных объектов терминально-складской инфраструктуры, выявлены его недостатки. В частности, отмечено, что существующая система типологии объектов железнодорожной инфраструктуры, участвующих в терминально-логистическом бизнесе компании «РЖД», недостаточно исчерпывающая и не в полной мере логистическая, поскольку не отражает многообразия типов логистических объектов на железных дорогах и их потенциальной функциональной мощности с позиций современной логистики. Разработана логистическая иерархия железнодорожных объектов терминально-складской инфраструктуры. Предложена визуализация эволюционно-функционального подхода в виде двумерной матрицы-определителя для упрощения идентификации типа логистического объекта. В матрице-определителе учитываются количественные и качественные параметры, позволяющие установить тип логистического объекта любой сложности с учетом их трехуровневой эволюции. **Практическая значимость:** Двумерная матрица-определитель может использоваться при идентификации типа любого логистического объекта, а не только железнодорожного, причем любой сложности. Она может найти применение при проектировании транспортных узлов, стратегическом планировании транспортно-экономического развития агломераций и формировании национальной логистической инфраструктуры на сети железных дорог. На основе вышеизложенного построена схема типового процесса формирования и развития мультимодального логистического объекта, применимая для любого объекта терминально-складской инфраструктуры.

Эволюционно-функциональный подход, логистический объект, иерархия, матрица-определитель, железнодорожный транспорт.

***Oksana D. Pokrovskaya**, Cand. Eng., insight1986@inbox.ru (Siberia State Transport University); **Oleg B. Malikov**, D. Eng., professor, stadnitskey@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State University of Transport) CONCERNING THE LOGISTICS HIERARCHY OF RAILWAY FACILITIES

Objective: Suggest a hierarchy system for railway facilities from the evolutionary standpoint of logistics service. **Methods:** An analytical research method was employed. **Results:** A functional evolutionary approach was developed and applied as a research method for emergence and growth of transport hubs. It is suggested that a logistics facility be generally defined as an infrastructural asset that physically provides storage-retrieval service for various customers, which is, based on a set of attributes, concentrated in a

spatially defined area. The existing approach toward the hierarchy of railway facilities that prevails in the regulatory documents of terminal and warehousing infrastructure was analyzed and its disadvantages elucidated. In particular, it was noted that the existing typology system for the railway infrastructure facility participating in OAO RZD's terminal and logistics business is not exhaustive and not fully logistical, since it does not reflect the multiple types of logistic railway facilities on and their potential functional capacity in terms of contemporary logistics. A logistical hierarchy of railway facilities of the terminal and warehousing infrastructure was developed. A visualized representation of the functional evolutionary approach in the form of a two-dimensional defining matrix to simplify the identification of the logistics facility type. The defining matrix accounts for quantitative and qualitative parameters allowing to determine the type of a logistics facility of any complexity with account for their three-level evolution. **Practical importance:** The two-dimensional defining matrix may be used in the identification of any type of logistics facility and not only a railway one, with any degree of complexity involved. It can find use in the planning of transport hubs, strategic planning of transport and economic development of an agglomeration and the formation of a national logistic infrastructure on a railway network. Based on the above, a scheme was built for a typical process of formation and development of a multi-modal logistics facility, applicable to any terminal or warehouse infrastructure facility.

Functional evolutionary approach, logistics facility, hierarchy, defining matrix, rail transport.

Актуальность и цель работы

В Транспортной Стратегии РФ на период до 2030 г. предусматривается создание опорной сети транспортно-логистических центров в ключевых регионах страны [1]. Существующая сеть объектов терминальной сети ОАО «РЖД» представлена на рис. 1 [2].

Анализ программных документов [2, 3] показал, что принятая на сегодняшний день система типологии объектов железнодорожной инфраструктуры, участвующих в терминально-логистическом бизнесе компа-

нии «РЖД», недостаточно исчерпывающая и не в полной мере логистическая, поскольку не отражает многообразия типов логистических объектов на железных дорогах и их потенциальной функциональной мощности с позиций современной логистики.

В документах [2, 3] предлагается следующая иерархия и типология логистических объектов (далее – ЛО): железнодорожный порт («сухие порты» – тыловая инфраструктура морских портов); терминально-логистический центр (сетевой мультимодальный технологический комплекс, совокупность специализи-

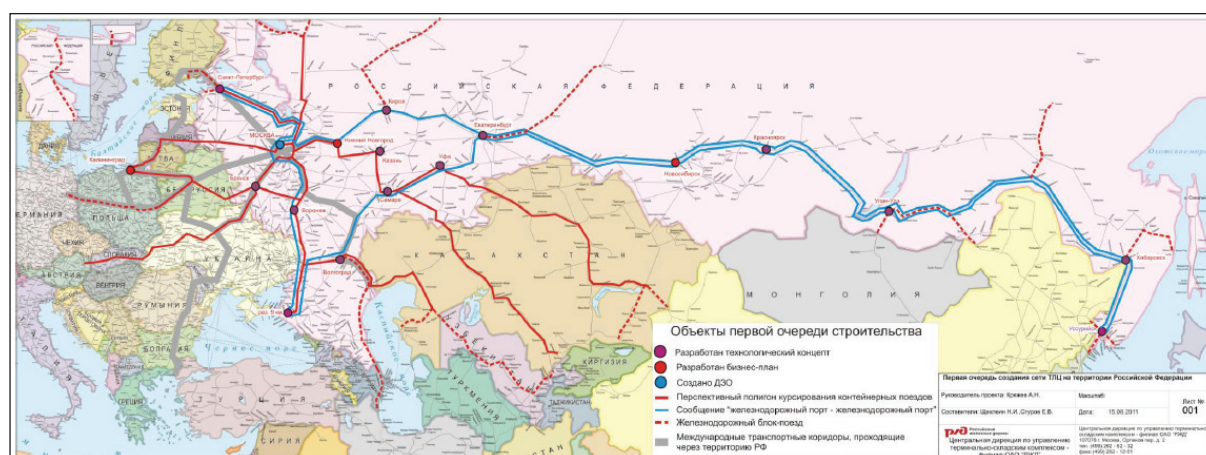


Рис. 1. Размещение ключевых объектов терминальной сети ОАО «РЖД»

рованных и универсальных терминалов) и спутник (удаленный объект терминально-логистического центра (ТЛЦ) либо специализированный терминал).

Иерархическое представление рассматриваемых объектов «железнодорожный порт => ТЛЦ => спутник» недостаточное, поскольку не отражает эволюции, а также особенностей функционирования каждого из указанных объектов. Кроме того, искусственно упрощена типология железнодорожных объектов (до трех типов!), что обедняет знание о них. По нашему мнению, при иллюстрации эволюционного развития, лежащего в основе приведенной иерархии, стало бы очевидной как идентификация различных типов объектов, так и очередность инвестирования перспективных объектов на сети железных дорог.

В основу предлагаемой в этих документах типологии железнодорожных ЛО положены такие факторы как близость мест погашения/зарождения грузопотока, достаточное путевое развитие станции примыкания, наличие свободных площадей для перспективного развития.

Безусловно, все перечисленные факторы справедливы и важны, но следует отметить, что масштабный и объемный признаки не всегда говорят о функциональности объекта и не характеризуют его особенности именно как логистического, а не просто технического или инфраструктурного объекта для ОАО «РЖД». Требуют проработки вопросы генезиса, развития и трансформации ЛО, полезные для эффективного проектирования, построения и эксплуатации терминальной сети на железных дорогах страны, что позволит позиционировать ОАО «РЖД» как полноценного multifunctional транспортного логистического оператора (провайдера 4-PL уровня) [4, 5].

Та или иная стадия функционального развития является определяющей при выборе технической оснащенности, ассортимента и целевого сегмента транспортно-логистических услуг, совершенствовании технологии работы, механизма организации и межэлементного

взаимодействия таких сложных систем как транспортные узлы. Вышеперечисленное послужило основанием для выбора темы данного исследования.

Цель этой работы – предложение системы иерархии железнодорожных ЛО с позиций эволюции логистического сервиса.

Состояние вопроса в транспортно-логистической науке

В научной литературе по транспорту [6–11] и логистике [12–18] описано большое количество классификаций ЛО, однако эти подходы не в полной мере отражают логистическую функциональность таких объектов. Приведем часть аналитических материалов, подробно представленных в [19].

Как показывает анализ, в отечественной литературе имеются два подхода к сущности ЛО железных дорог – физическое представление (грузовой терминал) [6–13, 15, 17] как низшей ступени их эволюции и виртуальное (информационный центр) [14, 16, 18] как высшей. Очевидно, что доминирует физическое представление сущности ЛО железных дорог.

Обзор литературных источников выявил, что в транспортной науке транспортный узел традиционно рассматривался как ключевой элемент инфраструктуры для трансформации (передачи) грузопотоков с одних направлений на другие, а также для обслуживания крупных населенных и промышленных пунктов. В большинстве научных работ акцент сделан на путевом развитии узлов (в том числе перспективное генеральное планирование и интеграция в населенный и/или промышленный центр) [6–10], а также на экономико-географических особенностях их функционирования и технической оснащенности [7, 12–15, 17].

Однако логистический аспект работы транспортных узлов и их интеграции в терминальную сеть страны до сих пор не получил достаточного внимания. Этим вопросом

в различной постановке занимались такие отечественные ученые как О. Б. Маликов [11, 12], В. И. Апатцев [6], С. Ю. Елисеев [16], А. С. Балалаев [15] и др.

Требуется, таким образом, рассматривать ЛО во всем их типовом многообразии, комплексно, не опровергая ни один из перечисленных выше подходов, но интегрируя их в единую систему.

Усматривается сквозная проблема, заключаемая в «нелогистичности» и «неклиентоориентированности» типологий ЛО. Парадоксально, что каждый объект классификаций, который является железнодорожной станцией, портом, узлом, складом, терминалом и т. д. и выполняет логистические функции, никак не определяется в каких-либо общих, универсальных терминах логистики (как, например, это сделано в Европейском Союзе [20] или же в Белоруссии [21]).

Быть может поэтому ОАО «РЖД» до сих пор не стало крупнейшим в стране транспортно-логистическим оператором 4-PL уровня, предоставляя высококачественный сервис, но не ориентируя информацию о нем на потенциального клиента [4, 5].

К сожалению, вышесказанное позволяет сделать неутешительный вывод о доминировании упрощенческого подхода к логистике. Всем классификациям присуще отклонение от существенных для клиента параметров. Наиболее очевидно это проявляется в классификациях ЛО как объектов коммерческой недвижимости [22]. Следовательно, классификации и складов, и железнодорожных узлов, и грузовых железнодорожных станций лишены клиентоориентированности.

Это позволяет сформулировать эволюционно-функциональный подход, универсальный для объектов логистической инфраструктуры различного типа.

Понятийный аппарат

Введем ряд определений. В общем случае **логистический объект (ЛО)** – узловой

элемент системы транспортно-складской инфраструктуры, выполняющий комплекс логистических функций в системе доставки груза от начального поставщика до конечного потребителя.

В предлагаемой иерархической системе под **ЛО** понимаются объекты инфраструктуры, физически обеспечивающие реализацию транспортно-складского обслуживания различных клиентов, сосредоточенные по совокупности признаков в пространственно определенном районе.

В частности, для системы железнодорожного транспорта выделяется **железнодорожный ЛО** – объект терминально-складской инфраструктуры железнодорожного транспорта, выполняющий функции узлового элемента терминально-логистической системы по техническому обеспечению и практическому выполнению услуг погрузки, выгрузки, хранения и распределения грузов, включая доведение грузов до конечного потребителя, при взаимодействии с участниками системы доставки и другими видами транспорта.

Основные положения научной новизны исследования

1. Эволюционно-функциональный подход, применимый в качестве методологии исследования зарождения и развития транспортных узлов.

2. Система иерархии ЛО с учетом функциональной стадии их развития.

3. Методика идентификации типа ЛО в форме двумерной матрицы-таблицы.

Рассмотрим их.

Двумерная матрица – это таблица, интегрирующая и учитывающая два типа показателей – качественного и количественного выражения, которые важны при определении типа ЛО. **Двумерная матрица-определитель** (рис. 2) позволяет определить тип ЛО любой сложности с учетом уровневой эволюции объектов по количественным и качественным параметрам.

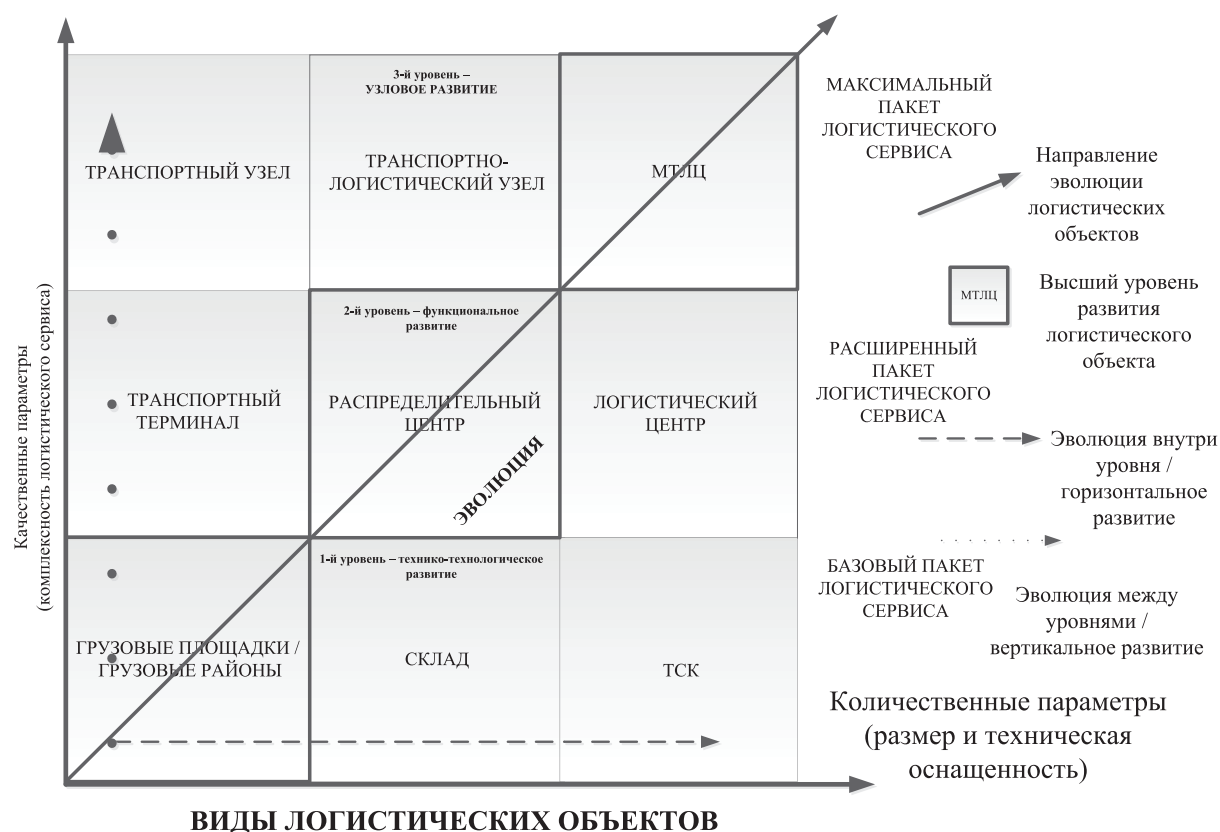


Рис. 2. Матрица-определитель типа железнодорожного ЛО

Количественные параметры ЛО (площадь, количество погрузочно-разгрузочных механизмов, объем грузопереработки и т. д.) по горизонтали и *качественные* параметры ЛО (ассортимент транспортно-логистических услуг, предоставление комплексного «бесшовного» сервиса, работа «в одно окно», клиентоориентированность и т. д.) по вертикали образуют систему из девяти сегментов, на пересечении которых определяется тип ЛО с учетом этих параметров.

Градация количественных параметров (слева направо) показывает иерархический тип ЛО на каждом уровне.

Отметим при этом, что матрица-определитель – это система иерархии в упрощенном визуальном виде, а не математический график.

В матрице-определителе все типы ЛО систематизированы в порядке увеличения величин по двум критериям: количественным

(слева направо: горизонталь и горизонтальная стрелка), качественным (снизу вверх: вертикаль и вертикальная стрелка).

При этом стрелки являются не координатными осями, а являются направляющими эволюции (увеличения значений) количественных и качественных параметров.

Двумерность означает не только учет двух типов параметров, но и двух направлений эволюции – горизонтальное (внутри одного и того же уровня) и вертикальное (между уровнями).

Эволюция типа ЛО, на наш взгляд, напрямую связана с ассортиментом оказываемого логистического сервиса, который предлагается разделить на базовый, расширенный и максимальный пакет услуг.

Базовый пакет: оказание стандартных услуг «транспорт + хранение».

Расширенный пакет: к стандартному базовому пакету услуг добавляются «околотран-

спортные», такие как маркировка, сортировка, упаковка, подгруппировка, оформление документации и др.

Максимальный пакет: в расширенный пакет услуг включаются услуги, существенно повышающие добавленную стоимость груза (товара): предпродажная подготовка, сборка (монтаж), обогащение, т. е. активное преобразовательное воздействие на потребительские свойства груза (товара). Тем самым услуга ЛО становится комплексной, поскольку оказывается «от одного лица» и пространственно в одном месте. Это и показывает вертикальная стрелка на рис. 2.

Каждому уровню соответствует свой ассортимент сервиса. Эволюция типа объекта внутри уровня идет по горизонтали, т. е. определяется количественными показателями исходя из объемов работы (площадь хранения, уровень технической оснащенности). Это, в свою очередь, можно считать границами между типами объектов.

Предлагаемый эволюционно-функциональный подход к иерархии ЛО является мобильным, а границы между объектами – гибкими. Именно поэтому система типологии делится укрупненно на три уровня, каждому из которых могут соответствовать три типа ЛО.

Цель такого подхода – в первую очередь систематизация типологии разнообразных ЛО, нежели установление жестких границ, что и невозможно сделать в условиях турбулентной экономики. Этим объясняются и плавающие границы типологии ЛО.

В качестве примера можно привести случай, когда простейший складской объект при строительстве вблизи него участка федеральной автомобильной трассы трансформируется в логистический центр, впоследствии – инфраструктурную основу транспортного коридора, наращивая грузоперерабатывающие мощности, как количественный признак, так и ассортимент сервиса, как качественный.

А учет двух параметров – количественных и качественных – позволяет более четко определить тип ЛО. Так, оказание множества простых и, следовательно, недорогих логистических услуг не приведет к существенному повышению потребительских свойств товара и соответственно цены товара для конечного потребителя. Это и отражает эволюционно-функциональный подход, который является концептуальным, универсально применимым к любым ЛО. Проверить его адекватность возможно в любых реальных условиях, например, в условиях логистической инфраструктуры любой городской агломерации. Данный подход иллюстрирует опыт формирования логистической инфраструктуры Новосибирска и Новосибирской области [23], для которой справедливой является схема на рис. 3.

Универсальный и упрощенный пример реализации подхода иллюстрирует рис. 3.

Эволюционное развитие ЛО представлено **направлением** (стрелка через затемненные сегменты) и тремя **уровнями**, начиная от низшего к высшему.

Направление развития ЛО предполагает прохождение трех ключевых этапов (за-



Рис. 3. Типовой процесс формирования и развития мультимодального ЛО

темненные сегменты): грузовые площадки/районы (начальный), распределительный центр (промежуточный), мультимодальный транспортно-логистический центр (МТЛЦ) (высший развитый), связанное с последовательным переходом на принципиально новый уровень развития.

Первый уровень – технико-технологическое развитие. Три нижних сегмента иллюстрируют технико-технологическое развитие ЛО на железнодорожном транспорте при минимальных качественных и количественных параметрах.

Так, три нижних сегмента (грузовые площадки/районы, склад, терминально-складской комплекс (ТСК)) – это начальный этап развития, на котором при постоянно минимальных качественных параметрах наблюдается рост количественных параметров (слева направо). Исходя из предлагаемой системы иерархии, наивысшей (самой крупной по технико-технологическому развитию) формой ЛО на таком уровне является ТСК. Параметры ЛО на данном уровне ограничены: для качественных параметров – стандартными услугами погрузки, выгрузки и хранения груза; для количественных – ЛО (элементами) складского хозяйства железнодорожной станции.

Второй уровень – функциональное развитие. По достижению достаточного уровня технико-технологического развития железнодорожные ЛО переходят на следующий новый уровень развития, формируя пакет дополнительных логистических функций.

Так, три сегмента в центре матрицы (транспортный терминал, распределительный центр, логистический центр) – это промежуточный этап развития, на котором при достигнутом постоянном уровне средних количественных параметров наблюдается рост количественных параметров (слева направо). Исходя из предлагаемой системы иерархии, наивысшей (самой представительной по функциональному сервису) формой ЛО на данном уровне является логистический центр. Параметры ЛО на данном уровне ограничены: для качественных параметров – минимальным пакетом

логистических услуг по погрузке, выгрузке и хранению груза, включая сервис добавленной стоимости; для количественных – более крупными самостоятельными и/или интегрированными объектами относительно складского хозяйства отдельной железнодорожной станции.

Третий уровень – узловое развитие. Обладая достаточной технической оснащенностью и реализуя определенный набор транспортно-логистических услуг, ЛО выходит на высший уровень эволюции – узловой. На этом уровне формируется пространственно и функционально более мощный объект транспортно-логистической инфраструктуры, включающий в себя несколько объектов не только железнодорожного, но и взаимодействующих видов транспорта, интегрированный как в сеть транспортных коридоров, так и в экономику отдельных географических районов/населенных пунктов/агломераций.

Так, три сегмента в верхней части матрицы (транспортный узел, транспортно-логистический узел, МТЛЦ) – это высший этап развития, на котором при достигнутом постоянном уровне высокоразвитых количественных параметров наблюдается рост их количественных параметров (слева направо). Исходя из предлагаемой системы иерархии, наивысшей (по сложности модульной структуры) формой ЛО на данном уровне является МТЛЦ. Параметры ЛО на таком уровне ограничены: для качественных параметров – максимально расширенным пакетом логистических услуг добавленной стоимости, реализуемых «от одного лица» «в одно окно» по «бесшовной сквозной технологии» с включением различных видов транспорта и усложнением цепи поставок; для количественных – крупнейшими по масштабу и функционалу пространственными образованиями сложного по числу участников и объектов состава, территориально разнесенными по территории нескольких субъектов РФ (транспортных узлов, агломераций, экономических районов), но функционально и технологически связанных.

Полученная таким образом матрица-определитель позволяет предложить типовую эволюционную схему развития (на примере МТЛЦ) с учетом трансформации инфраструктурных условий и происходящих процессов. Типовой процесс образования и развития мультимодального ЛО показан в общем виде на рис. 3, на котором совмещены три направления эволюции: эволюция типологий, логистических процессов и условий деятельности объектов.

Каждая стрелка, обозначающая переход к следующей форме эволюционного развития, подписана сверху (трансформация условий работы объекта) и снизу (трансформация процессов сервиса, реализуемого объектом на данном этапе развития). Как видно по рис. 3, каждый последующий этап (как интеграция предыдущих) сопровождается увеличением масштаба логистической деятельности, усложнением модульной структуры ЛО (подключение других видов транспорта, дополнительного путевого и складского развития и др.).

Направление эволюции идет от 6 (простейшего) до 0 (развитого) уровня. Этапы 5.1 и 5.2 (на рис. 3 отмечены*) при некоторых условиях объект в своем развитии может миновать. Так, склад (этап 4) может сразу трансформироваться в накопительно-распределительный центр, предоставляя услуги дистрибуции и управления партиями груза, при быстром путевом (транспортном) развитии и близости «выхода» на транспортный коридор и/или пути сообщения иного вида транспорта, т. е. при наличии условий мультимодальности.

Выводы

1. Эволюция логистического сервиса определяет тип ЛО и поэтому положена в основу их типологии.

2. Разработана логистическая иерархия железнодорожных объектов терминально-складской инфраструктуры.

3. Подход, охарактеризованный в данной работе, предлагается рассматривать как **эволюционно-функциональный**, применимый в качестве методологии исследования зарождения и развития транспортных узлов.

Предложена визуализация эволюционно-функционального подхода. В частности, разработана методика идентификации типа ЛО в графическом виде – как двумерной матрицы-определителя. Двумерная матрица-определитель может использоваться при идентификации типа любого ЛО, а не только железнодорожного, причем любой сложности. Может найти применение при проектировании транспортных узлов, стратегическом планировании транспортно-экономического развития агломераций и формировании национальной логистической инфраструктуры на сети железных дорог.

4. Проанализирован существующий в программной документации подход к иерархии железнодорожных объектов терминально-складской инфраструктуры, выявлены его недостатки.

5. Построена схема типового процесса формирования и развития мультимодального ЛО, применимая для любого объекта терминально-складской инфраструктуры любого вида транспорта с позиций логистики.

6. Проведен анализ литературных источников, посвященных вопросам классификации ЛО. Общими замечаниями стали: отсутствие единой системы классификации ЛО, «нелогичность» и «некомплексность» отражения их параметров (либо только путевое развитие, в этом случае под объектом понимается железнодорожный узел, либо только аспект грузопереработки, в этом случае объектом является простейший склад без детализации особенностей его формата). Полагаем, что это связано с отсутствием единого понятийного аппарата логистической инфраструктуры в принципе, различными целями классификаций и пониманием сущности ЛО.

На решение таких проблем и направлены научные исследования, результаты которых изложены в настоящей статье.

Библиографический список

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. – М., 2008. – 183 с.
2. Концепция создания терминально-логистических центров на территории Российской Федерации. – М., 2012. – 79 с.
3. Концепция комплексного развития контейнерного бизнеса в холдинге ОАО «РЖД». – М., 2012. – 97 с.
4. Покровская О. Д. «Сбитый прицел» клиентоориентированности / О. Д. Покровская // Ресурс журн. «РЖД-Партнер», публ. от 20.06.2016, мнения. – URL : <http://www.rzd-partner.ru/interviews/mneniia/sbityipritsel-klientoorientirovannosti/?print> (дата обращения: 20.08.2016).
5. Покровская О. Д. Нелогичная логистика / О. Д. Покровская, О. Б. Маликов // Гудок. – 2016. – 21.07. – Вып. № 122 (26027). – С. 4. – URL : <http://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1344429&archive=2016.07.21> (дата обращения: 20.08.2016).
6. Ефименко Ю. И. Железнодорожные станции и узлы / Ю. И. Ефименко, В. И. Апатцев, Н. В. Правдин и др. / под ред. В. И. Апатцева, Ю. И. Ефименко. – М. : ФБГОУ «УМЦ по образованию на ж.-д. транспорте», 2014. – 450 с.
7. Правдин Н. В. Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы) / Н. В. Правдин, С. П. Вакуленко, А. К. Головнич и др. / под ред. Н. В. Правдина, С. П. Вакуленко. – М. : Маршрут, 2014. – 1086 с.
8. Савченко И. Е. Железнодорожные станции и узлы / И. Е. Савченко, С. В. Земблинов, И. И. Страковский. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1967. – 467 с.
9. Стыковые пункты транспортных узлов / под ред. К. Ю. Скалова, Г. С. Молярчук. – М. : Транспорт, 1977. – 184 с.
10. Бройтман Э. З. Железнодорожные станции и узлы / Э. З. Бройтман. – М. : Маршрут, 2004. – 372 с.
11. Журавлев Н. П. Транспортно-грузовые системы : учебник для вузов ж.-д. транспорта / Н. П. Журавлев, О. Б. Маликов. – М. : ФБГОУ «УМЦ по образованию на ж.-д. транспорте», 2005. – 438 с.
12. Маликов О. Б. Перевозки и складирование товаров в цепях поставок : монография / О. Б. Маликов. – М. : ФБГОУ «УМЦ по образованию на ж.-д. транспорте», 2014. – 536 с.
13. Гаджинский А. М. Современный склад / А. М. Гаджинский. – М. : Проспект, 2005. – 176 с.
14. Прокофьева Т. А. Логистические центры в транспортной системе России : учеб. пособие / Т. А. Прокофьева, В. И. Сергеев. – М. : Издат. дом «Экономическая газета», 2012. – 522 с.
15. Балалаев А. С. Транспортно-грузовые системы железных дорог : учеб. пособие / А. С. Балалаев, И. А. Чернышова, А. Ю. Костенко. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2006. – 108 с.
16. Елисеев С. Ю. Система логистического управления взаимодействием с морскими и речными портами и другими видами транспорта : монография / С. Ю. Елисеев. – М. : ВИНТИ РАН, 2005. – 96 с.
17. Дыбская В. В. Управление складированием в цепях поставок / В. В. Дыбская. – М. : Альфа-Пресс, 2009. – 720 с.
18. Миротин Л. Б. Логистика, технология, проектирование складов, транспортных узлов и терминалов / Л. Б. Миротин, А. В. Бульба, В. А. Демин. – Ростов н/Д. : Феникс, 2009. – 408 с.
19. Покровская О. Д. Терминалистика : общие вопросы / О. Д. Покровская. – Казань : Бук, 2016. – 142 с.
20. Europlatforms. ECE/TRANS/WP.24/2011. – URL : <http://www.europlatforms.eu> (дата обращения: 20.08.2016).
21. Классификация складских помещений Knightfrank. – URL : <http://www.knightfrank.ru/resources/pdf/research/ind.pdf> (дата обращения: 20.08.2016).
22. СТБ 2047-2010. Логистическая деятельность. Термины и определения. – Минск : Госстандарт, 2010. – 20 с.
23. Покровская О. Д. Роль Новосибирского мультимодального транспортного узла в транспортно-логистическом кластере России / О. Д. Покровская, М. А. Зачешигрова // Изв. ПГУПС. – 2015. – Вып. № 3 (44). – С. 85–103.

References

1. *Transportnaya strategiya Rossijskoj Federatsii na period do 2030 goda* [Transport strategy of the Russian Federation for until 2030]. Moscow, 2008, 183 p. (In Russian)
2. *Kontseptsiya sozdaniya terminal'no-logisticheskikh tsentrov na territorii Rossijskoj Federatsii* [The concept of creating terminal/logistics centers within the Russian Federation]. Moscow, 2012, 79 p. (In Russian)
3. *A concept of integrated development of a container business in the OAO RZD holding company*. Moscow, 2012, 97 p. (In Russian)
4. Pokrovskaya O. D. «Sbityj pritsel» klientoorientirovannosti [The hindsight of customer centricity. Materials of the «RZD-Partner» magazine]. URL: [http://www.rzd-partner.ru/interviews/mneniia/sbityi-pritsel – klientoorientirovannosti/?print](http://www.rzd-partner.ru/interviews/mneniia/sbityi-pritsel-klientoorientirovannosti/?print) (retrieved on: 20.08.2016). (In Russian)
5. Pokrovskaya O. D. & Malikov O. B. Nelogichnaya logistika [Illogical logistics]. *Gudok*, 2016, no. 122 (26027), p. 4. URL: <http://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1344429&archive=2016.07.21> (retrieved on: 20.08.2016). (In Russian)
6. Efimenko Ju. I., Apattsev V. I. & Pravdin N. V. *Zheleznodorozhnye stantsii i uzly* [Railway stations and hubs]. Eds: V. I. Apattsev, Ju. I. Efimenko. Moscow, FBGOU UMTs ZhDT Publ., 2014, 450 p. (In Russian)
7. Pravdin N. V., Vakulenko S. P. & Golovnich A. K. *Proektirovanie infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta (stantsii, zheleznodorozhnye i transportnye uzly)* [Planning the rail transport infrastructure (stations, railway and transport hubs)]. Eds: N. V. Pravdin, S. P. Vakulenko. Moscow, Marshrut Publ., 2014, 1086 p. (In Russian)
8. Savchenko I. E., Zemblinov S. V. & Strakovskij I. I. *Zheleznodorozhnye stantsii i uzly* [Railway stations and hubs]. Edition 2, revised and enlarged. Moscow, Marshrut Publ., 1967, 467 p. (In Russian)
9. *Stykovye punkty transportnykh uzlov* [Transport hub division joints]. Eds: K. Ju. Skalova, G. S. Mol-yarchuk. Moscow, Transport Publ., 1977, 184 p. (In Russian)
10. Brojtman Je. Z. *Zheleznodorozhnye stantsii i uzly* [Railway stations and hubs]. Moscow, Marshrut Publ., 2004, 372 p. (In Russian)
11. Zhuravlev N. P. & Malikov O. B. *Transportno-gruzovye sistemy* [Transport and cargo systems]: railway college textbook. Moscow, FBGOU UMTs ZhDT Publ., 2005, 438 p. (In Russian)
12. Malikov O. B. *Perevozki i skladirovanie tovarov v tsepyakh postavok* [Transport and storage of goods in supply chains]: a monograph. Moscow, FBGOU UMTs ZhDT Publ., 2014, 536 p. (In Russian)
13. Gadzhinskij A. M. *Sovremennyy sklad* [A warehouse today]. Moscow, Prospekt Publ., 2005, 176 p. (In Russian)
14. Prokofeva T. A. & Sergeev V. I. *Logisticheskie tsentry v transportnoj sisteme Rossii* [Logistic centers in Russia's transport system]: a textbook. Moscow, Jekonomicheskaya gazeta Publ., 2012, 522 p. (In Russian)
15. Balalaev A. S., Chernyshova I. A. & Kostenko A. Ju. *Transportno-gruzovye sistemy zheleznykh dorog* [Railway transport and cargo systems]: textbook. Khabarovsk, DVGUPS Publ., 2006, 108 p. (In Russian)
16. Eliseev S. Ju. *Sistema logisticheskogo upravleniya vzaimodejstviem s morskimi i rechnymi portami i drugimi vidami transporta* [A logistical management system for interaction with sea and river ports and other types of transportation]. Moscow, VINITI RAN, 2005, 96 p. (In Russian)
17. Dybskaya V. V. *Upravlenie skladirovaniem v tsepyakh postavok* [Storage management in supply chains]. Moscow, Alfa-Press Publ., 2009, 720 p. (In Russian)
18. Mirotin L. B., Bulba A. V. & Demin V. A. *Logistika, tekhnologiya, proektirovanie skladov, transportnykh uzlov i terminalov* [Logistics, technology and planning of warehouses, transport hubs and terminals]. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2009, 408 p. (In Russian)
19. Pokrovskaya O. D. *Terminalistika: obshchie voprosy* [Terminalistics: common questions]. Kazan, Buk Publ., 2016, 142 p. (In Russian)

20. *Europlatforms*. ECE/TRANS/WP.24/2011. URL: <http://www.europlatforms.eu/> (retrieved on: 20.08.2016).
21. *Klassifikatsiya skladskikh pomeshchenij Knightfrank* [*A Knight Frank classification of warehouse premises*]. URL: <http://www.knightfrank.ru/resources/pdf/research/ind.pdf> (retrieved on: 20.08.2016). (In Russian)
22. STB 2047-2010. *Logisticheskaya deyatel'nost'. Terminy i opredeleniya* [*Logistical activities. Terms and definitions*]. Minsk, Gosstandart Publ., 2010, 20 p. (In Russian)
23. Pokrovskaya O. D. & Zacheshigriva M. A. Rol' Novosibirskogo mul'timodal'nogo transportnogo uzla v transportno-logisticheskoy klastere Rossii [The role of the Novosibirsk multi-modal transport hub in Russia's transport and logistics cluster]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [*The Saint Petersburg Transport University Bulletin*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2015, issue 3 (44), pp. 85–103. (In Russian)

*ПОКРОВСКАЯ Оксана Дмитриевна – канд. техн. наук, insight1986@inbox.ru (Сибирский государственный университет путей сообщения); МАЛИКОВ Олег Борисович – доктор техн. наук, профессор, stadnitskey@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 625.031.3

Ю. С. Ромен

ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ ВЗАИМОУВЯЗАННЫХ ПРОФИЛЕЙ КОЛЕСА И РЕЛЬСА

Дата поступления: 20.06.2016

Решение о публикации: 27.09.2016

Цель: Улучшение динамических процессов взаимодействия подвижного состава и пути и уменьшения интенсивности износов в системе «колесо–рельс». **Методы:** Рассматривается влияние формы профиля контактирующих поверхностей колеса и головок рельса на процессы их взаимодействия в прямых и кривых. Приводятся основные этапы работ в области совершенствования поверхностей катания для локомотивов и вагонов на железных дорогах разных стран. **Результаты:** Показано, что на характер контакта влияют конструкция экипажной части, скорость движения и величина осевой нагрузки. Совокупность этих факторов делает невозможным разработку универсального профиля колеса для всех условий эксплуатации. Не имеет универсального решения и проблема контакта, который в различных условиях может быть одноточечным или двухточечным. Хотя из-за распределения колесной нагрузки по поверхностям касания при двухточечном контакте силы в местах контакта должны уменьшаться, в большинстве случаев в эксплуатации при проскальзывании в пологих кривых наблюдается повышенный износ. В то же время при одноточечном контакте в крутых кривых ухудшается напряженное состояние головки, что влияет на долговечность рельсов. Различие формы профиля у локомотивов и вагонов обуславливалось величинами диаметров колес и базы у паровозов, что в настоящее время отсутствует. Экономически необходимым является введение единого профиля. Радиус головки должен согласовываться с ребордой с тем, чтобы избежать двухточечного контакта, а при одноточечном избегать высоких давлений. **Практическая значимость:** Профильное шлифование рельсов позволяет сократить эксплуатационные расходы. Оптимальный профиль головки различен для прямых и крутых кривых, для наружного и внутреннего рельсов.

Профиль бандажа, шлифовка рельсов, износ рельсов, одноточечное касание, двухточечное касание

Yuri S. Romen, D. Eng., professor, uromen@mail.ru (Kharkov Polytechnical Institute national technical university) PRINCIPLES OF DEVELOPMENT OF COUPLED WHEEL AND RAIL PROFILES

Objective: Improve dynamic interaction processes between the rolling stock and the tracks and reduce the intensity of wear in the wheel and rail system. **Methods:** The impact that the profile shape of the contacting surfaces of the wheel and the railhead has on their interacting process is assessed in straight lines and curves. The main stages of work pertaining to the improvement of the tread surface for locomotives and railway cars on tracks in different countries are cited. **Results:** It was displayed that the nature of the contact is impacted by the structure of the undercarriage, the velocity of travel and the axle loading value. The combination of these factors makes it impossible to develop a universal wheel profile for all operating conditions. There is also no universal solution for the contact problem, which under varying conditions can be either single- or two-point. Despite the fact that due to the distribution of wheel load over the tread surfaces in the case of two-point contact the forces at the points of contact should decrease, in the majority of cases increased wear is detected during sliding in flat curves. At the same time, in the case of single-point contact, in steep curves, deterioration of the head under stress can be noted, affecting rail longevity. The difference in profile shape of locomotives and railway cars was due to the diameters of wheels and wheel bases of the steam locomotive, which is no longer the case. The introduction of a single profile is necessary from an economic standpoint. The radius of the head

should correspond to the flange in order to avoid two-point contact and, in the case of single-point contact, to avoid high pressure. **Practical importance:** Rail profile grinding allows for reducing operating costs. The optimum head profile differs for straight lines and steep curves and for exterior and inner rails.

Tire profile, rail grinding, rail wear, single-point contact, two-point contact

Введение

Безопасность движения и износные процессы взаимодействия подвижного состава и пути зависят от сочетания формы профиля контактирующих поверхностей системы «колесо–рельс», которые находятся под воздействием как относительного проскальзывания, так и нагрузок в кривых и прямых. Характер движения колесной пары в колее, обеспечивающий безопасность, силовые и износные процессы в системе, определяется как конструкцией и состоянием экипажной части, так и сопрягаемой формой поверхностей профиля бандажа колесной пары и рельса. Причем в прямых и кривых поверхности контакта на колесе и рельсе существенно различаются.

Смещение контакта при движении колесной пары в колее

В прямых зона контакта имеет место преимущественно в средней части поверхности катания обода, а в кривых поверхность контакта первой колесной пары смещается к основанию гребня наружного колеса и, следовательно, рабочей выкружке головки рельса. Такое различие условий работы системы «колесо–рельс» является основной сложностью в разработке мероприятий по снижению нагруженности и повышению ресурса ходовых частей.

Решение этой задачи, включающей определение формы профиля контактирующих поверхностей и их материалов в соответствии с условиями работы и требованиями эксплуатации, должно основываться на анализе динамики экипажа в прямых и круговых кривых при различных скоростях движения [1]. Процессы

взаимодействия при набегании колесной пары на рельс в круговых или переходных кривых, на стрелочных переводах, а также на неровностях пути существенно зависят от формы поверхностей контакта гребня колеса с головкой рельса. Сложность проблемы заключается в том, что в процессе движения поверхности контакта находятся под воздействием изменяющейся совокупности как относительного проскальзывания, так и нагрузок (вертикальных и горизонтальных).

Для прямых участков пути движение колесной пары в колее происходит с эпизодическим набеганием на рельс и соответственно плавность движения, как правило, обеспечивается при конусности поверхности катания колес и отвечающей подуклонке рельсов в 0,05 рад. У высокоскоростного подвижного состава эти углы рекомендуется уменьшать для обеспечения устойчивости движения.

Вследствие износов и перемещения точки контакта при смещениях колесной пары в колее чисто коническая форма поверхности катания колес кратковременна. Поэтому по рекомендациям МСЖД при определении динамических характеристик экипажей следует рассматривать эквивалентную конусность колесных пар в пределах 3 мм поперечного перемещения от среднего положения круга катания [2].

Для тяжеловесного движения на ряде дорог применяют «конформные профили» поверхностей катания, при которых нагрузка распределяется по большей площади контакта, снижая удельные давления, что уменьшает интенсивность износа. Однако у колес с конформным профилем наклон поверхности при выходе из зоны рабочего контакта в кривых дальше от гребня (при изменении очертания пути) имеется сравнительно большой угол эффективной конусности, что приво-

дит к уменьшению устойчивости движения экипажа. Поэтому, например, на рудовозной дороге Австралии, где эксплуатируется такой криволинейный профиль, максимальная скорость поездов составляет порядка 75 км/ч. Повышение скорости свыше 85 км/ч вызывает значительное увеличение интенсивности виляния [3].

Различие в условиях работы специализированных участков дорог для тяжеловесного или скоростного движения делает невыполнимым создание универсальных профилей колес и рельсов для любых условий эксплуатации.

После выбора зазора в колее наряду с качеством по поверхности контакта имеет место движение гребня по боковой грани головки рельса с проскальзыванием. В различных условиях контакт в системе «колесо–рельс» может быть одно- или двухточечным. Такая терминология подразумевает, конечно, касание не в точках, а на ограниченных поверхностях контакта. Поскольку радиус круга набегающего на гребне превышает соответствующий радиус катания по головке рельса, в точках касания имеет место проскальзывание с силами трения, величина которых зависит от многих факторов. Поэтому, несмотря на то, что из-за распределения вертикальной колесной нагрузки по поверхностям касания при двухточечном контакте, нормальные силы и напряжения в местах контакта в принципе должны уменьшаться, в большинстве случаев в эксплуатации в пологих кривых наблюдаются повышенный износ и выкрашивание материала при контактно-усталостных дефектах [4]. Однако в ряде работ указывается, что одноточечное контактирование оказывает отрицательное влияние на долговечность рельсов в крутых кривых, так как ухудшается напряженное состояние головки [5, 6]. Особенно это наблюдается при несогласованности форм поверхностей гребня колеса и головки рельса (изношенное колесо контактирует с новым рельсом и наоборот). Описание причин появления двухточечного контакта и его последствий для эксплуатации экипажа и пути появилось еще в конце XIX в.

Работы по выбору формы профиля

Выбор форм профилей вели непосредственно при создании системы «колесо–рельс». Коническая поверхность во многом обуславливалась технологическими аспектами изготовления литых колес. Одна из первых работ, касающихся кинематических принципов качения колеса по рельсу с обоснованием профиля поверхности катания и размещением гребня на колесе, принадлежит Стефенсону (см. [7]). Сделанное им в 1821 г. предложение об увеличении диаметра с наружной стороны колеса примерно на 3/16 дюйма и по сегодняшний день согласуется с параметром стандартной эффективной конусности (если эту величину отнести к ширине поверхности колеса в 4 дюйма, то получим ориентировочно 1/21) [8]. Такое устройство железнодорожного колеса принято во всех странах, но разные фирмы, соблюдая эти принципы, создавали колеса на свой вкус. По данным III СовеЩательного Съезда инженеров службы подвижного состава и тяги в 1881 г. на железных дорогах имелось 23 разновидности колес. Основное внимание при их создании уделялось выбору угла наклона и формы профиля гребня колеса. Однако, хотя разработка формы профилей колеса и рельса ведется уже более 100 лет, она далека от завершения, поскольку, как сказано выше, не существует единого оптимального профиля для всех условий эксплуатации. Основной причиной, по которой отказывались от цилиндрической поверхности катания жестко насаженных на ось колес, несмотря на отсутствие виляния колесной пары, была их не критичность к направлению движения в колее. При любых случайных угловых отклонениях от прямолинейного направления колеса ребордой набегало на рельс, обуславливая дополнительное сопротивление движению и повышенный износ системы.

Отдельно рассматривался вопрос о профиле реборды. В 1882 г. Поше (Rochet) предложил формулу для расчета отношения боковой силы на гребне к вертикальной нагрузке на колесо, необходимого для его всползания по

рельсу, которая легла в основу теории схода [9]. Из рассмотрения сил на гребне следовало, что чем больше его крутизна, тем выше безопасность от схода. Возрастание угла наклона реборды с 60 до 70° приводит к повышению допустимой величины отношения боковой силы к вертикальной нагрузке на 45% . Однако в кривых при набегании на рельс увеличение угла наклона гребня приводит к большей силе тяги, которая тратится на преодоление момента силы трения на гребне. Поэтому, по опытам Бесефера (Bäsefer), сопротивление на гребне с углом в 75° на 140% больше сопротивления при гребне с углом в 60° (см. [10]).

Существовало мнение, что в крутых кривых при большом угле наклона гребня, затрудняющего вползание на рельс, нормальная сила, разрушая поверхность соприкосновения на головке рельса, вызывает рост трения, увеличивая тем стремление к сходу. Марье [9] утверждал, что по данным двадцатилетней статистики сходов, с 1884 по 1904 г., число случаев сходов на английских железных дорогах, приходящихся на 1000 км пути, примерно одинаково для гребней с разными профилями. Тем не менее считалось, что колесо с большим диаметром сходит с рельса легче колеса с малым диаметром, поскольку легче поднимается при преодолении вертикальных неровностей, а также при разгрузке паровозного колеса противовесами [11]. Это проявляется также при прохождении стрелочных переводов. Потому многие фирмы для паровозов с колесами большого диаметра принимали гребни с углом наклона порядка 70° [12]. Для русских железных дорог форму профиля локомотивного гребня с учетом большой базы паровоза, увеличивающей угол набегания, предложил А. Л. Васютинский в 1898 г. [13].

Сложность задачи выбора формы профиля в системе заключается в том, что требуется рассматривать работу трех различных конструкций: колесная пара, рельс и стрелочный перевод. Каждая из этих взаимно влияющих конструкций имеет свои особенности в обслуживании, темпах и форме износов в про-

цессе своего жизненного цикла. Причем, если для колес и рельсов требовалось в основном увеличить живучесть конструкции, то для стрелочных переводов вопрос касался безопасности движения. Еще А. Л. Васютинский в 1924 г. писал: «Как служба Пути до сих пор не остановилась на едином типе стрелочного пера, так и Служба Тяги в выборе очертания бандажа, а особенно в очертании нормального гребня бандажа, проявляет большое разнообразие; Турция, Австрия, Румыния, Венгрия, Швеция, Сербия и Пруссия имеют одного типа бандаж... Россия, Франция, Дания, Египет, Италия, Голландия, Португалия, Испания, Германия и Америка имеют различные и отличные друг от друга бандажи». Высота гребня – от 27 – 33 мм.

В России товарные вагоны казенных железных дорог с 1891 г. имели колеса единого профиля с высотой гребня 25 мм при радиусе перехода порядка 14 мм. Радиус закругления головки рельса, имевшей уширение к низу, по рекомендациям 1902 г. составлял также 8 – 14 мм.

В 1926 г. был введен объединенный профиль для локомотивов и вагонов с углом наклона 60° , высотой гребня 28 мм и радиусом выкружки 15 мм. Он просуществовал до 1931 г. Затем для локомотивов угол наклона был увеличен до 70° , а высота гребня – до 30 мм. При этом необоснованно ссылались на угол наклона американского профиля, который почти не имел прямолинейной образующей при высоте гребня, не превышающей 1 дюйм.

В 1959 – 1960 гг. в связи с появившимися признаками недостаточной контактной прочности и износоустойчивости колес и рельсов во ВНИИЖТе были проведены теоретические и экспериментальные исследования по выбору рационального профиля колес. К этому времени прекратилось производство паровозов с колесами большого диаметра и жесткой базой, что позволило ставить вопрос об унификации профиля.

В 1978 г. Главным управлением локомотивного хозяйства МПС вместо разных про-

филей поверхности катания вагонных и локомотивных колес для опытного применения был утвержден единый профиль у обоих видов колес.

Существенное изменение условий эксплуатации в 1980-е годы, связанное с необходимостью обеспечения растущего объема перевозок и повышением грузонапряженности основных направлений сети железных дорог, привело к росту интенсивности износа гребней колес подвижного состава и бокового износа головки рельса в кривых. В связи с этим появилось много предложений, касающихся изменения профилей поверхности катания колеса и в первую очередь локомотивов, обрабатываемых на тяговых плечах со сложным планом и профилем пути. В результате были выпущены ГОСТы для локомотивных колесных пар, в каждом из которых приведен набор форм профилей на любой вкус. В «Инструкции по формированию колесных пар» № ЦТ-329 для тягового подвижного состава предусмотрено 8 профилей. Для вагонных колес в ГОСТ 9036-88 приведены 4 типа профилей. На Западно-Сибирской железной дороге на электровозах ВЛ10 используют 3 профиля бандажей. Заводы поставляют дорогам технику каждый по своим условиям. Поэтому часто при ТР-3, чтобы скомплектовать колесные пары с одинаковыми бандажами, их приходится обтачивать заново, что приводит к необходимости работать в разных депо на различных станках по разнообразным технологиям [14]. Причем в разных цехах одного депо могут обтачивать колеса по различным профилям. Например, в депо «Пермские Моторы» и «Мотовилиха» одновременно обтачивают тепловозы по профилю ДМетИ ЛР и по ГОСТ 11018-2000 [15].

Введение единого профиля является экономически необходимым. Это обуславливается еще и тем, что в России нет специализированных дорог и большая часть подвижного состава обращается поэтому в среднестатистических условиях. Следует учесть, что после определенного периода приработки различие в первоначальной обточке исчезает, и интен-

сивность износа начинает зависеть в основном от состояния экипажной части и условий эксплуатации подвижного состава.

Мероприятия для оптимизации работы системы «колесо–рельс»

Основным критерием при разработке профиля колеса, взаимно увязанного с профилем головки рельса, является отсутствие влияния и минимизация контактных напряжений, что приводит к уменьшению интенсивности износа. Высоту гребня следует выбирать не более 28 мм с тем, чтобы уменьшить появление остроконечного наката [14]. Форма нового профиля должна выбираться такой, чтобы ее изменение было минимальным в течение всего срока службы. Радиус рабочей грани наружных рельсов должен согласовываться с ребордой и плавно переходить в очертание головки с тем, чтобы избежать двухточечного контакта, а при односточечном обеспечивать достаточно большое пятно соприкосновения во избежание высоких удельных давлений. Поскольку область контакта непрерывно смещается, радиус головки должен быть несколько меньше переходного радиуса гребня.

Эксплуатационные расходы можно снизить за счет шлифовки рельса под оптимальный профиль головки [16], который различен для прямых и крутых кривых. Рабочую грань головки рельса и наружную обрабатывают по-разному. В Австрии, где вначале шлифование ввели с целью устранения волнообразного износа, в настоящее время асимметричное шлифование головок рельсов проводится при текущем содержании пути. При этом наблюдается увеличение срока службы рельсов до 50 %.

Заключение

Одним из средств снижения интенсивности износа в системе «колесо–рельс» и сокра-

щения затрат топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов в современных условиях является совершенствование профилей поверхностей катания колеса и рельса. Форма профиля колес у локомотивов и вагонов исторически обуславливалась различием величины диаметров колес и наличием большой жесткой базы у паровозов, что в настоящее время отсутствует. Введение единого профиля колеса является общепризнанным и экономически необходимым. При этом разработка взаимоувязанных профилей должна вестись отдельно для линий скоростного и высокоскоростного движения, специализируемых под грузовое и тяжеловесное движение, а также для работающих в условиях совмещенной эксплуатации.

На первом этапе, не ожидая завершения работ по оптимизации профилей, необходимо ввести единую высоту гребней колесных пар локомотивов и вагонов, исключаящую передачу тягового усилия от локомотивов через гребень колеса на боковую грань головки рельсов. Форма профиля должна выбираться такой, чтобы ее изменение было минимальным в течение всего срока службы. Радиус рабочей грани наружных рельсов должен согласовываться с ребордой и плавно переходить в очертание головки с тем, чтобы избежать двухточечного контакта, а при одноточечном контакте обеспечивать достаточно большое пятно соприкосновения во избежание высоких удельных давлений. Следует организовать профильную обработку рельсов в кривых и прямых участках пути с применением рельсошлифовальных поездов для придания головке рельсов оптимальной конфигурации и удаления основ зарождения усталостных дефектов в зависимости от условий работы каждого из участков дорог.

Разработка и введение обобщенного профиля для всех локомотивов и вагонов наряду с профильным шлифованием рельсов должно получить статус общегосударственной программы повышения экономической эффективности работы железнодорожного транспорта.

Библиографический список

1. Коссов В.С. Гармонизация параметров локомотивной тяги и инфраструктуры с точки зрения воздействия на скорости и веса поездов и оптимизации перевозочного процесса / В.С. Коссов // Бюл. Объед. учен. совета ОАО «РЖД». – 2010. – № 4. – С. 1–18.
2. Стандарт МСЖД 518 ОР. Испытание и утверждение железнодорожных экипажей с точки зрения их динамических характеристик. – М., 2005. – С. 3–5.
3. Marich S. Assessment of Wheel/Rail Interaction and Vehicle Dynamics at BHP Iron Ore, INHA, STS-Conference “Wheel/Rail Interface” / S. Marich, P. Bartle, R. Bowey, A. Cowin, G. Offereins, M. Moynan. – Moscow, 1999, June 14–17. – P. 67–77.
4. Захаров С.М. Работоспособность колеса и рельса. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения : вопросы взаимодействия колеса и рельса / С.М. Захаров. – М. : Интекст, 2002. – 408 с.
5. Лукьянов А.В. Влияние износа колес на контактно-усталостные повреждения рельсов / А.В. Лукьянов // Вестник ВНИИЖТ. – 1982. – № 4. – С. 39–42.
6. Мелентьев Л.П. Влияние формы головки рельса на интенсивность развития бокового износа и дефекта / Л.П. Мелентьев // Тр. ЦНИИ МПС. – М. : Трансжелдориздат, 1961. – Вып. 220. – С. 123–142.
7. Ромен Ю.С. Динамика железнодорожного экипажа в рельсовой колее. Методы расчета и испытаний / Ю.С. Ромен. – М. : ВМГ-Принт, 2014. – 210 с.
8. Dendy Marshall C.F. A History of British Railways down to the Year 1830 / Dendy C.F. Marshall. – London : Oxford University Press, 1938. – P. 147–148.
9. Марье Г. Взаимодействие пути и подвижного состава / Г. Марье. – М. : Госжелдориздат, 1933. – 338 с.
10. Николаев И.И. Теория и конструкция паровозов. Динамика и парораспределение паровозов / И.И. Николаев. – М. : ГНТИ, 1939. – 424 с.
11. Мейнеке Ф. Краткий курс паровозостроения / Ф. Мейнеке. – М. : Трансжелдпроиздат, 1938. – 308 с.
12. Хейман Х. Направление железнодорожных экипажей рельсовой колеей / Х. Хейман. – М. : Трансжелдориздат, 1957. – 416 с.

13. XVI СовеЩательный съезд инженеров службы пути русских железных дорог. – М., 1898.

14. Ликратов Ю. Колесо анфас и в профиль / Ю. Ликратов // Гудок. – 2006. – 13.01.

15. Буйносов А. П. Выбор профиля бандажей колесных пар тепловозов, исходя из критерия максимального ресурса колесных пар до обточки / А. П. Буйносов, И. М. Пышный // Тяжелое машиностроение. – 2011. – № 4. – С. 5–11.

16. Шох И. Асимметричное шлифование рельсов / И. Шох // Железные дороги мира. – 2006. – № 1. – С. 69–74.

References

1. Kossov V. S. Garmonizatsiya parametrov lokomotivnoy tyagi i infrastruktury s tochki zreniya vozdeystviya na skorosti i vesa poezdov i optimizatsii perevozhnogo protsessa [Harmonizing the locomotive traction parameters and infrastructure in terms of impact of train speed and weight and optimization of traffic]. *Byulleten ob'yedinennogo uchenogo soveta OAO "RZHD"* [The OAO RZD unified academic board bulletin], 2010, no. 4, pp. 1–18. (In Russian)

2. Standard of the UIC 518 OR. *Ispytanie i utverzhdenie zheleznodorozhnykh jekipazhej s tochki zreniya ikh dinamicheskikh kharakteristik* [Testing and approval of railway trains in terms of dynamic characteristics]. Moscow, 2005, pp. 3–5. (In Russian)

3. Marich S., Bartle P., Bowey R., Cowin A., Offermans G., Moynan M. Assessment of Wheel/Rail Interaction and Vehicle Dynamics at BHP Iron Ore. *IHHA, STS-Conference "Wheel/Rail Interface"*. Moscow, 1999, June 14–17, pp. 67–77.

4. Zakharov S. M. *Rabotosposobnost' kolesa i rel'sa. Obobshchenie peredovogo opyta tyazhelovesnogo dvizheniya: voprosy vzaimodejstviya kolesa i rel'sa* [Best practices of heavy locomotion: issues wheel and rail interaction]. Moscow, Intekst Publ., 2002, 408 p. (In Russian)

5. Luk'yanov A. V. Vliyanie iznosa koles na kontaktно-ustalostnye povrezhdeniya rel'sov [The impact of wheel wear on the contact damage of rails]. *Vestnik VNIIZhT* [The VNIIZhT Bulletin], 1982, no. 4, pp. 39–42. (In Russian)

6. Melentyev L. P. Vliyanie formy golovki rel'sa na intensivnost' razvitiya bokovogo iznosa i defekta. [The impact of the rail head shape on the intensity of side wear and defect emergence]. *Trudy TsNII MPS* [Works of the Central R&D Institute of the USSR Ministry of Transport]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1961, issue 220, pp. 123–142. (In Russian)

7. Romen Y. S. *Dinamika zheleznodorozhnogo jekipazha v rel'sovoj kolee. Metody rascheta i ispytaniy* [The dynamics of a railway train in track. Calculation and testing methods]. Moscow, VMG-Print Publ., 2014, 210 p. (In Russian)

8. Marshall C. F. *A History of British Railways down to the Year 1830*. London, Oxford University Press, 1938, pp. 147–148.

9. Mar'e G. *Vzaimodejstvie puti i podvizhnogo sostava* [The interaction of the track and the rolling stock]. Moscow, Goszheldorizdat Publ., 1933, 338 p. (In Russian)

10. Nikolaev I. I. *Teoriya i konstruktsiya parovozov. Dinamika i paroraspredelenie parovozov* [Locomotive theory and design. Dynamics and steam distribution of locomotives]. Moscow, GNTI Publ., 1939, 424 p. (In Russian)

11. Mejneke F. *Kratkij kurs parovozostroeniya* [Locomotive construction: a short course]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1938, 308 p. (In Russian)

12. Khejman Kh. *Napravlenie zheleznodorozhnykh jekipazhej rel'sovoj kolejoj* [The influence of the rail track on the direction of railway trains]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1957, 416 p. (In Russian)

13. XVI Soveshchatel'nyj syezd inzhenerov sluzhby puti russkikh zheleznykh dorog [The 26th convention of Russian rail track engineers]. Moscow, 1898. (In Russian)

14. Lикратов Ю. Колесо анфас и в профиль [The wheel: en face and in profile]. *Гудок*, 2006, Jan. 13.

15. Буйносов А. П. & Пышный И. М. Выбор профиля бандажей колесных пар тепловозов, исходя из критерия максимального ресурса колесных пар до обточки [Selecting the wheel tire profile for locomotive wheel pairs based on maximum life span of wheel pair prior to lathing]. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy engineering], 2011, no. 4, pp. 5–11. (In Russian)

16. Shokh I. Асимметричное шлифование рельсов [Asymmetrical rail grinding]. *Zheleznye dorogi mira* [World Railways], 2006, no. 1, 2006, pp. 69–74.

РОМЕН Юрий Семенович – доктор техн. наук, профессор, uromen@mail.ru (Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»).

УДК 539.4

В. И. Смирнов, С. С. Зозуля**ОЦЕНКА ЖИВУЧЕСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ
С ВНУТРЕННИМИ ПОПЕРЕЧНЫМИ ТРЕЩИНАМИ**

Дата поступления: 03.10.2016

Решение о публикации: 16.12.2016

Цель: Проанализировать и определить отношение долговечности железнодорожного рельса к продолжительности «жизни» внутренних поперечных трещин, смоделировать усталостный дефект на основе идеализированной круговой трещины в упругохрупком бесконечном теле (рельсе). **Методы:** Сбор, анализ и обработка результатов работ по долговечности железнодорожных рельсов и развитию трещин; моделирование и анализ разрушения. **Результаты:** Представленная методика определения эксплуатационного ресурса железнодорожных рельсов на стадии развития трещины является упрощенным вариантом одной из возможных расчетных схем. Получена зависимость живучести (долговечности) железнодорожного рельса от продолжительности «жизни» внутренних поперечных трещин. Выведены простые выражения для оценки критического количества циклов нагружения и допустимого объема перевозок в тоннах в зависимости от осевой нагрузки. **Практическая значимость:** Усовершенствование методики позволит осуществить более полный учет факторов, влияющих на долговечность рельса: остаточных и температурных напряжений, пластических деформаций у края трещины, скоростей движения, влияния соседних колесных пар и т. п. Изучение механизма возникновения и роста внутренних поперечных трещин позволит не только дать более точные оценки живучести рельсов, но и по возможности исключить или снизить вероятность появления подобных опасных дефектов. Прогнозирование процесса разрушения рельсов призвано обеспечить рациональную эксплуатацию путей в течение длительного срока.

Прочность, трещиностойкость, дисковидная трещина, изгиб балки, усталостное разрушение, долговечность рельса.

Vladimir I. Smirnov, E. Eng., associate professor, vsmirnov1@gmail.com; **Sergei S.*Zozulya**, postgraduate, sergzo@bk.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg Transport University) EVALUATION OF THE CRACK PROPAGATION LIFE OF DETAIL FRACTURES IN RAILS

Objective: Analyze and determine the relation between rail endurance and the “longevity” of internal transverse cracks and model the wear defect based on an ideal circular crack in an elastic-brittle infinite body (rail). **Methods:** Collect, analyze and process the results of research papers on rail longevity and crack formation; destruction modeling and analysis. **Results:** The resulting method for determining the rail operation life at the crack formation stage is a simplified version of one of the applicable calculation models. A relation was obtained between the endurance (service life) of a rail and the “longevity” of internal transverse cracks. Simple expressions were obtained to assess the quantity of stress cycles and permissible shipment volume depending on the axial load. **Practical importance:** Improvement of the method allows for a fuller assessment of factors impacting the rail longevity: residual and heat stress, plastic deformation at crack edge, travel velocities, impact of adjacent wheel pairs and so on. The research of the mechanism of emergence and growth of internal transverse cracks not only will allow for a more precise assessment of rail longevity and but, where possible, rule out or reduce the probability of occurrence of such hazardous defects. The purpose of the forecasting of the rail destruction process is to ensure optimum operation of rail tracks throughout a lengthy period of time.

Durability, crack resistance, penny-chaped crack, beam curve, fatigue damage, rail longevity.

Введение

Живучесть (долговечность) железнодорожного рельса в работах [1–3] связывается с продолжительностью «жизни» внутренних поперечных трещин в головке рельса (дефект 21 по классификации МПС). Данный тип дефекта является наиболее опасным с точки зрения безопасности движения поездов, поскольку его развитие происходит внутри рельса без каких-либо видимых признаков. По статистическим данным на железных дорогах США дефекты подобного типа составляют 25 % от общего количества дефектов на стыковом пути (bolted-joint rail) и 75 % – на бесстыковом (continuous welded rail) [4, 5]. На отечественных железных дорогах (стыковой путь) доля отказов по дефекту 21 составляет для незакаленных рельсов Р65 и Р75 соответственно 23 и 27 %, а для закаленных – 31 и 61 % [6].

В работах [1, 7] предлагается аппроксимировать форму трещины овалом четвертой степени. Данная конфигурация контура трещины в совокупности с необходимостью учета влияния границ головки рельса при больших размерах трещин приводит к неоправданному усложнению модели. Между тем лабораторные и натурные эксперименты [3, 8, 9] показывают, что при размерах (площади) дефекта от 5 до 50 % от площади головки рельса усталостная прочность достаточно хорошо описывается моделью бесконечного упругого тела, ослабленного дисковидной трещиной (penny-shaped crack), к берегам которой приложена равномерная нагрузка. Такая модель (для малых размеров дефекта) применялась также в работах [2, 10, 11].

Живучесть (долговечность) рельса, измеряемая допускаемым объемом перевозок грузов и пассажиров (тоннажем), определяется для рельса с размером трещины от 10 до 80 % от площади головки рельса (при достижении верхнего предела происходит излом рельса) [3]. Считается, однако, что более-менее надежное обнаружение внутренних поперечных трещин при современном уровне развития

ультразвуковой дефектоскопии возможно при их размерах (площади) не менее 10 % от площади головки рельса [4, 5], а достаточно уверенно инструментально идентифицировать данный дефект можно при его размерах не менее 30 % [9]. Практический интерес представляют именно небольшие по размерам трещины, не обнаруживаемые дефектоскопом, так как в противном случае рельс, согласно инструкции ЦП 2913 МПС, признается острodefектным и подлежит немедленной замене.

В настоящей работе делается попытка моделирования усталостного дефекта типа 21 на основе идеализированной круговой трещины в упругохрупком бесконечном теле (рельсе), подвергнутом действию растягивающего напряжения, вызванного единичным циклом нагружения колесом подвижного состава. Анализ разрушения проводится с использованием структурного критерия Новожилова [12]. Получены простые выражения для оценки критического количества циклов нагружения и допустимого объема перевозок в зависимости от осевой нагрузки.

Расчетная схема нагружения

Уравнение изгиба рельса как балки на сплошном упругом основании под действием сосредоточенной силы P имеет вид

$$EI \frac{d^2 w}{dx^2} = M, \quad (1)$$

где M – изгибающий момент; w – вертикальный прогиб; x – расстояние от рассматриваемого сечения до точки контакта колеса и рельса; I – момент инерции поперечного сечения рельса; E – модуль упругости рельсовой стали.

Дважды дифференцируя уравнение (1) по x , находим

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = \frac{d^2 M}{dx^2} = q, \quad (2)$$

где реакцию q можно выразить через модуль упругости рельсового основания U

$$q = -Uw. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2), получим

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4k^4 w = 0, \quad (4)$$

где k – коэффициент относительной жесткости рельсового основания

$$k = \sqrt[4]{\frac{U}{4EI}}.$$

Характеристическое уравнение $r^4 + 4k^4 = 0$ имеет корни $r_{1,2} = k(1 \pm i)$, $r_{3,4} = -k(1 \pm i)$. Следовательно, уравнение (4) имеет общий интеграл

$$w(x) = e^{-kx}(C_1 \cos kx + C_2 \sin kx) + e^{kx}(C_3 \cos kx + C_4 \sin kx).$$

Так как прогиб на бесконечности ($x \rightarrow \infty$) исчезает, то $C_3 = C_4 = 0$. Вместе с тем в точке контакта $x = 0$ касательная к линии изгиба рельса должна быть горизонтальна, т. е. $w'(0) = 0$. Отсюда имеем $C_1 = C_2 = C$. Тогда

$$w(x) = Ce^{-kx}(\cos kx + \sin kx). \quad (5)$$

Постоянную C находим из условия, что поперечная (перерезывающая) сила Q , представляющая сумму сил, действующих на одну сторону от взятого сечения, равна

$$Q = EIw'''(x). \quad (6)$$

В данном случае $Q = +P/2$, поэтому

$$\frac{d^3 w}{dx^3} = \frac{P}{2EI}.$$

Из (5) находим $w'''(x) = 4Ck^3 e^{-kx} \cos kx$. При $x = 0$ имеем

$$4Ck^3 = P / (2EI),$$

откуда $C = P / (8EI k^3)$. Подставляя это значение в (5), получаем

$$w(x) = \frac{P}{8EI k^3} e^{-kx} (\sin kx + \cos kx). \quad (7)$$

Дважды продифференцировав (8), согласно (1), найдем изгибающий момент

$$M(x) = \frac{P}{4k} e^{-kx} (\sin kx - \cos kx).$$

Перерезывающая сила, в соответствии с (7), равна

$$Q(x) = \frac{P}{2} e^{-kx} \cos kx.$$

Рассматривая рельс как балку на сплошном упругом основании, напряжение в нем определим по формуле

$$\sigma = \frac{M}{I} H, \quad (8)$$

где H – расстояние от центра трещины до нейтральной оси рельса. Максимум растягивающего напряжения достигается при $x = \pi / (2k)$. В этом сечении перерезывающая сила равна нулю и условия нагружения близки к чистому изгибу, потому $M = P e^{-\frac{\pi}{2}} / (4k)$. Так как коэффициент интенсивности напряжений для дисковидной трещины при равномерной нагрузке p равен $K_I = 2p \sqrt{\frac{a}{\pi}}$, то его максимальное значение будет

$$K_I^{\max} = \frac{PH}{2kI} \sqrt{\frac{a}{\pi}} e^{-\pi/2}. \quad (9)$$

Из выражения (9) можно найти допустимую нагрузку на ось экипажа (в килограммах): $q_* = 2P_* / g$ ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$), т. е.

$$q_* = \frac{4kIK_{Ic}}{gH} \sqrt{\frac{a}{\pi}} e^{\pi/2}. \quad (10)$$

Необходимые для расчета данные приведены в таблице, в которой обозначено: S_r – площадь головки рельса, a_n , a_k – начальный и конечный радиусы трещины.

Данные для расчета допустимой нагрузки

Тип рельса ¹	$I \cdot 10^{-8}, \text{м}^4$	$S_r \cdot 10^{-4}, \text{м}^2$	$H \cdot 10^{-2}, \text{м}$	$a_n \cdot 10^{-3}, \text{м}$	$a_k \cdot 10^{-3}, \text{м}$	$k^2, \text{м}^{-1}$
P50	1813	23,89	6,76	6,2	15,1	1,772
P65	3208	27,78	8,51	6,6	16,3	1,536
P75	4180	28,66	8,96	6,7	16,6	1,438

¹ Для приведенного износа рельса 6 мм.

² Щебеночный балласт, железобетонные шпалы 1840 шт./км, типовые подкладки [13].

Расчеты по формуле (10) показывают, что для трещин с размерами, не превышающими 30 % от площади головки рельса, допустимые нагрузки на ось многократно превышают эксплуатационные. Это справедливо и для трещин эллиптической формы [7], так как $\sigma_{\max}$, определяемое по формуле (8), при $x = \pi / 2k$ составляет при эквивалентной колесной нагрузке 20 т для кривого ($R = 300 \text{ м}$) участка пути на деревянных шпалах ($k = 0,928 \text{ м}^{-1}$) с учетом поправочного множителя $f = 1,65$ [13] (при расположении трещины близко к поверхности рельса) всего лишь 67,63 / 48,12 / 38,88 МПа для рельсов соответственно типа P50/P65/P75. Следовательно, максимум коэффициента интенсивности для трещин радиусом 16 мм не превышает $9,7 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$, в то время как трещиностойкость рельсовой стали составляет $27 \div 55 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ [8]. Таким образом, при малых размерах дефекта типа 21 неустойчивого развития трещины вряд ли следует ожидать (в случае больших трещин существенное влияние будет оказывать геометрия силовой схемы, т.е. близость поверхности рельса). Тем не менее такое положение дел не препятствует стабильному (усталостному) прорастанию внутренней поперечной трещины, так как при циклическом нагружении трещина может подрастать в каждом цикле нагружения при $K_I \ll K_{Ic}$. Отметим, что малость величины $K_I^{\max}$, по сравнению с критическим значением K_{Ic} , соответствует режиму многоциклового нагружения.

Для упрощения расчетов ограничимся рассмотрением воздействия одного колеса,

т.е. будем считать, что цикл нагрузки определяется проходом одной колесной пары. При необходимости можно учесть влияние близко расположенных колес и оценить суммарный изгибающий момент. В общем случае это потребует введения вероятностных характеристик, так как необходимо учесть различие в осности тележек, величине базы, а также случайный характер числа и взаимного сочетания вагонных тележек в поездах. В [1] описан частный случай для двухосных вагонных тележек.

Оценка живучести (долговечности) рельса

Для оценки долговечности рельса воспользуемся наиболее употребительным уравнением Пэриса роста усталостных трещин

$$\frac{da}{dN} = C \frac{(\Delta K_I)^m}{1 - R}, \quad (11)$$

где a – радиус трещины; N – количество циклов нагружения; C, m – экспериментально определяемые константы материала; ΔK_I – размах коэффициента интенсивности напряжений

$$\Sigma K_I = K_I^{\max} - K_I^{\min},$$

R – коэффициент асимметрии нагружения

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = K_I^{\min} / K_I^{\max}.$$

Минимальное (сжимающее) напряжение в рельсе имеет место непосредственно под колесом в точке $x = 0$. Изгибающий момент в этой точке $M(0) = -P / (4k)$. Тогда коэффициент асимметрии будет равен $R = -e^{-\pi/2} = -4,8$, а минимальное значение коэффициента интенсивности напряжений в цикле становится отрицательным, что в данной задаче не имеет физического смысла. Действительно, так как

$$\Delta K_I = K_I^{\max} - K_I^{\min} = K_I^{\max} (1 - R),$$

то уравнение (11) можно переписать в виде

$$\frac{da}{dN} = C (K_I^{\max})^m (1 - R)^{m-1}. \quad (12)$$

Для большинства материалов $2 \leq m \leq 5$, следовательно, если растягивающие напряжения в цикле близки к нулю ($R \rightarrow -\infty$), то из (12) вытекает, что разрушение должно произойти мгновенно ($da/dN \rightarrow \infty$). Такой результат, очевидно, неприемлем. Поскольку здесь принята модель идеально упругого тела, то в полупериоде сжатия трещина будет полностью закрываться, т.е. отсутствовать как концентратор напряжения и, следовательно, скорость роста трещины будет определяться только полупериодом растяжения [13, п. 3.5; 14, с. 301, 343]. Таким образом, полагаем $R = 0$ и считаем нагрузку пульсирующей. Такой подход в работах [3, 15] назван R -усечением (R -truncation).

Уравнение (12) – с разделяющимися переменными и легко интегрируется. С учетом (9) получаем допустимое число циклов

$$N = \frac{1}{C} \left(\frac{2kI\sqrt{\pi}}{PHe^{-\pi/2}} \right)^m \cdot \frac{a_k^{1-m/2} - a_n^{1-m/2}}{1 - m/2}.$$

Параметр C (в $(\text{Па}\sqrt{\text{м}})^{-m} \cdot \text{м/цикл}$) можно определить по формуле [14, с. 314]

$$C = 10^{-(4+6m)} \cdot \frac{1,7191}{977^m}.$$

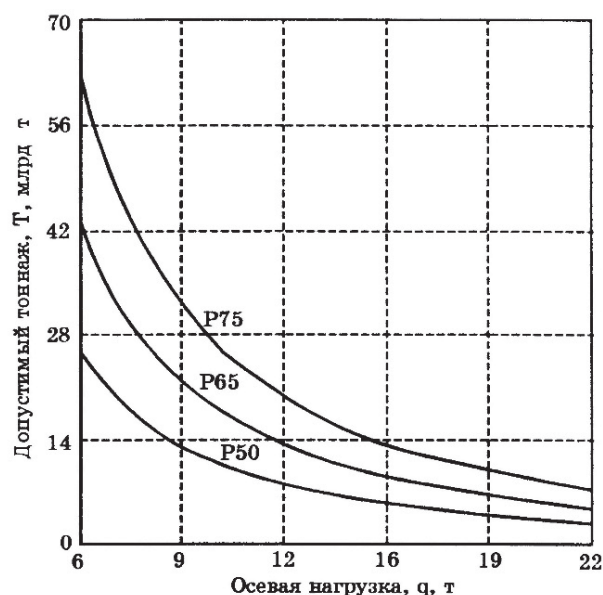
Величину m для рельсовой стали примем, как и в [1], в размере $m = 2,6$. Тогда $C =$

$= 7,3 \cdot 10^{-27}, (\text{Па}\sqrt{\text{м}})^{-2,6} \cdot \text{м/цикл}$. Для рельса Р65, например, число допустимых циклов при $P = 100 \cdot 10^3 \text{ Н}$ составит $N \approx 3 \cdot 10^8$.

В окончательном виде долговечность рельса выразим через объем перевозок T (в т)

$$T = \frac{q}{C} \left(\frac{4kI\sqrt{\pi}}{qgHe^{-\pi/2} \cdot 10^3} \right) \cdot \frac{a_k^{1-m/2} - a_n^{1-m/2}}{1 - m/2},$$

где q – средняя нагрузка на ось, т; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$. На рисунке приведена зависимость живучести T различных типов рельсов (в млрд т) от средней осевой нагрузки q (в т) при $m = 2,6$, $C = 7,3 \cdot 10^{-27}, (\text{Па}\sqrt{\text{м}})^{-2,6} \cdot \text{м/цикл}$ для исходных данных, приведенных в таблице.



Зависимость живучести T различных типов рельсов от средней осевой нагрузки q

Заключение

Рассмотренную методику определения эксплуатационного ресурса железнодорожных рельсов на стадии развития трещины (размером от 5 до 30% от площади головки рельса) следует рассматривать как упрощенный вариант одной из возможных расчетных схем. Дальнейшее усовершенствование может идти в направлении более полного учета факторов, влияющих на долговечность рельса:

остаточных и температурных напряжений, пластических деформаций у края трещины, скоростей движения, влияния соседних колесных пар и т.п. Изучение механизма возникновения и роста внутренних поперечных трещин позволит не только дать более точные оценки живучести рельсов, но и по возможности исключить или снизить вероятность появления подобных опасных дефектов. Одним из практических способов может служить перераспределение контактных напряжений в головке рельса за счет изменения профиля колес подвижного состава [6]. Прогнозирование процесса разрушения рельсов призвано обеспечить рациональную эксплуатацию путей в течение длительного срока.

Библиографический список

1. Андрейкив Е. А. Прогнозирование живучести железнодорожных рельсов в условиях эксплуатации / Е. А. Андрейкив, Е. А. Шур, А. И. Дарчук // Физ.-хим. механика материалов. – 1988. – № 2. – С. 88–91.
2. Jablonski D. Simulation of railroad crack growth life using laboratory specimens / D. Jablonski, Y. H. Tang, R. M. Pelloux // Theor. and Appl. Fract. Mech. – 1990. – Vol. 14, N 1. – P. 27–36.
3. Orringer O. Crack propagation life of detail fractures in rails: Final report / O. Orringer. – US Department of Transportation research and special programs, Administration Transportation systems center, Cambridge, MA 02142. – October 1988. – 183 p.
4. Orringer O. Control of rail integrity by self-adaptive scheduling of rail tests : Final report / O. Orringer. – US Department of Transportation research and special programs, Administration Transportation systems center, Cambridge, MA 02142. – June 1990. – 82 p.
5. Orringer O. Some suggestions for adjusting rail test schedules to reflect track characteristics, maintenance, traffic and weather / O. Orringer // Proc. 34th Iron & Steel Society Conf. Montreal, October 1992. – P. 182.
6. Лысюк В. С. Повышение прочности и надежности пути за счет перераспределения по ширине головки рельса контактных напряжений / В. С. Лысюк // Повышение прочности и надежности пути : сб. науч. тр. ВНИИЖТ. – М. : Транспорт, 1989. – С. 3–18.
7. Андрейкив А. Е. Расчет коэффициентов интенсивности напряжений для внутренней поперечной трещины в головке рельса / А. Е. Андрейкив, Е. А. Шур // Физ.-хим. механика материалов. – 1980. – № 1. – С. 95–98.
8. Orringer O. Applied research on rail fatigue and fracture in the United States / O. Orringer, J. M. Morris, R. K. Steele // Theor. and Appl. Fract. Mech. – 1984. – Vol. 1. – P. 23–49.
9. Orringer O. Structural integrity of rail in railroad track in the United States / O. Orringer, R. K. Steele // Authorized reprint 1988 from Special technical publication 969. – P. 260–278.
10. Orringer O. Detail fracture growth in rails: test results / O. Orringer, J. M. Morris, D. Y. Jeong // Theor. and Appl. Fract. Mech. – 1986. – Vol. 5. – P. 69–95.
11. Sih G. C. Three-dimensional transverse fatigue crack growth in rail head / G. C. Sih, D. Y. Tzou // Theor. and Appl. Fract. Mech. – 1985. – Vol. 3. – P. 97–112.
12. Новожилов В. В. О необходимом и достаточном критерии хрупкой прочности / В. В. Новожилов // Прикл. математика и механика. – 1969. – Т. 33, № 2. – С. 212–222.
13. Балина В. С. Прочность, долговечность и трещиностойкость конструкций при длительном циклическом нагружении / В. С. Балина, Г. Г. Мядякшас. – СПб. : Политехника, 1994. – 204 с.
14. Коцаньда С. Усталостное растрескивание металлов / С. Коцаньда. – М. : Металлургия, 1990. – 623 с.
15. Tang Y. H. Comparison of two crack growth rate models with laboratory spectrum and field tests on rail steel / Y. H. Tang, A. B. Perlman, O. Orringer, D. A. Jablonski // Theor. and Appl. Fract. Mech. – 1991. – Vol. 15. – P. 1–9.

References

1. Andrejkiv E. A., Shur E. A. & Darchuk A. I. Prognostirovanie zhivuchesti zheleznodorozhnykh rel'sov v usloviyakh jekspluatatsii [Forecasting railway rail longevity under operation conditions]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov* [Physical-chemical material mechanics], 1988, no. 2, pp. 88–91. (In Russian)

2. Jablonski D., Tang Y.H. & Pelloux R.M. Simulation of railroad crack growth life using laboratory specimens. *Theor. and Appl. Fract. Mech.*, 1990, vol. 14, no. 1, pp. 27–36.
3. Orringer O. *Crack propagation life of detail fractures in rails*. Final report. US Department of Transportation research and special programs, Administration Transportation systems center, Cambridge, MA 02142, October 1988, 183 p.
4. Orringer O. *Control of rail integrity by self-adaptive scheduling of rail tests*. Final report. US Department of Transportation research and special programs, Administration Transportation systems center, Cambridge, MA 02142, June 1990, 82 p.
5. Orringer O. Some suggestions for adjusting rail test schedules to reflect track characteristics, maintenance, traffic and weather. *Proc. 34th Iron & Steel Society Conf.* Montreal, October 1992, p. 182.
6. Lysjuk V.S. Povyshenie prochnosti i nadezhnosti puti za schet pereraspredeleniya po shirine golovki rel'sa kontaktnykh napryazhenij [Increasing track durability and reliability through redistributing contact stress across the rail head width]. *Povyshenie prochnosti i nadezhnosti puti*. Sb. nauchnykh trudov VNIIZhT [Increasing track durability and reliability. Edited volume]. Moscow, Transport Publ., 1989, pp. 3–18. (In Russian)
7. Andrejkiv A.E. & Shur E.A. Raschet kojefitsientov intensivnosti napryazhenij dlya vnutrennej poperechnoj treshchiny v golovke rel'sa [Calculating stress intensity factors for internal transverse crack in head rail]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov* [Physical-chemical material mechanics], 1980, no. 1, pp. 95–98. (In Russian)
8. Orringer O., Morris J.M. & Steele R.K. Applied research on rail fatigue and fracture in the United States. *Theor. and Appl. Fract. Mech.*, 1984, vol. 1, pp. 23–49.
9. Orringer O. & Steele R.K. Structural integrity of rail in railroad track in the United States. *Authorized reprint. Special technical publication*, 1988, no. 969, pp. 260–278.
10. Orringer O., Morris J.M. & Jeong D.Y. Detail fracture growth in rails: test results. *Theor. and Appl. Fract. Mech.*, 1986, vol. 5, pp. 69–95.
11. Sih G.C. & Tzou D.Y. Three-dimensional transverse fatigue crack growth in rail head. *Theor. and Appl. Fract. Mech.*, 1985, vol. 3, pp. 97–112.
12. Novozhilov V.V. O neobkhodimom i dostatochnom kriterii khrupkoj prochnosti [Concerning the necessary and sufficient criterion of brittle strength]. *Prikladnaya matematika i mekhanika* [Applied mathematics and mechanics], 1969, vol. 33, no. 2, pp. 212–222. (In Russian)
13. Balina V.S. & Myadyakshas G.G. *Prochnost', dolgovechnost' i treshchinostojkost' konstruksij pri dlitel'nom tsiklicheskom nagruzhении* [Durability, longevity and crack resistance under prolonged cyclic load]. Saint Peterburg, Politehnika Publ., 1994, 204 p. (In Russian)
14. Kotsan'da S. *Ustalostnoe rastreskivanie metallov* [Fatigue cracking in metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990, 623 p. (In Russian)
15. Tang Y.H., Perlman A.B., Orringer O. & Jablonski D.A. Comparison of two crack growth rate models with laboratory spectrum and field tests on rail steel. *Theor. and Appl. Fract. Mech.*, 1991, vol. 15, pp. 1–9.

СМИРНОВ Владимир Игоревич – доктор техн. наук, доцент, vsmirnov1@gmail.com; *ЗОЗУЛЯ Сергей Сергеевич – аспирант, sergzo@bk.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I)

УДК 624.012.4:691.32-419.8

К. В. Талантова**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СТАЛЕФИБРОБЕТОНА,
ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЗАДАННЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦИЙ НА ЕГО ОСНОВЕ**

Дата поступления: 10.11.2016

Решение о публикации: 16.12.2016

Цель: Разработка метода обеспечения заданных эксплуатационных характеристик конструкций, создаваемых на основе строительного композита – сталефибробетона. **Методы:** Корреляционный анализ свойств сталефибробетона, полученных различными авторами, на основе которого выполнен регрессионный анализ. Оптимизация расхода фибр при проектировании и изготовлении конструкций на основе сталефибробетона. **Результаты:** Формирование структуры сталефибробетона начинается с подготовки структуры исходного бетона и в большой степени определяется параметрами стальных фибр после их введения в бетон – их количеством, типом, длиной, диаметром, прочностью, деформативностью. Корреляционный анализ представленных в открытой печати физико-механических свойств сталефибробетона, выполненный автором, показал, что одним из основных параметров, обеспечивающих заданные эксплуатационные характеристики конструкций на его основе, является объемное содержание фибр. В трудах российских и зарубежных ученых предлагаются разные способы задания этого параметра в материале – сталефибробетоне. Результаты экспериментально-теоретических исследований позволили автору для оценки эффективности решений ввести относительный коэффициент расхода фибр, с помощью которого была решена задача оптимизации расхода фибр разрабатываемых конструкций. Определение минимального относительного коэффициента расхода фибр k_{fbmin} осуществлялось с помощью программного обеспечения, разработанного в среде табличного процессора Excel с использованием языка программирования VBA (Visual Basic for Application). В результате оптимизационных расчетов вычисляются k_{fbmin} и необходимые для создания конструкций с заданными характеристиками на основе сталефибробетона объемное содержание фибр, их диаметр, отношение длины к диаметру, расчетное сопротивление бетона сжатию, которые определяются в соответствии с напряженно-деформированным состоянием разрабатываемой конструкции. **Практическая значимость:** Разработан метод создания конструкций на основе сталефибробетона с заданными характеристиками, обладающих более высокими технико-экономическими показателями по сравнению с существующими аналогами.

Сталефибробетон, структура, свойства, заданные эксплуатационные характеристики, конструкции на основе сталефибробетона, объемный процент фибрового армирования, программные средства.

Clara V. Talantova, D. Eng, assistant professor, talant_bar@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) STRUCTURE AND PROPERTIES OF STEEL FIBER CONCRETE DEFINING THE MASTER PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF STRUCTURES BASED ON IT

Objective: Develop a method for ensuring master performance characteristics of structures produced based on the steel fiber construction composite. **Methods:** Correlation analysis of steel fiber concrete properties obtained by various authors, serving as basis for a regression analysis. Optimize fiber expenditure when planning and producing structures based on steel fiber concrete. **Results:** Formation of the steel fiber concrete structure begins with preparing the structure of the initial concrete and to a large extent is defined by the parameters of steel fibers following their introduction into the concrete, their quantity, type, length, diameter, durability and deformability. The correlation analysis of physical and mechanical properties of steel fiber concrete performed by the author has shown that one of the main parameters responsible for

the master performance characteristics of structures based thereon is the volumetric content of fibers. At the same time, research by Russian and foreign scientists offers different methods of assigning this parameter to the material of steel fiber concrete. The results of experimental and theoretical research for assessment of effectiveness of the solutions have allowed the author to introduce a relative fiber usage ratio employed to solve the task of optimizing fiber usage in the structures being developed. The minimum relative fiber usage ratio k_{ftmin} was determined based on the software application developed in the Excel table processor environment using the VBA (VisualBasicforApplication) language. The optimization calculations result in the determination of k_{ftmin} and voluminous fiber content, fiber diameter, length to diameter ratio and design compression resistance of concrete determined according to the stress-strain behavior of the structure being developed, all necessary for producing structures with master performance characteristics. **Practical importance:** A method was developed for producing structures based on steel fiber concrete with master performance characteristics whose cost/performance ratios exceed those of the existing counterparts.

Steel fiber concrete, structure, properties, master performance parameters, steel fiber concrete-based structures, volume percentage of fiber reinforcement, software assets.

Введение

Изучению структуры сталефибробетона (СФБ) в 1970–1990-е годы посвящены работы отечественных ученых И. А. Лобанова, Е. В. Гулимовой, В. П. Романова, Ф. Н. Рабиновича, Г. В. Копанского [1–5] и др. Исследования СФБ при этом во многом базировались на работах, посвященных классическим композиционным материалам (КМ) [6].

На основе анализа макро-, мезо-, микро- и субмикроструктуры СФБ были определены параметры фибрового армирования – соотношение длины и диаметра (l_f/d_f), длина анкеровки фибр (l_{fan}), коэффициенты ориентации фибр при растяжении и сжатии и т. п. [7]. Однако не были сформулированы критерии рационального объемного содержания фибр в бетонной матрице. Позже Ю. В. Пухаренко [8] предложил критерии для определения «эффективных значений объемного содержания фибровой арматуры», которые позволяют получить свойства материала независимо от напряженно-деформированного состояния конструкции.

1 Структура сталефибробетона

В работах [1, 2] сделано заключение о том, что в структуре бетонной матрицы в СФБ по

сравнению со структурой «обычного» бетона относительно немного крупных пор и капилляров, мелкие замкнутые поры и большая однородность. При этом имеет место увеличенный размер контактных зон межфазного слоя с микротвердостью вблизи поверхности фибр, в два с лишним раза превышающей микротвердость аналогичных контактных зон вблизи заполнителя.

Образование вокруг фибр контактных зон, обладающих высокой микротвердостью, их достаточно близкое расположение влияют на физико-механические характеристики материала. В СФБ чем больше насыщение фибрами, тем больше контактных зон и тем выше его прочностные и деформативные характеристики.

По основным параметрам СФБ соответствует определению композиционного материала [1, 4, 9–11].

Многочисленные эксперименты показали, что если расстояние между центрами тяжести произвольно ориентированных фибр S меньше критического S_{min} , то в полной мере проявляется композиционная природа материала. При этом в разных работах S_{min} предлагается определять по-разному, но идея одна – для достижения ожидаемого эффекта от введения стальных фибр в бетон S должно быть не более чем S_{min} и, как показали экспериментальные исследования отечественных и зару-

бежных специалистов [9–12], – не более 5 мм (рис. 1).

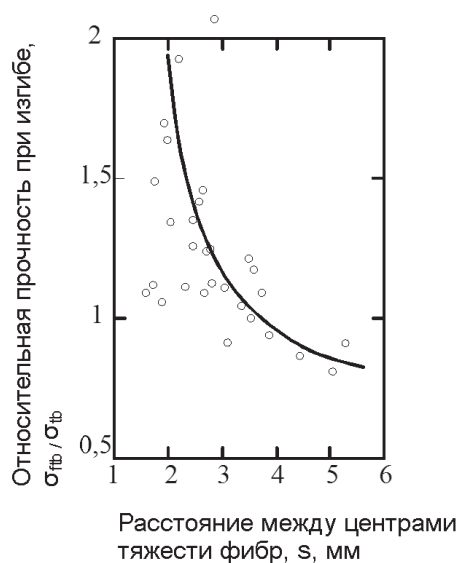


Рис. 1. Зависимость относительной прочности сталефибробетона на растяжение при изгибе от расстояния между центрами тяжести фибр: теоретическая кривая по R. N. Swamy, P. S. Mangat [10]; ° – экспериментальные данные.

Важным условием создания рациональной структуры СФБ и получения ожидаемого эффекта от введения фибр в бетон является обеспечение однородности материала.

По данным исследований [13] введение крупного заполнителя в больших количествах ухудшает равномерность распределения фибр в СФБ смеси, повышает ее жесткость и соответственно снижает эффективность фибрового армирования (рис. 2). Поэтому добавка крупного заполнителя крупностью до 10 мм допустима в количестве 15–20% от веса сухих компонентов.

Результаты исследований [13] показали, что наиболее предпочтительными считаются заполнители, размеры которых не превышают 1/3 длины фибр. Очевидно, в качестве исходного бетона для СФБ целесообразно применять мелкозернистый бетон либо ограничивать крупность заполнителя и его количество. В случае же введения в смесь крупно-

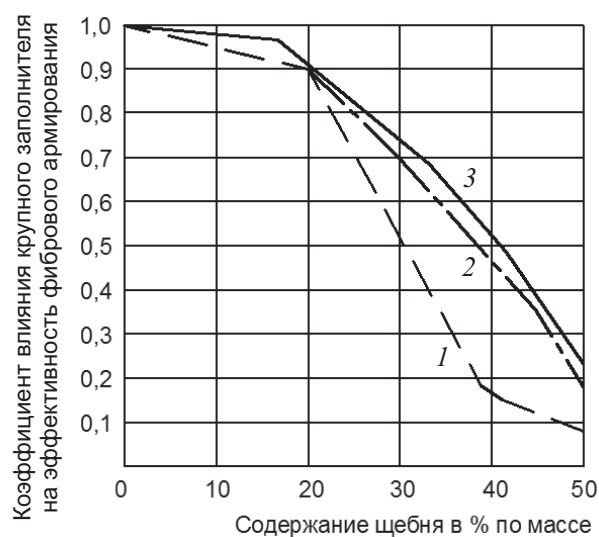


Рис. 2. Зависимость эффективности фибрового армирования от количества щебня: 1 – растяжение; 2 – сжатие; 3 – трещиностойкость

го заполнителя необходимо его количество и размер выбирать с учетом геометрии фибр и с обязательной лабораторной корректировкой состава СФБ.

2 Влияние структуры сталефибробетона на его свойства

Структура СФБ существенно зависит от характеристик армирующих волокон (временного сопротивления растяжению R_{sf} , модуля упругости E_{sf} , диаметра d_f , отношения длины и диаметра l_f/d_f , их объемного содержания μ_{fv} , формы, состояния поверхности и т. д.). Кроме того, она определяется характеристиками хрупкой бетонной матрицы (временным сопротивлением сжатию R_b и растяжению R_{bt} , начальным модулем упругости E_b или модулем деформации $E_{b,\tau}$ и т. п.) и, что особенно важно для композитов на основе хрупких матриц, состоянием фазы раздела (контактной зоны) матрица–волокно. Перечисленные параметры учтены зависимостью И. А. Лобанова для оценки прочностных характеристик СФБ [1]

$$R_{fb} = m \cdot k_x \cdot 2\tau_c l_l \cdot \mu_{fv} + \\ + \mu_{fv} \left(2 \frac{\delta}{r} + \frac{\delta^2}{r^2} \right) \cdot R_z + \\ + \left(1 - \mu_{fv} \left(1 + 2 \frac{\delta}{r} + \frac{\delta^2}{r^2} \right) R_b \right),$$

где m – коэффициент, зависящий от напряженного состояния элемента; k_x – коэффициент ориентации; τ_c – прочность сцепления по контакту волокно–матрица, МПа; l_l – средняя длина заделки (анкеровки) фибр, мм; μ_{fv} – объемный коэффициент армирования; δ – толщина зоны контакта, мм; r – радиус фибры, мм; R_z – прочность контактной зоны, МПа.

В полученной зависимости при определении прочности СФБ учитываются вклад фибр, бетонной матрицы и, как отдельной составляющей, контактной зоны фибра – бетонная матрица. Прочность контактной зоны, в свою очередь, зависит от вида и свойств бетонной матрицы, состояния поверхности волокон, химического сродства матрицы и волокна.

Обязательным условием, обеспечивающим поведение композита – СФБ – как структурно единого материала, является сплошное и надежное сцепление компонентов. Случайные нарушения сцепления, даже на небольших участках, могут привести к значительному снижению прочностных и деформативных характеристик материала и непригодности его для производства конструкций. Разрушение СФБ композиции чаще всего происходит вследствие нарушения сцепления между стальными фибрами и бетонной матрицей, что обеспечивает вязкую работу материала под нагрузками.

Предотвратить нарушение сцепления и обеспечить высокие физико-механические характеристики СФБ можно, или используя фибры достаточной длины, создавая ее необходимую анкеровку, или повысив их сцепление с бетонной матрицей. В этом случае разрушение сопровождается разрывом фибр, характер разрушения материала становится хрупким, подобным разрушению бетона, но при значительно более высоких нагрузках.

3 Регулирование свойств сталефибробетона

Далеко не всегда теоретически подобранные рациональные параметры фибрового армирования обеспечивают заданные физико-механические характеристики конструкции на основе СФБ. Исследования структуры СФБ [4, 5, 8, 12, 14] дают основу понимания процессов, происходящих в материале под воздействием внешних нагрузок, перспективы и направления их развития.

С этих позиций, на наш взгляд, более пригодным для практических целей, является общий случай характеристики уровней структуры СФБ, предложенный Г.В. Копанским в работе [5].

Основным макроструктурным элементом СФБ является ячейка, размеры которой зависят от степени насыщения фибрами их диаметра, размера заполнителя, используемого в бетонной матрице. В процессе создания сталефибробетонных конструкций (СФБК), сталефиброжелезобетонных конструкций (СФЖБК) могут иметь место три типа макроструктуры: изотропная, анизотропная, вариатропная (называемая зонной [15, 16]).

Изотропная и анизотропная макроструктуры СФБ имеют равномерное распределение фибр по объему изделия соответственно с трехосной их ориентацией относительно действующих усилий в первом случае и одноосной и двухосной – во втором. Вариатропная (зонная) макроструктура СФБ характеризуется неравномерным распределением фибр в элементе независимо от их ориентации. Причем вариатропность может быть организованной (зонное армирование) и неорганизованной, связанной со свойствами СФБ смеси и технологией производства СФБК (СФЖБК).

Обеспечить определенный тип макроструктуры СФБ за счет распределения фибр в бетонной матрице можно, регулируя относительную длину фибр l_f/d_f , модуль фибрового армирования $k = \mu_{fv} \cdot l_f/d_f$ и др. Окончательно структура материала формируется на стадии формирования конструкций.

4 Сталефибробетон с заданными характеристиками и конструкции на его основе

С учетом всего вышесказанного автором сформулирован подход к формированию свойств СФБ, позволяющий обеспечивать заданные эксплуатационные характеристики СФБК (СФЖБК).

Идея и сущность его состоит в том, что по НДС и полям напряжений, полученным в результате статического расчета конструкции средствами вычислительных комплексов SCAD, Лира, COSMOS и др., оцениваются максимальные (главные) напряжения растяжения σ_{tmax} и сжатия $\sigma_{сmax}$ и в соответствии с ними разрабатывается схема армирования (фибрового и, при необходимости, комбинированного с использованием регулярной арматуры). В соответствии с полученными напряжениями принимаются характеристики СФБ при растяжении и сжатии R_{fbt} и R_{fbs} , для обеспечения которых в результате решения оптимизационной задачи определяются требуемые параметры фибрового армирования. Функцией цели при этом принимается минимальный относительный коэффициент расхода фибр на растяжение k_{fbmint} или на сжатие k_{fbmin} , которые обеспечивают требуемые $R_{fbt} = \sigma_{tmax}$ и $R_{fbs} = \sigma_{сmax}$ и соответствующий им расход стальных фибр $\mu_{fvmin} \geq 0,5\%$. Граничным условием оптимизации является $R_{fbt} = \sigma_{tmax}$ и $R_{fbs} = \sigma_{сmax}$ [16].

Определение минимального относительного коэффициента расхода фибр при обеспечении σ_{tmax} ($\sigma_{сmax}$) позволяет получить заданные эксплуатационные характеристики конструкции при минимальной стоимости из возможных.

Заключение

Таким образом, регулируя структуру композита – сталефибробетона в соответствии с напряженно-деформированным состоянием разрабатываемой конструкции, оказывается

возможным получить СФБ с заданными свойствами, которые определяются эксплуатационными требованиями, предъявляемыми к последней.

Библиографический список

1. Лобанов И. А. Основы технологии дисперсно-армированных бетонов (фибробетонов) : автореф. докт. дис. / И. А. Лобанов. – Л. : ЛИСИ, 1986. – 34 с.
2. Гулимова Е. В. Исследования коррозионной стойкости арматуры в сталефибробетоне : автореф. канд. дис. / Е. В. Гулимова. – Л. : ЛИСИ, 1980. – 23 с.
3. Романов В. П. Влияние параметров дисперсного армирования на прочность элементов из сталефибробетона при статических и динамических нагрузках / В. П. Романов, Ф. Н. Рабинович, И. Д. Захаров // Исследование и расчет новых типов пространственных конструкций гражданских зданий : сб. науч. тр. – Л. : ЛЕНЗНИИЭП, 1985. – С. 88–94.
4. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции : монография / Ф. Н. Рабинович. – М. : Изд-во АСВ, 2004. – 560 с.
5. Копанский Г. В. Структура армирования сталефибробетона и ее технологическое обеспечение : автореф. канд. дис. / Г. В. Копанский. – Л. : ЛИИЖТ, 1985. – 24 с.
6. Фудзии Т. Механика разрушения композиционных материалов / Т. Фудзии, М. Дзако ; пер. с яп. / под ред. В. И. Бурлаева. – М. : Мир, 1982. – 232 с.
7. Курбатов Л. Г. Проектирование и изготовление сталефибробетонных конструкций / Л. Г. Курбатов. – М. : ЦНТИ, 1985. – 55 с. – (Серия : Конструкции жилых и общественных зданий. Технология индустриального домостроения : обзор. информ. / ЦНТИ по гражд. стр-ву и архитектуре; вып. 4.)
8. Пухаренко Ю. В. Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетонов : автореф. докт. дис. / Ю. В. Пухаренко. – СПб. : СПбГАСУ, 2005. – 42 с.
9. Fibrecrete properties. Pavement design. Reve-sby, NSW 2212. – Australia: Aquila Steel Company Ltd., 1983. – 20 p.

10. Romualdi G. P. The Behaviour of Reinforced concrete Beams with closely spaced by Reinforcement / G. P. Romualdi, G. B. Batson // *ACI Journal*. – 1963. – N 6. – P. 751–761.
11. Swamy R. N. Fibre – reinforced concrete: mechanics, properties and applications / R. N. Swamy // *Indian Concrete Journal*. – 1974. – Vol. 48, N 1. – P. 7–16.
12. Кравинскис В. К. К вопросу о среднем числе фибр в произвольном сечении / В. К. Кравинскис, В. О. Филипсонс, Я. А. Браунс // *Проектирование и оптимизация конструкций инженерных сооружений*. – Рига : РПИ, 1983. – С. 49–51.
13. Куликов А. Н. Экспериментально-теоретические исследования свойств фибробетона при безградиентном напряженном состоянии в кратковременных испытаниях : автореф. канд. дис. / А. Н. Куликов. – Л. : ЛИСИ, 1975. – 25 с.
14. Талантова К. В. Экспериментально-теоретические исследования контактной зоны матрица-волокно строительного композита – сталефибробетона / К. В. Талантова // *ЭМФ-2001*. – Барнаул : Изд-во АГУ, 2001. – С. 243–248.
15. Гетун Г. В. Экспериментально-теоретические исследования изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных в растянутой зоне слоем сталефибробетона : автореф. канд. дис. / Г. В. Гетун. – Киев : КИСИ, 1983. – 20 с.
16. Талантова К. В. Оптимизация расхода стальной фибры при проектировании конструкций на основе сталефибробетона / К. В. Талантова // *Изв. вузов. Строительство*. – Новосибирск, 2014. – № 8. – С. 99–106.
3. Romanov V. P., Rabinovich F. N. & Zakharov I. D. Vliyanie parametrov dispersnogo armirovaniya na prochnost' jelementov iz stalefibrobetona pri staticheskikh i dinamicheskikh nagruzkakh [Impact of fiber reinforcement on the durability of steel fiber concrete parts under static and dynamic loads]. *Research and assessment of new types of spatial structures of civic buildings*. Sb. nauchnykh trudov [Increasing track durability and reliability. Edited volume]. Leningrad, LENZNIIEP Publ., 1985, pp. 88–94. (In Russian)
4. Rabinovich F. N. *Kompozity na osnove dispersno-armirovannykh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstruksii* [Composites based on fiber reinforced concrete. Theory, planning, technology and structures]: a monograph. Moscow, ASV Publ., 2004, 560 p. (In Russian)
5. Kopanskij G. V. *Struktura armirovaniya stalefibrobetona i ee tekhnologicheskoe obespechenie* [Steel fiber concrete reinforcement structure and its engineering support]: author's abstract of a Ph. D. thesis. Leningrad, LIIZHT Publ., 1985, 24 p. (In Russian)
6. Fudzii T. & Dzako M. *Mekhanika razrusheniya kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of destruction for composition materials]. Translated from Japanese, ed. V. I. Burlaeva. Moscow, Mir Publ., 1982, 232 p.
7. Kurbatov L. G. *Proektirovanie i izgotovlenie stalefibrobetonnykh konstruksij* [Design and manufacture of steel fiber concrete structures]. Moscow, TSNTI, 1985, 55 p. (Seriya konstruksii zhilykh i obshchestvennykh zdaniy. Tekhnologiya industrial'nogo domostroeniya [Residential and public building structures series. Industrial building construction: TSNTI civil engineering and architecture bulletin, issue 4]. (In Russian)
8. Pukharensko Yu. V. *Nauchnye i prakticheskie osnovy formirovaniya struktury i svoystv fibrobetonov* [Scientific and practical basis of formation of fiber concrete structure and properties]: author's abstract of a doctor's thesis. Saint Petersburg, SPbGASU Publ., 2005, 42 p. (In Russian)
9. *Fibrecrete properties. Pavement design*. Revesby, NSW 2212. Australia, Aquila Steel Company Ltd., 1983, 20 p.
10. Romualdi G. P. & Batson G. B. The Behaviour of Reinforced concrete Beams with closely spaced by Reinforcement. *ACI Journal*, 1963, no. 6, pp. 751–761.

References

1. Lobanov I. A. *Osnovy tekhnologii dispersno-armirovannykh betonov (fibrobetonov)* [Basics of the continuously reinforced concrete (fiber concrete) technology]: author's abstract of a doctor's thesis. Leningrad, LISI Publ., 1986, 34 p. (In Russian)
2. Gulimova E. V. *Issledovaniya korrozionnoj stojkosti armatury v stalefibrobetone* [Research of corrosion resistance of reinforcements in steel fiber concrete]: author's abstract of a doctor's thesis. Leningrad, LISI Publ., 1980, 23 p. (In Russian)

11. Swamy R. N. Fibre – reinforced concrete: mechanics, properties and applications. *Indian Concrete Journal*, 1974, vol. 48, no. 1, pp. 7–16.
12. Kravinskis V. K., Filipsons V. O. & Brauns Ya. A. K voprosu o srednem chisle fibr v proizvol'nom sechenii. Proektirovanie i optimizatsiya konstruksij inzhenernykh sooruzhenij [Concerning average amounts of fibers in an arbitrary section]. *Planning and optimization of utility structures*. Riga, RPI Publ., 1983, pp. 49–51. (In Russian)
13. Kulikov A. N. *Jeksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya svojstv fibrobetona pri bezgradientnom napryazhennom sostoyanii v kratkovremennykh ispytaniyakh* [Experimental and theoretical research of fiber concrete properties under gradientless stress in short-run tests]: author's abstract of a Ph.D. thesis. Leningrad, LISI Publ., 1975, 25 p. (In Russian)
14. Talantova K. V. *Jeksperimental'no – teoreticheskie issledovaniya kontaktnoj zony matritsa-vo-lokno stroitel'nogo kompozita – stalefibrobetona* [Experimental and theoretical research of the matrix-fiber contact area of the fiber concrete building composite]. *EMF-2001*. Barnaul, AGU Publ., 2001, pp. 243–248. (In Russian)
15. Getun G. V. *Jeksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya izgibaemykh zhelezobetonnykh konstruksij, usilennykh v rastyanutoj zone sloem stalefibrobetona* [Experimental and theoretical research of bending armored concrete structures, reinforced in the tensile region with a layer of steel fiber concrete]: author's abstract of a Ph.D. thesis. Kyiv, KISI Publ., 1983, 20 p. (In Russian)
16. Talantova K. V. Optimizatsiya raskhoda stal'noj fibry pri proektirovanii konstruksij na osnove stalefibrobetona [Optimization of fiber usage when planning structures based on steel fiber concrete]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [College news. Construction]. Novosibirsk, 2014, no. 8, pp. 99–106. (In Russian)

ТАЛАНТОВА Клара Васильевна – доктор техн. наук, доцент, talant_bar@mail.ru (Петербургский университет путей сообщения Императора Александра I)

УДК 621.833.15

**И. В. Федоров, В. А. Белгородцев, Д. В. Расщепкина,
С. О. Комиченко, Р. М. Гетманец**

МЕТОД УСКОРЕННОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ИЗГИБНОЙ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ЗУБЬЕВ КОЛЕС И ШЕСТЕРЕН ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Дата поступления: 20.06.2016

Решение о публикации: 16.12.2016

Цель: Разработка методики ускоренной оценки изгибной усталостной прочности зубчатых колес и шестерен тягового подвижного состава для подтверждения возможности их безопасной эксплуатации. **Методы:** Применялись аналитические методы расчета нагруженности, основанные на формулах, приведенных в ГОСТ 21354-87. Для реализации экспериментального метода ресурсных испытаний на циклическую выносливость используется гидравлическая испытательная машина Zwick Amsler HB 250 со специально разработанной оснасткой, позволяющей испытывать прямозубые и косозубые колеса. **Результаты:** Разработана методика расчета испытательных нагрузок на зубья колес и создана новая технологическая оснастка, дающая возможность воспроизводить их на гидравлических испытательных машинах. **Практическая значимость:** Предложенный метод и разработанная оснастка приводят к существенному сокращению длительности испытаний зубьев колес подвижного состава на усталостную прочность при изгибе (реализуемая при испытаниях частота действия нагрузки составляет 20 Гц, которая не может быть реализована на вращательном стенде из-за неадекватности возникающих нагрузок) и уменьшению затрат электрической энергии, необходимой для реализации испытаний по сравнению с традиционными испытаниями на вращательных стендах.

Тяговый подвижной состав, прочность зубьев шестерен и колес, усталостная прочность, методы расчета, методика испытаний, ускоренные испытания, технологическая оснастка.

Igor' V. Fedorov, associate professor, Fedorov281973@yandex.ru; **Vasilij A. Belgorodtsev**, teaching fellow, Belgorodtsev@list.ru; **Dar'ya V. Rasshchepkina**, postgraduate student, Rasschepkinadaria7742@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University); ***Stanislav O. Komichenko**, head of department, Komichenko@gmail.com; **Roman M. Getmanets**, engineer, getmanets@bk.ru (Scientific Research Center "Vagony") **METHOD OF ACCELERATED EXPERIMENTAL EVALUATION OF FLEXURAL FATIGUE STRENGTH IN WHEELS AND GEARS OF ROLLING STOCK**

Objective: Develop a method for accelerated evaluation of flexural fatigue strength in tooth-wheels and gears of traction rolling stock to confirm their safe operability. **Methods:** The research employed analytical methods of load calculation, based on formulas given in GOST 21354-87. To implement the experimental cyclical endurance testing method, the Zwick Amsler HB 250 hydraulic testing machine was employed, fitted with custom hardware for testing straight and helical gears. **Results:** A method for calculating testing loads on gear spurs was developed and new hardware was created enabling reproduction of the testing loads on hydraulic testing machines. **Practical importance:** The suggested method and the developed hardware result in substantially faster testing of rolling stock gear spurs for flexural fatigue strength (the test load frequency constitutes 20 Hz, which cannot be reproduced on a rotary stand due to the inadequacy of resulting loads) and reduced power costs required to implement testing as compared to traditional testing on rotary stands.

Traction rolling stock, gear and wheel spur strength, fatigue strength, calculation methods, testing method, accelerated testing, hardware.

Введение

Зубья шестерней (зубчатых колес) в процессе эксплуатации подвергаются изгибным и контактным напряжениям [1, 2]. Проблематика состоит в том, что контактное выкрашивание не вызывает внезапный отказ в работе [1, 3–5]. Согласно п. 4.15 ГОСТ 30803-2014, критерием предельного состояния колеса следует считать износ его зубьев, характеризуемый степенью уменьшения толщины зуба на значение не более 0,3 модуля [6, 7]. Таким образом, шестерня, несмотря на полученные от выкрашивания повреждения и изменения формы зубьев в процессе эксплуатации, может сохранять работоспособность длительное время [4, 8–10].

Изломы и деформации зубьев шестерен и колес тяговых передач подвижного состава вызывают моментальный отказ в работе в связи с отсутствием возможности передачи вращательного момента из-за отсутствия зубьев передачи или заклинивания сопряженных шестерней. Несмотря на большую распространенность в эксплуатации контактного выкрашивания, наибольшую опасность представляет излом зубьев, так как приводит к моментальному отказу в работе, что может вызвать большие сбои графика движения поездов [1].

Определение долговечности зубчатых передач обычно осуществляется на нагрузочных стендах с замкнутым и разомкнутым энергетическим потоком. В этом случае испытываются зубчатые передачи или редуктор в целом, что требует дорогостоящего и нестандартного оборудования и значительных затрат электроэнергии и времени на испытания. Для достижения задаваемой ГОСТ 30803-2014 базы в 4 млн циклов при используемых на подвижном составе зубчатых передач с частотой вращения 500–700 об./мин требуется около 100 ч непрерывной работы. Поэтому для решения задачи определения усталостной прочности зубьев шестерен и колес зубчатых передач предпочтительным является использование серийно выпускаемых гидравлических испытательных машин, которые позволяют снизить стоимость и сроки испытаний.

Отказ локомотива может привести к сбою в графике движения поездов, а также может оказаться перекрытой целая железнодорожная магистраль, что нанесет значительные убытки. Во избежание подобного следует уделять особое внимание при постановке на производство новой продукции для железнодорожного подвижного состава именно изгибной прочности.

Расчет нагрузки для проверки усталостной прочности

Для определения нагрузок, необходимых для экспериментальной проверки их усталостной прочности при изгибе, была использована методика расчета зубьев на изгиб по ГОСТ 21354-87 [7, 10–14].

Согласно этой методике, прочность зуба при изгибе оценивается на переходной кривой, соединяющей зуб и венец колеса (излом зуба вследствие действия изгибных напряжений показан на рис. 1).

При расчете зуб условно представляется в виде консольного стержня и вводятся многочисленные поправочные коэффициенты, учитывающие реальную форму зуба и переходной кривой, сдвиговые деформации зубьев, кручение ободьев колес и валов, динамическую нагрузку, погрешность изготовления, а также реальное распределение нагрузки в зацеплении. Поправочные коэффициенты найдены опытным путем. Фактически расчет зуба зубчатого колеса на изгиб производится по эмпирическим формулам. Достоверно определить напряжение на переходной кривой, используя техническую теорию стержней, невозможно [3, 9, 12–15]. Формулы, приведенные в ГОСТ 21354-87, многократно проверены практикой проектирования зубчатых передач [3, 9]. Характер нагружения зуба при изгибе показан на рис. 2.

Расчетное местное напряжение при изгибе определяют по формуле

$$\sigma_F = \frac{F_{Ft}}{b \cdot m} \cdot K_F \cdot Y_{FS} \cdot Y_\beta \cdot Y_\epsilon, \quad (1)$$

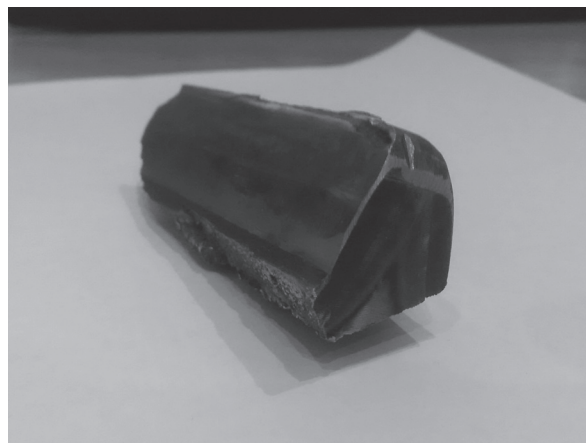
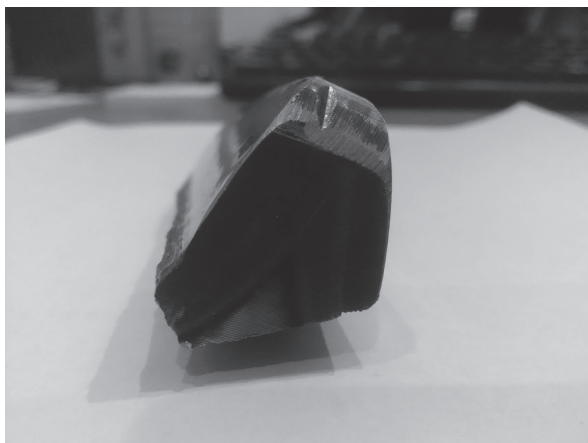


Рис. 1. Излом зуба вследствие действия изгибных напряжений

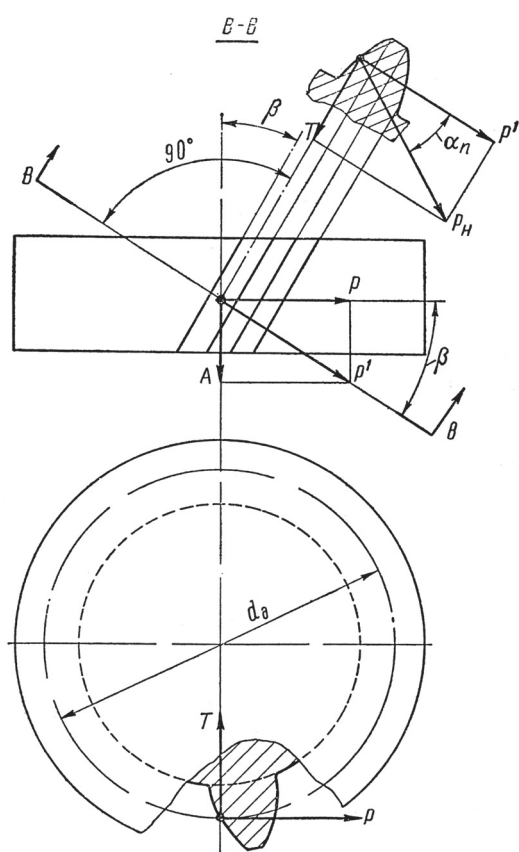


Рис. 2. Силы, действующие на зуб косозубой передачи

коэффициент нагрузки K_F – по

$$K_F = K_A \cdot K_{FV} \cdot K_{F\beta} \cdot K_{Fa}, \quad (2)$$

допускаемые напряжения в опасном сечении при расчете зуба на изгиб – по

$$\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{F \lim b} \cdot Y_N}{S_F} \cdot Y_R \cdot Y_\delta \cdot Y_X, \quad (3)$$

предел выносливости зуба при изгибе – через предел выносливости материала:

$$\sigma_{F \lim b} = \sigma_{F \lim b}^0 \cdot Y_T \cdot Y_Z \cdot Y_g \cdot Y_d \cdot Y_A. \quad (4)$$

Приравнявая расчетное местное напряжение, возникающее при изгибе в опасном сечении на переходной кривой, и допускаемое напряжение при изгибе с коэффициентом запаса, равным 1, можно получить допустимое окружное усилие, на делительном цилиндре действующее на зуб колеса, соответствующее пределу выносливости:

$$F_{Fi} = \frac{\sigma_{F \lim b} \cdot b \cdot m_n \cdot Y_N \cdot Y_r \cdot Y_x \cdot Y_\delta}{K_F \cdot Y_{FS} \cdot Y_\beta \cdot Y_\epsilon}. \quad (5)$$

Расчет нагрузки для испытаний на гидравлическом стенде

Коэффициенты в формулах (1)–(5) определяются в соответствии с ГОСТ 21354-87 [11, 16, 17]. Силы, действующие при расчете зуба на изгиб, и характер нагружения зуба колеса показаны на рис. 2, из него следует, что тяговое усилие передается на зуб на плече, соответствующем делительному цилиндру.

Так как при испытаниях на гидравлическом стенде нагрузка прикладывается не на делительном цилиндре, а смещается к вершине зуба, то прикладываемая к зубу колеса при испытаниях нагрузка будет определяться из условия сохранения неизменным напряжения в опасном сечении зуба. При смещении нагрузки к вершине зуба будет изменяться коэффициент Y_{FS} (как видно из формулы (1) расчетное местное напряжение прямо пропорционально данному коэффициенту). При испытаниях нагрузка прикладывается к зубу с помощью специального приспособления, как показано на рис. 3. Для устранения сил трения контактная часть приспособления и активная поверхность нагружаемого зуба смазываются. Нагрузка прикладывается перпендикулярно к линии нагружаемого зуба (нагрузка прикладывается в сечении $B-B$, см. рис. 2). В плоскости приложения вертикальной нагрузки, создаваемой стендом, действуют силы p' и T [3,

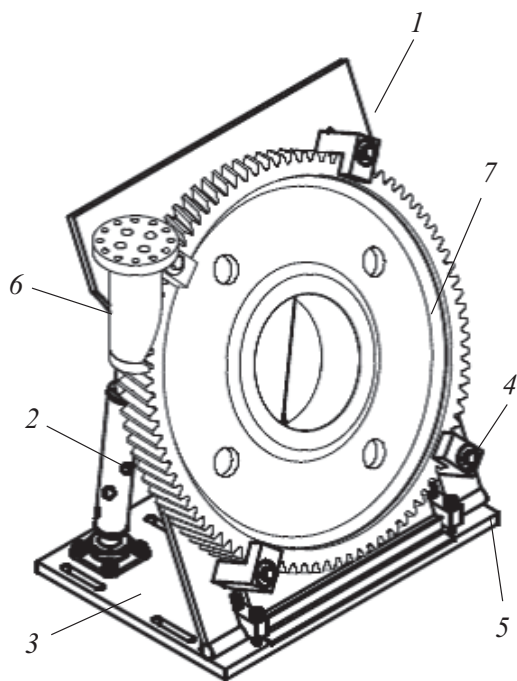


Рис. 3. Специальное приспособление для закрепления и создания нагрузки при испытаниях зубьев зубчатых колес на изгиб: 1 – лист наклонный; 2 – винт с проушиной; 3 – лист нижний; 4 – прижим; 5 – полухомут; 6 – нагрузочное приспособление; 7 – зубчатое колесо

8, 9, 13], которые связаны с окружным усилием F_{Ft} следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} p &= F_{Ft}, \\ p' &= \frac{F_{Ft}}{\cos \beta}, \\ T &= p' \operatorname{tg} a = \frac{F_{Ft} \cdot \operatorname{tg} a}{\cos \beta}, \\ a &= \arccos \left(\frac{d_n}{d_b} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

При испытаниях к вершине зуба колеса прикладывается нагрузка p' .

Окружное усилие F_{Ft}^H , создаваемое при испытаниях, будет определяться по формуле

$$F_{Ft}^H = p' \cos \beta.$$

Для сохранения величины напряжения в опасном сечении при испытаниях, где нагрузка смещается в вершине зуба, также, как при расчетном режиме колеса, когда нагрузка прикладывается на делительном цилиндре, должно выполняться условие

$$F_{Ft}^H \cdot Y_{Fsa} = F_{Ft} \cdot Y_{Fs}.$$

Подставляя в формулу (6), вместо F_{Ft} величину F_{Ft}^H , получим окончательно для определения вертикальной нагрузки, создаваемой специальным приспособлением при испытаниях:

$$F_C = \frac{F_{Ft}}{\cos \beta} \cdot \frac{Y_{FS}}{Y_{Fsa}}.$$

С помощью разработанной методики были проведены испытания зубьев зубчатых колес на изгибную прочность.

Испытательным центром АО «НВЦ “ВА-ГОНЫ”» совместно с ФГБОУ ВО ПГУПС в 2016 г. проводились работы по определению изгибной усталостной прочности шестерней, которые производились на испытательной машине Zwick Amsler HB 250 с частотой действия нагрузки 20 Гц.

Испытаниям подвергались зубчатые колеса, используемые в трансмиссии тепло- и электровозных локомотивов и изготовленные из сталей марок 55Ф, 20Х2Н4А и 45ХН. Испытывались прямо- и косозубые зубчатые колеса (рис. 4). Прилагаемая нагрузка находилась из расчета прочности зубчатой передачи [7], по пределу выносливости зуба на изгиб и составляла 10 кН (1 тс) и более.

Число циклов находилось в соответствии с п. 6.11 ГОСТ 30803-2014 и составило 4 млн [6]. Все зубчатые колеса после 4 млн циклов

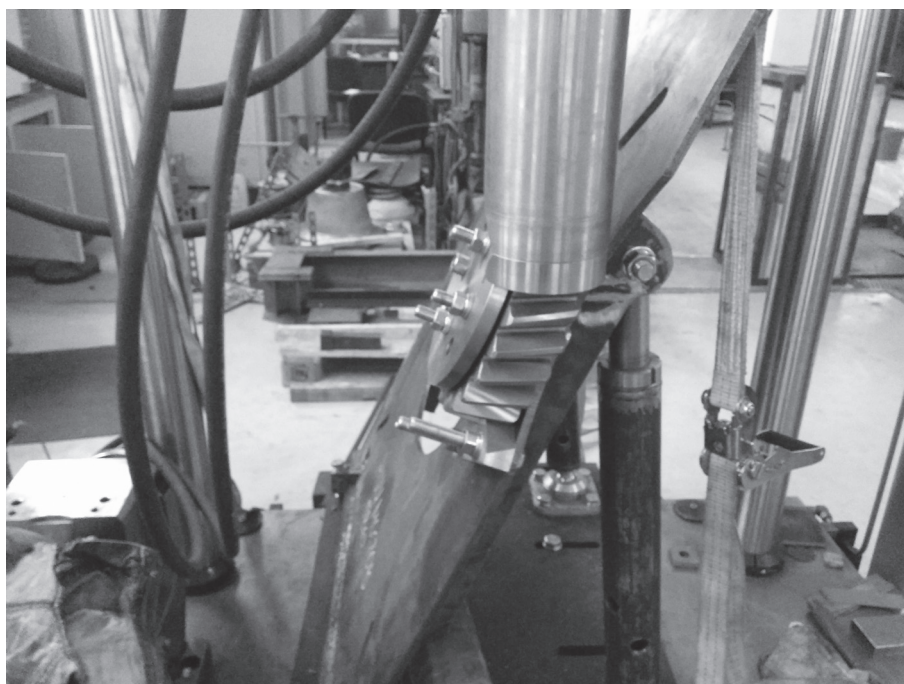
выдержали приложенные нагрузки и не получили усталостных повреждений.

Заключение

Предложена методика ускоренных испытаний зубьев зубчатых колес на изгиб.

Разработана технологическая оснастка, позволяющая производить ускоренные испытания на гидравлических испытательных машинах.

а



б

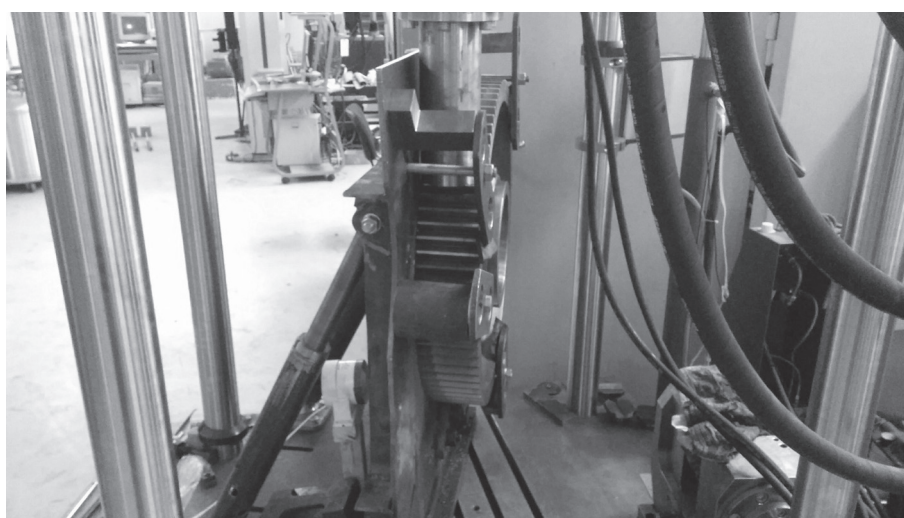


Рис. 4. Испытание зуба косозубого (а) и прямозубого (б) зубчатого колеса на изгиб

Методика испытаний и технологическая оснастка позволяют сократить длительность испытаний зубьев колес подвижного состава на усталостную прочность при изгибе в 3 раза и уменьшить расход электрической энергии при испытаниях в 10 раз.

Условные обозначения

P – окружное усилие в зацеплении;
 T – радиальная сила в зацеплении;
 A – осевое усилие в зацеплении;
 p' – нормальное усилие, действующее на зуб;
 P_H – сила взаимодействия зубьев;
 α_n – угол профиля зуба, соответствующий делительному диаметру;
 F_{Ft} – окружное усилие на делительном цилиндре при расчете зуба на изгиб;
 F_{Ft}^H – окружное усилие, создаваемое при испытаниях;
 b – ширина венца зубчатого колеса;
 m_n – нормальный модуль;
 K_F – коэффициент нагрузки;
 Y_{FS} – коэффициент, учитывающий форму зуба и концентрацию напряжений;
 Y_β – коэффициент, учитывающий наклон зуба;
 Y_ϵ – коэффициент, учитывающий перекрытие зубьев;
 K_A – коэффициент, учитывающий внешнюю динамическую нагрузку;
 K_{FV} – коэффициент, учитывающий динамическую нагрузку, возникающую в зацеплении до зоны резонанса;
 $K_{F\beta}$ – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки по длине контактных линий;
 K_{Fa} – коэффициент, учитывающий распределение нагрузки между зубьями;
 $\sigma_{F\lim b}$ – предел выносливости зубьев при изгибе;
 $\sigma_{F\lim b}^0$ – предел выносливости зубьев при изгибе, соответствующий базовому числу циклов, для отнулевого цикла напряжений;
 Y_T – коэффициент, учитывающий технологию изготовления;

Y_Z – коэффициент, учитывающий способ получения заготовки зубчатого колеса;

Y_g – коэффициент, учитывающий влияние шлифования переходной поверхности зуба;

Y_d – коэффициент, учитывающий влияние деформационного упрочнения или электрохимической обработки переходной поверхности;

Y_A – коэффициент, учитывающий влияние двустороннего приложения нагрузки;

Y_N – коэффициент долговечности;

Y_r – коэффициент, учитывающий влияние шероховатости переходной поверхности между зубьями;

Y_δ – коэффициент, учитывающий градиент напряжений и чувствительность материала к концентрации напряжений (опорный коэффициент);

Y_x – коэффициент, учитывающий размеры зубчатого колеса;

S_F – коэффициент запаса;

Y_{FSa} – коэффициент, учитывающий форму зуба и концентрацию напряжений при смещении нагрузки к вершине зуба (определяется в соответствии с приложением 9 ГОСТ 21354-87 [11]);

β – угол наклона зубьев к оси колеса;

a – угол профиля зуба в точках на окружности приложения нагрузки;

ϕ – угол между осью нагружаемого зуба в среднем сечении и горизонталью;

d_n – диаметр окружности, по которой прикладывается нагрузка к зубу при испытаниях;

d_b – диаметр основной окружности зубчатого колеса.

Библиографический список

1. Фуфрянский Н. А. Развитие локомотивной тяги / Н. А. Фуфрянский, А. Н. Бевзенко. – М. : Транспорт, 1988. – 344 с.
2. Сакало В. И. Контактные задачи железнодорожного транспорта / В. И. Сакало, В. С. Коссов. – М. : Машиностроение, 2004. – 496 с.
3. Биргер И. А. Расчет на прочность деталей машин : справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр,

Г.Б. Иосилевич. – Изд. третье, перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1979. – 702 с.

4. Чичинадзе А.В. Трение, износ и смазка / А.В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 2003. – 576 с.

5. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Ч. 1. Критерии прочности и ресурса / Н.А. Махутов. – Новосибирск : Наука, 2005. – 494 с.

6. ГОСТ 30803-2014. Колеса зубчатые тяговых передач тягового подвижного состава. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2015. – 13 с.

7. Жмак А.А. 13.105.058. Электровозы 2ЭС5 К, 3ЭС5 К, 4ЭС5 К. Расчет прочности зубчатой передачи / А.А. Жмак, А.А. Калюжный. – Новочеркасск, 2015. – 22 с.

8. Молвин М.С. Техническая механика. Ч. 3. Детали машин / М.С. Молвин, Д.Г. Гольцкер. – Л. : Судостроение, 1966. – 382 с.

9. Машнев М.М. Теория механизмов и машин и детали машин / М.М. Машнев, Е.Я. Красковский, П.А. Лебедев. – Л. : Машиностроение, 1980. – 512 с.

10. Дунаев П.Ф. Конструирование узлов и деталей машин : учеб. пособие для вузов / П.Ф. Дунаев, О.П. Леликов. – 12-е изд., стер. – М. : Академия, 2009. – 496 с.

11. ГОСТ 21354-87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность. – М. : Комитет по стандартам СССР, 1987. – 128 с.

12. Иванов М.Н. Детали машин : учебник для машиностроительных спец. вузов / М.Н. Иванов, В.А. Финогенов. – 12-е изд., испр. – М. : Высшая школа, 2008. – 408 с.

13. Решетов Д.Н. Детали машин : учебник для вузов / Д.Н. Решетов. – М. : Машиностроение, 1989. – 496 с.

14. Детали машин : учебник для студентов вузов / под ред. О.А. Ряховского. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 520 с.

15. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. / В.И. Анурьев. – М. : Машиностроение, 2001. – Т. 1. – 920 с. ; Т. 2. – 901 с. ; Т. 3. – 859 с.

16. ГОСТ 164381. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. – М. : Стандартинформ, 2014. – 34 с.

17. ГОСТ 16530.83. Передачи зубчатые. Общие термины, определения и обозначения. – М. : Стандартинформ, 2014. – 48 с.

References

1. Fufryanskij N.A. & Bevzenko A.N. *Razvitie lokomotivnoj tyagi* [Development of locomotive traction]. Moscow, Transport Publ., 1988, 344 p. (In Russian)

2. Sakalo V.I. & Kossov V.S. *Kontaktnye zadachi zheleznodorozhnogo transporta* [Contact problems of rail transport]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004, 496 p. (In Russian)

3. Birger I.A., Shorr B.F. & Iosilevich G.B. *Raschet na prochnost' detalej mashin* [Strength analysis of machine components]. Reference guide. Third edition, revised and enlarged. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 702 p. (In Russian)

4. Chichinadze A.V. *Trenie, iznos i smazka* [Friction, wear and lubrication]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 576 p. (In Russian)

5. Makhutov N.A. *Konstruktivnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost'* [Structural strength, load life and technogenic safety]. Pt. 1. *Kriterii prochnosti i resursa* [Criteria of strength and load life]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005, 494 p. (In Russian)

6. GOST 30803-2014. *Kolesa zubchatye tyagovykh peredach tyagovogo podvizhnogo sostava* [Tooth gear of rolling stock's traction drive]. Specifications. Moscow, Standardinform Publ., 2015, 13 p. (In Russian)

7. Zhmak A.A. & Kaljuzhnyj A.A. 13.105.058. *Jelektrovozy 2JeS5K, ZJeS5K, 4JeS5K. Raschet prochnosti zubchatoj peredachi* [Electric locomotives 2JeS5K, ZJeS5K, 4JeS5K. Tooth gear strength analysis]. Novocherkassk, 2015, 22 p. (In Russian)

8. Molvin M.S. & Gol'tsiker D.G. *Tekhnicheskaya mekhanika* [Engineering mechanics]. Pt. 3. *Detali mashin* [Machine components]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1966, 382 p. (In Russian)

9. Mashnev M.M., Kraskovskij E.Ya. & Lebedev P.A. *Teoriya mekhanizmov i mashin i detali mashin* [Mechanism and machine theory and machine components]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1980, 512 p. (In Russian)

10. Dunaev P.F. & Lelikov O.P. *Konstruirovaniye uzlov i detalej mashin* [Designing machine parts and

components]: college textbook. 12th edition, reprint. Moscow, Akademiya Publ., 2009, 496 p. (In Russian)

11. GOST 21354-87. *Peredachi zubchatye tsilindricheskie jevol'ventnye vneshnego zatsepleniya. Raschet na prochnost'* [Gilindrical involvent gears of external engagement. Strength calculation]. Moscow, USSR State Standard Committee Publ., 1987, 128 p. (In Russian)

12. Ivanov M.N. & Finogenov V.A. *Detali mashin* [Machine components]. Textbook for mechanical engineering majors. 12th edition, revised. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2008, 408 p. (In Russian)

13. Reshetov D.N. *Detali mashin* [Machine components]. College textbook. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 496 p. (In Russian)

14. *Detali mashin* [Machine components]. Textbook for college students. Ed. by O.A. Ryakhovskogo. 3rd edition, revised and enlarged. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2007, 520 p. (In Russian)

15. Anur'ev V.I. *Spravochnik konstruktora-mashinostroytelya* [Mechanical engineer's handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001, vol. 1, 920 p., vol. 2, 901 p., vol. 3, 859 p. (In Russian)

16. GOST 1643-81. *Osnovnye normy vzaimozamenyaemosti. Peredachi zubchatye tsilindricheskie. Dopuski* [Cylindrical gears pairs. Accuracy]. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 34 p. (In Russian)

17. GOST 16530-83. *Peredachi zubchatye. Obshchie terminy, opredeleniya i oboznacheniya* [Gears. General terms, definitions and symbols]. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 48 p. (In Russian)

ФЕДОРОВ Игорь Владимирович – старший преподаватель, Fedorov281973@yandex.ru; БЕЛГОРОДЦЕВ Василий Алексеевич – ассистент, Belgorodtsev@list.ru; РАСЩЕПКИНА Дарья Владимировна – аспирант, Rasshepkinadaria7742@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); *КОМИЧЕНКО Станислав Олегович – начальник отдела, Komichenko@gmail.com; ГЕТМАНЕЦ Роман Михайлович – инженер, getmanets@bk.ru (Акционерное общество «Научно-внедренческий центр “Вагоны”»).

УДК 624.21.093.004

С. В. Чижов, Е. Б. Шестакова, Э. Т. Яхшиев**РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ УЗБЕКИСТАНА**

Дата поступления: 26.09.2016

Решение о публикации: 16.12.2016

Цель: Разработка методики оценки динамических воздействий в условиях высокоскоростного движения на железобетонные пролетные строения на примере железных дорог Узбекистана. В связи с развитием сети высокоскоростных железнодорожных магистралей в различных геологических, климатических условиях требуются объективная оценка и обоснование технических характеристик конструктивных элементов мостов с учетом значимых факторов надежности. Для мостов на высокоскоростных железнодорожных магистралях таким фактором также является динамический фактор надежности, обусловленный нагрузками от подвижного состава, сейсмическими воздействиями, ветровыми нагрузками. **Методы:** Системный анализ, математическое моделирование, метод сопоставления аналогий позволяют выявить степень учета факторов надежности, которые определяются функциональным назначением сооружения и зависят от качественного содержания этапов жизненного цикла. Аналогии нормирования надежности идентичных объектов определяют значимость фактора нормативного обеспечения, опыта возведения сооружений, региональных особенностей. **Результаты:** Уточненные расчетные параметры оценки динамической системы «мост–поезд» в условиях высокоскоростного движения. Эти факторы определяют порядок проектирования и строительства сооружений, который обеспечит безопасную эксплуатацию моста. **Практическая значимость:** Заключается в разработке методической основы для динамических расчетов пролетных строений из дисперсно-армированного железобетона. Работа выполнена для решения прикладной задачи, применительно к возведению мостового сооружения на высокоскоростной железнодорожной магистрали с использованием дисперсно-армированного пролетного строения $L = 66$ м в условиях Узбекистана.

Дисперсно-армированное пролетное строение, высокоскоростная магистраль, трещиностойкость, динамика, подвижной состав, подвижная нагрузка, динамический коэффициент, мостовое полотно.

Sergei V. Chizhov, Cand. Eng., associate professor, sergchizh@yandex.ru; **Ekaterina B. *Shestakova**, associate professor, ekaterinamost6@gmail.com; **Elbek T. *Yakhshiev**, postgraduate, elbek-8420@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State University of Transport). DEVELOPING CALCULATION MODELS FOR DETERMINING DYNAMIC CHARACTERISTICS OF REINFORCED CONCRETE SUPERSTRUCTURES OF UZBEKISTAN'S HIGH-SPEED RAILROADS

Objective: Develop a method for assessing dynamic impact under high-speed travel conditions in reinforced concrete superstructures, based on the example of Uzbekistan's railroads. Due to the development of a network of high-speed railroad lines in various geological and climatic conditions, objective assessment and substantiation are required for specifications of structural elements of bridges with account for relevant reliability factors. For bridges on high-speed railroad lines these factors include the dynamic factor of reliability conditioned by load caused by the rolling stock, seismic activity and wind. **Methods:** System analysis, mathematical modeling and analogy comparison methods allow to elicit the extent of consideration for reliability factors which are determined by the functional purpose of a structure and depend on the qualitative content of the life-cycle stages. Analogies of standardization of reliability of identical structures determine the relevance of the regulatory maintenance factor, the experience of structure building and the regional specifics. **Results:** Ascertained calculation parameters for the

assessment of the «bridge and train» dynamic system under the conditions of high-speed movement. These factors determine the order of planning and building of structures which will ensure safe bridge operation. **Practical importance:** Methodology of dynamic calculations for superstructures made from fiber-reinforced concrete. The research was performed to solve an applied problem pertaining to the building of a bridge structure on a high-speed railroad using fiber-reinforced concrete, $L = 66$ m, in the setting of Uzbekistan.

Fiber-reinforced superstructure, high-speed railroad, crack resistance, dynamics, rolling stock, rolling load, dynamic factor, bridge floor.

Как показывает международный опыт возведения железобетонных пролетных строений на сети высокоскоростных железнодорожных магистралей, динамические явления, проявляющиеся на мостах, в значительной степени определяются точностью построения расчетной модели и корректностью определения динамических характеристик пролетного строения.

При этом при разработке расчетной модели динамической системы «поезд–мост» детальной разработке подлежат как часть, связанная с временной нагрузкой, так и конструктивные параметры, определяемые расчетными характеристиками пролетного строения, назначенными при его проектировании. В случае дисперсно-армированного предварительно напряженного пролетного строения длиной $L_p = 66$ м для высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСЖДМ) Узбекистана исходные параметры были обоснованы с учетом российских нормативных требований. Поэтому при проведении прямого динамического расчета они подлежат проверке на расчетной модели, построенной с учетом более широкого диапазона исходных параметров, предполагающих более широкий спектр динамических воздействий.

Разработка нормативных требований в части временной нагрузки на глобальном рынке высокоскоростных поездов предполагает интегрированное взаимодействие производителей подвижного состава и разработчиков требований, обеспечивающих учет особенностей высокоскоростных поездов в нормативных документах.

Рассмотренные нормативные вертикальные нагрузки подвижного состава, используемые в

динамических расчетах мостов для ВСЖДМ Узбекистана, были представлены выборкой высокоскоростных поездов, имеющих расчетные скорости движения более $V = 250$ км/ч.

В соответствии с требованиями расчеты, связанные с воздействиями высокоскоростных поездов, могут выполняться на возможное воздействие любого из указанных поездов:

- 10 поездов А1–А10, являющихся аналогом HSLM по нормам ЕС [1];

- реального поезда «Afrosiyob», эксплуатируемого в условиях Республики Узбекистан.

Так, в зависимости от принятого варианта поезда (табл. 1) его характеристики, влияющие на динамические характеристики системы, варьируют несущественно в сравнительно небольшом диапазоне рассматриваемых значений по величине нагрузки на ось, числу и длине вагонов, базы тележки. Указанные обстоятельства способствуют унификации требований, предъявляемых к характеристикам подвижного состава, как элемента динамической системы «мост–поезд». Наибольшая величина нагрузки на ось $P = 210$ кН соответствует поездам А9, А10, а наименьшая $P = 210$ кН – поезду А1 [2–4].

В качестве основной расчетной временной нагрузки в динамической расчетной модели принимались исходные данные поезда TALGO 250 («Afrosiyob»), разработанного под эксплуатационные параметры ВСЖДМ Узбекистана.

Исходные данные поезда «Afrosiyob» представлены в табл. 2. Количество вагонов принято исходя из ожидаемого пассажиропотока на магистралях. Длина вагона составила $l = 13$ м. Программа модернизации предусматривает поэтапную закупку 21 состава, обеспечиваю-

ТАБЛИЦА 1. Параметры стандартных поездов А1–А10 по нормам ЕС в расчетной модели

Варианты поезда	Промежуточные вагоны			Величина нагрузки на ось, P , кН
	Число вагонов, N , шт.	Длина вагона, l , м	База тележки, D , м	
A1	18	18	2	170
A2	17	19	3,5	200
A3	16	20	2	180
A4	15	21	3	190
A5	14	22	2	170
A6	13	23	2	180
A7	13	24	2	190
A8	12	25	2,5	190
A9	11	26	2	210
A10	11	27	2	210
Общее число вагонов на 4 больше (2 локомотива + 2 служебных).				

ТАБЛИЦА 2. Параметры поезда TALGO 250 («Afrosiyob»)

Параметры		TALGO 250
Вагонов	шт.	9
Локомотивов	шт.	2
Осей в вагоне	шт.	1
Длина вагона	м	13
Длина поезда	м	157
Вес поезда	кН	6800
Осевая нагрузка:		
• максимальная	кН	180
• средняя	кН/м	19,00

щего полный пассажиропоток по основным направлениям движения в Узбекистане.

Решение динамической задачи взаимодействия системы «мост–поезд» осуществляется методами численного моделирования. При этом выбор расчетной модели учитывает комплексный характер поставленной задачи, что определило степень необходимой детализации элементов системы «мост–поезд» [5–8].

На основе базовых расчетных положений предполагалось, что пролетное строение яв-

ляется относительно простой эквивалентной системой в виде балки, обладающей собственной массой, расположенной на двух опорах, по которой перемещается нагрузка (рис. 1).

При перемещении временной нагрузки по пролетному строению происходит изменение частоты колебаний балки. Допущения, связанные с характером распределения реальной и расчетной нагрузок, учитываются динамическими коэффициентами, отражающими

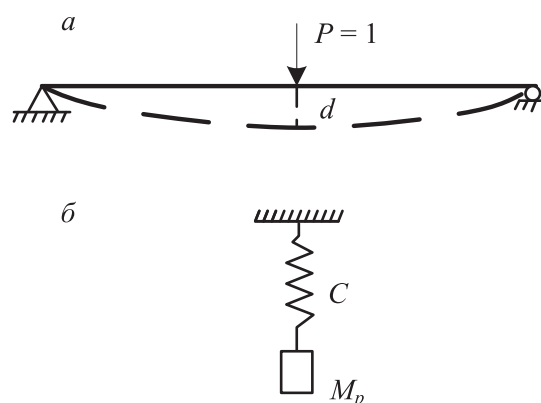


Рис. 1. Балка на двух опорах (а) и простейшая эквивалентная система (б):

d – прогиб, вызванный силой P в середине пролета; C – характеристика жесткости; M_p – приведенная колеблющаяся масса.

способность пролетного строения воспринимать временную нагрузку в определенном диапазоне эксплуатационных параметров, которые обеспечивают безопасность движения поездов. В общем виде график относительного изменения частоты колебаний приведен на рис. 2.

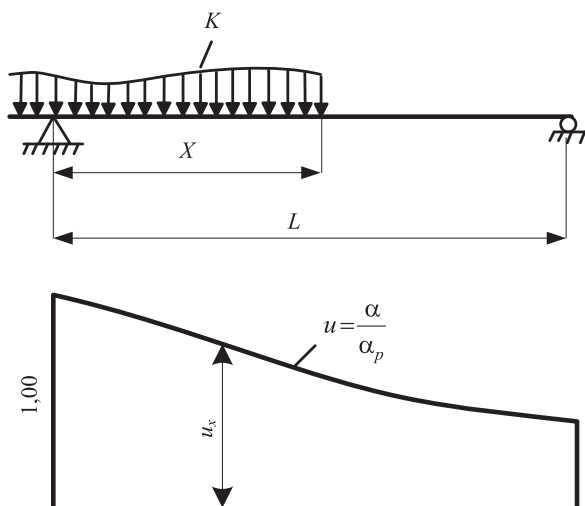


Рис. 2. График относительного изменения частоты колебаний балки при загрузке движущейся временной нагрузкой

Исходя из основных положений, были приняты следующие расчетные модели.

Первая расчетная модель принимается по типу «подвижные силы на балке» (рис. 3).

При этом пролетное строение моделируется упругой балкой конечной массы с вязким затуханием. Поезд был представлен системой движущихся сил. Передача тяговых усилий между вагонами характеризовалась жесткими связями, не допускающими изменений пространственного положения вагонов друг относительно друга в результате динамической работы системы сил. Указанное обстоятельство не оказывало существенного влияния на работу всей динамической системы и было отнесено к возможным допущениям.

Скорость перемещения системы подвижных сил по балке принята как исходный параметр прямого динамического расчета с изменением величины скорости V в диапазоне значений от 10 до 400 км/ч с шагом 20 км/ч.

Определение критических значений скоростей позволило обосновать принятые эксплуатационные скоростные режимы движения высокоскоростных поездов по мостам, возводимым с применением дисперсно-армированных, предварительно-напряженных, железобетонных пролетных строений с расчетным пролетом $L_p = 66$ м, при скоростях движения до 300 км/ч включительно.

Принятые скоростные параметры обеспечивают при максимальных частотах крутильной формы колебаний снижение возможности образования конструктивных дефектов в виде трещин в бетоне балки, в результате уменьшения знакопеременных динамических усилий.

Величины критических скоростей и пиковые значения деформаций пролетного строения, учитывающие «эффект скорости», были определены исходя из расчетных предположений модели.

Вторая расчетная модель принималась по типу «подвижные массы на балке» (рис. 4). При проведении расчетов пролетное строение моделировалось аналогично первой модели, а поезд был представлен системой движущихся масс с жесткими связями, не допускающими изменений пространственного положения вагонов друг относительно друга. В отличие от первой модели подвижные массы на балке позволили оценить выбранные эксплуатационные скоростные режимы с позиции уровня комфорта пассажиров.

Вторая расчетная модель принималась для случаев:

1) при работе системы «колесо–мостовое полотно» в условиях жестких связей, без устройства демпфирующих подкладок под верхнее строение пути, соответствующей действительной работе системы;

2) при работе системы «колесо–мостовое полотно» в условиях упругого основания в виде демпфирующих подкладок, обеспечивающих восприятие динамических воздействий. В качестве исходных параметров демпфера были приняты характеристики системы «Silomer».

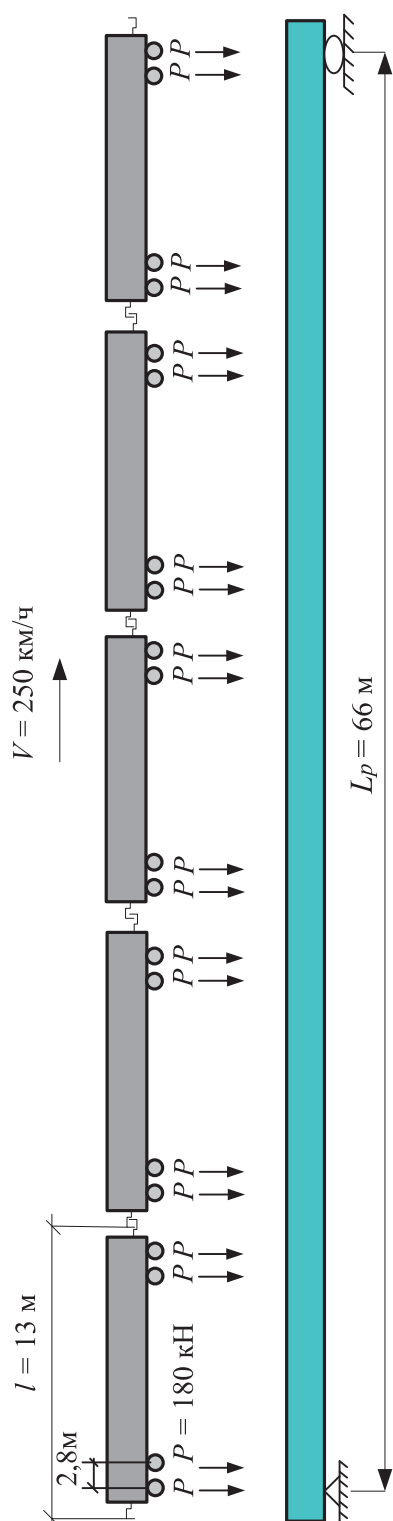


Рис. 3. Модель «подвижные силы на балке»

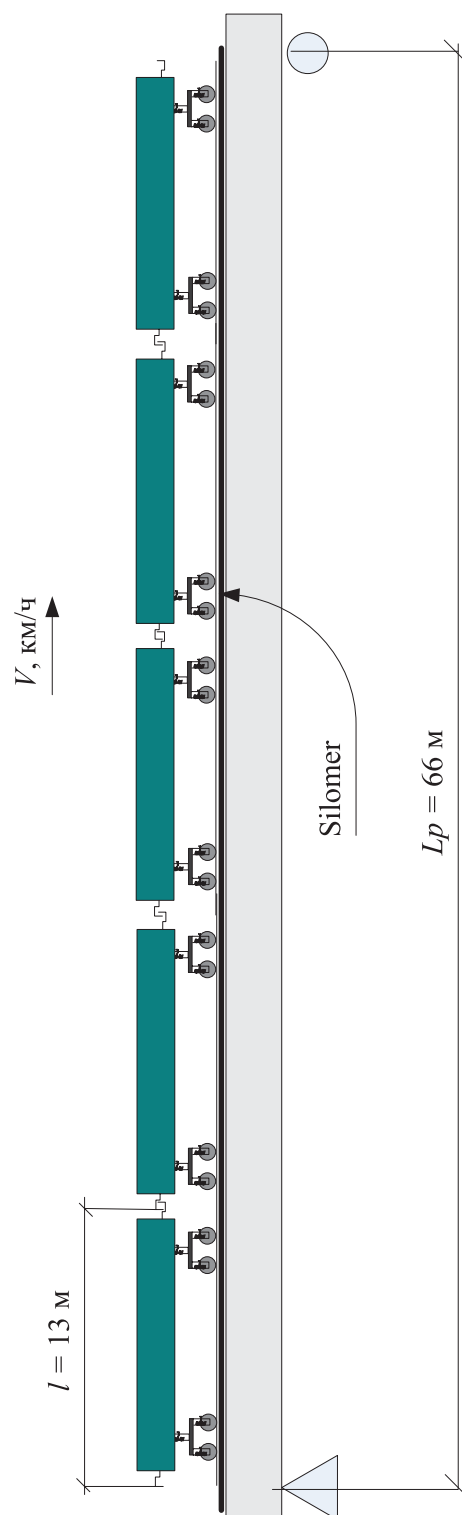


Рис. 4. Модель «подвижные массы на балке» в условиях упругого основания в виде демпфирующих подкладок

Так, на основе анализа ускорений в кузовах вагонов было установлено, что при уменьшении количества стыков рельсов, приходящихся на расчетный пролет, $L_p = 66$ м, с 4 до 1 сила динамического взаимодействия ходовых частей подвижного состава и верхнего строения пути приобретает более равномерный характер, приближающийся при описании к реальному характеру распределенной временной нагрузки [9, 10].

Указанные обстоятельства обуславливаются тем, что если балка будет совершать собственные колебания, то период колебаний T и круговая частота колебаний a будут иными, чем при отсутствии нагрузки.

В случае реализации расчетной модели с применением демпфера круговая частота колебаний балки с учетом динамической добавки масс уменьшается по величине на 57% при увеличении периода собственных колебаний балки, приближаясь к «идеальному» состоянию затухающей колебательной системы под действием сил трения. При этом временная нагрузка приобретает характер первоначальной возбуждающей силы. В этом случае справедливо

$$a = u \cdot a_p,$$

$$T = \frac{T_p}{u},$$

где u – переменный коэффициент (меньше или равный единице), характеризующий изменение динамических свойств балки как системы с одной степенью свободы по мере загрузки балки нагрузкой.

Изменение параметров T и a происходит вследствие возрастания приведенной массы, участвующей в колебаниях. При составлении расчетной модели масса путевой структуры включена в общую массу пролетного строения.

При некотором положении заданной нагрузки на балке, соответствующем локальным неровностям, стыкам пути или дефектам колес, приведенная масса максимальна и равна

$$M_{\max} = M_p + M_k,$$

где M_p – приведенная собственная масса балки; M_k – максимальная приведенная масса временной нагрузки.

При иных положениях нагрузки, когда неровности пути частично или полностью отсутствуют, приведенная масса определяется особенностями, главным образом состоянием приводных механизмов, колесных пар, и составляет [11, 12]

$$M_{\max} = M_p + i \cdot M_k,$$

где $i \leq 1$ – переменный коэффициент, характеризующий изменение величины приведенной массы временной нагрузки по мере движения. Поскольку связь между параметрами M и a носит прямой характер исходя из зависимости

$$a^2 = \frac{C}{M},$$

то коэффициенты i и u также связаны по следующему закону:

$$u^2 = \frac{1}{1 + i \cdot \frac{M_k}{M_p}}.$$

Обозначим отношение $M_k : M_p = \psi$, тогда

$$u = \frac{1}{\sqrt{1 + i \cdot \psi}}.$$

Если постоянная и временная нагрузки являются равномерно распределенными, то

$$\psi = \frac{k}{p},$$

где k – интенсивность временной нагрузки; p – интенсивность постоянной нагрузки.

Когда временная нагрузка Q_k носит сосредоточенный характер, а постоянная – равномерно распределенный, то справедливо выражение

$$\psi = \frac{35}{17} \cdot \frac{Q_k}{Q_p},$$

где $Q_p = p \cdot l$ – вес балки.

При формировании расчетной модели для вычисления динамических характеристик сооружения, значений динамических нагрузок, деформаций и реакций в элементах были учтены исходные расчетные параметры [1, 10], приведенные в табл. 3.

Расчетные модели к определению динамических характеристик пролетного строения,

принятые на основании требований к временной нагрузке и основных конструктивных параметров, позволяют достоверно оценить состояние системы «поезд–пролетное строение», исходя из задач, связанных с целью проводимого расчета и динамических характеристик пролетного строения.

Исходные параметры динамического расчета включали основные и достаточные характеристики, позволяющие определить возможные расчетные состояния. Диапазон изменений параметров в расчетных моделях со-

ТАБЛИЦА 3. Исходные основные параметры прямого динамического расчета

Параметры	Единица измерения	Значение
Максимальное ускорение – a	м/с ²	1
Осевая нагрузка – P	кН/м	19,978
Максимальные прогибы – δ_p	мм	0,098
Собственные частоты колебаний конструкции по соответствующим формам колебаний – f_1	Гц	56,842
Динамическая добавка, учитывает динамические явления, вызванные дефектами пути и колес, – μ_2		$4,278 \cdot 10^{-2}$
Эксплуатационная скорость подвижного состава – V	м/с	250
Частоты, крутильная форма колебаний – $n_{0в}$	Гц	4,127
Частоты, изгибная форма колебаний – $n_{0н}$	Гц	1,974
Собственные частоты – n_0	Гц	3,05
Коэффициент, учитывающий для изменение ветрового давления, – K		0,172
Коэффициент, угол сдвига фазы действия периодической силы – φ'		1,209
Длина пролета или линии влияния рассчитываемого элемента – L_p	м	66
Масса элементов конструкции – m_n	т	934
Число осей в поезде – n	шт.	18
Осевые нагрузки – q	кН	180
Интервалы между осями – $l_{ось}$	м	2,8
Погонный собственный вес – Q	кН/м	141,65
Жесткость конструкции – E_I	МН·м ²	462 250

ответствовал реальным условиям, что обеспечивало достоверность исследований [13–15].

Для описания комплексного характера динамической работы вагонов поезда использовались основные и дополнительные исходные параметры. Дополнительные параметры позволили оценить локальные влияния дефектов рельсового пути, характеристик подвижного состава на динамические характеристики системы.

Расчетная модель «подвижные силы на балке» дает возможность выявить особенности работы конструкции, связанные с предельными деформациями пролетного строения, расчетом критических предельных скоростей, определяющих возможность обеспечения заданного скоростного режима движения высокоскоростных поездов. Эта модель позволяет определить практические мероприятия по обеспечению комфорта пассажиров и выявления особенностей, связанных с динамическими характеристиками верхнего строения пути.

Библиографический список

1. Богданов Г. И. Железобетонные мосты / Г. И. Богданов, В. Н. Смирнов. – СПб. : ПГУПС, 2005. – 127 с.
2. Бондарь Н. Г. Взаимодействие железнодорожных мостов с подвижным составом / Н. Г. Бондарь, Ю. Г. Козьмин, З. Г. Ройтбурд и др. / под ред. Н. Г. Бондаря. – М. : Транспорт, 1984. – 272 с.
3. Ботвинкин Н. Н. Руководство по сейсмостойкости сооружений / Н. Н. Ботвинкин. – Ташкент : Средне-Азиат. отд. Объед. гос. изд-во, 1993. – 160 с.
4. EN 1991-2: Eurocode 1: Actions on structures. P. 2: Traffic loads on bridges, 2003.
5. Гарг В. К. Динамика подвижного состава / В. К. Гарг, Р. В. Дуккипати. – М. : Транспорт, 1988. – 391 с.
6. Смирнов В. Н. Динамическая работа мостов высокоскоростных железнодорожных магистралей при продольных воздействиях поездной нагрузки : монография / В. Н. Смирнов. – СПб. : ПГУПС, 2013. – 64 с.

7. Уздин А. М. Уточнение коэффициента сочетаний сейсмической и подвижной нагрузок при расчете железнодорожных мостов / А. М. Уздин // Экспресс-информация «Сейсмостойкое строительство». – 1983. – Вып. 10. – С. 20–23.

8. ШНК 2.05.03-11. Мосты и трубы. – М., 2011.

9. Смирнов В. Н. Особенности высокоскоростного движения железнодорожных экспрессов по мостам / В. Н. Смирнов. – СПб. : ПГУПС, 2015. – 57 с.

10. Чижов С. В. Оценка безопасности мостов с учетом динамического фактора надежности / С. В. Чижов, Э. Т. Яхшиев, Л. К. Дьяченко // Изв. ПГУПС. – 2014. – № 2 (47). – С. 247–254.

11. Чижов С. В. К вопросу прогноза степени усадки бетона / С. В. Чижов, С. А. Кузнецов. – СПб. : Изд. Фонда развития науки и культуры, 2014. – № 8 (41). – С. 46–49.

12. Чижов С. В. Прогнозирование процесса карбонизации бетона / С. В. Чижов, С. А. Кузнецов. – СПб. : Изд. Фонда развития науки и культуры, 2014. – № 11 (62). – С. 76–81.

13. Чижов С. В. О требованиях к мостам при высокоскоростном движении / С. В. Чижов, Э. Т. Яхшиев // Изв. ПГУПС. – 2014. – Вып. 4. – С. 87–91.

14. Шермухамедов У. З. Гашение продольных сейсмических колебаний опор балочных мостов с сейсмоизолирующими опорными частями : автореф. канд. дис. / У. З. Шермухамедов. – М. : МИИТ, 2010. – 23 с.

15. Бегам Л. Г. Надежность мостовых переходов через водотоки / Л. Г. Бегам, В. Ш. Цыпин. – М. : Транспорт, 1984. – 252 с.

References

1. Bogdanov G. I., Smirnov V. N. *Zhelezobetonnye mosty [Reinforced concrete bridges]*. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2005, 127 p. (In Russian)
2. Bondar N. G., Kozmin Yu. G., Roytburd Z. G. et al. *Vzaimodejstvie zheleznodorozhnykh mostov s podvizhnym sostavom [Interaction of railway bridges with rolling stock]*. Ed. by N. G. Bondar. Moscow, Transport Publ., 1984, 272 p. (In Russian)
3. Botvinkin N. N. *Rukovodstvo po sejsmostojkosti sooruzhenij [Guidebook for seismic resistance of structures]*. Tashkent, Central Asian department of

unified state publishing house, 1993, 160 p. (In Russian)

4. EN 1991-2. *Eurocode 1: Actions on structures. P. 2: Traffic loads on bridges*, 2003. (In Russian)

5. Garg V.K., Dukkipati R.V. *Dinamika podvizhnogo sostava* [Rolling stock dynamics]. Moscow, Transport Publ., 1988, 391 p. (In Russian)

6. Smirnov V.N. *Dinamicheskaya rabota mostov vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralej pri prodol'nykh vozdeystviyakh poezdnoj nagruzki* [Dynamic operation of high-speed railway bridges under longitudinal impact of train loads]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2013, 64 p. (In Russian)

7. Uzdin A.M. Utochnenie koefitsienta sochetanij sejsmicheskoy i podvizhnoj nagрузок pri raschete zheleznodorozhnykh mostov [Ascertaining the combination factor of seismic and rolling loads in calculating railroad bridges]. *Seismic-resistant construction alerting service*, 1983, issue 10, pp. 20–23. (In Russian)

8. *Planning Rules and Regulations 2.05.03-11. Mosty i truby* [Bridges and pipes]. Moscow, 2011. (In Russian)

9. Smirnov V.N. *Osobennosti vysokoskorostnogo dvizheniya zheleznodorozhnykh jekspressov po mostam* [Specifics of high-speed movement of railway express trains on bridges]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2015, 57 p. (In Russian)

10. Chizhov S.V., Yakhshiev Je.T., D'yachenko L.K. Otsenka bezopasnosti mostov s uchetom dinamicheskogo faktora nadezhnosti [Assessment of bridge safety with consideration for the dynamic reliability factor]. *Izvestiya Peterburgskogo univer-*

siteta putej soobshcheniya [The St. Petersburg Transport University Bulletin]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, issue 2 (47), pp. 247–254. (In Russian)

11. Chizhov S.V., Kuznetsov S.A. K voprosu prognoza stepeni usadki betona [Concerning forecasts of the extent of concrete shrinkage]. *The science and culture development foundation* (Saint Petersburg), 2014, no. 8 (41), pp. 46–49. (In Russian)

12. Chizhov S.V., Kuznetsov S.A. Prognozirovaniye protsessa karbonizatsii betona [Forecasting the concrete carbonization process]. *The science and culture development foundation* (Saint Petersburg), 2014, no. 11 (62), pp. 76–81. (In Russian)

13. Chizhov S.V., Yakhshiev Je.T. O trebovaniyakh k mostam pri vysokoskorostnom dvizhenii [On requirements for high-speed railway bridges]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [The St. Petersburg Transport University Bulletin]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, issue 4, pp. 87–91. (In Russian)

14. Shermukhamedov U.Z. *Gashenie prodol'nykh sejsmicheskikh kolebanij opor balochnykh mostov s sejsmoizoliruyushchimi opornymi chastyami* [Dampening longitudinal seismic vibrations of beam bridge foundations with aseismic bearing pads] : author's abstract of a PhD thesis. Moscow, MIIT Publ., 2010, 23 p. (In Russian)

15. Begam L.G., Tsypin V. Sh. *Nadezhnost' mostovykh perekhodov cherez vodotoki* [Reliability of bridgework over water passageways]. Moscow, Transport Publ., 1984, 252 p. (In Russian)

ЧИЖОВ Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, sergchizh@yandex.ru; *ШЕСТАКОВА Екатерина Борисовна – доцент кафедры «Мосты», ekaterinamost6@gmail.com; *ЯХШИЕВ Элбек Толипович – аспирант, elbek-8420@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 621.396.931

**В. В. Шматченко, Д. Н. Роенков, П. А. Плеханов,
В. Г. Иванов, Н. В. Яронова**

ВЛИЯНИЕ ОТКАЗОВ И СБОЕВ СИСТЕМЫ РАДИОСВЯЗИ GSM-R НА БЕЗОПАСНОСТЬ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА

Дата поступления: 29.09.2016

Решение о публикации: 28.10.2016

Цель: Оценить действие отказов и сбоев систем цифровой радиосвязи стандарта GSM-R, использовавшихся различными правообладателями на железных дорогах Европы, на своевременность прибытия поездов и безопасность перевозочного процесса. **Методы:** Использовались методы анализа риска, включающие идентификацию опасных событий, оценку частоты их появления, оценку тяжести последствий, а также определение мер по снижению риска опасных событий (в соответствии со стандартами Комитета CENELEC EN 50126 и EN 50129). **Результаты:** В ходе выполненного исследования были получены следующие основные результаты: 1) обработаны статистические данные по отказам и сбоям технических средств системы цифровой радиосвязи GSM-R на железных дорогах Европы; 2) определены причины появления этих отказов и сбоев в технических средствах цифровой радиосвязи стандарта GSM-R; 3) получена классификация отказов и сбоев при выполнении основных функций (функций передачи речи и передачи данных) стандарта GSM-R, как причин снижения безопасности и готовности перевозочного процесса; 4) выполнена оценка отказов и сбоев функций передачи речи и данных стандарта GSM-R в терминах уровней полноты (гарантированности) безопасности; 5) разработаны рекомендации по минимизации действия этих отказов и сбоев, которые включают предложения организационного характера (например, совершенствование правил эксплуатации железнодорожной радиосвязи), технического характера (повышение надежности сетевого оборудования) и системного характера (совершенствование процедуры аварийного вызова). **Практическая значимость:** Полученные классификация отказов и сбоев, методика оценки риска могут быть применены при проектировании сетей связи стандарта GSM-R и других систем цифровой радиосвязи на железнодорожном транспорте, а также при разработке доказательства безопасности этих систем.

Отказ, сбой, GSM-R, поездная радиосвязь, надежность, безопасность, уровни полноты безопасности, EN 50126, EN 50129, передача речи, передача данных.

Vladimir V. Shmatchenko, Cand. Eng., assistant professor, railwayradio@gmail.com; **Dmitriy N. Roenkov**, Cand. Eng., assistant professor, roenkov_dmitry@mail.ru; **Pavel A. Plekhanov**, Cand. Eng., assistant professor, pavelplekhanov@gmail.com; **Viktor G. Ivanov**, senior lecturer, ivanov.v.g.spb@gmail.com; ***Natalya V. Yaronova**, postgraduate student, tatochka83@list.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) EFFECT OF MALFUNCTIONS AND FAILURES OF GSM-R DIGITAL RADIO ON RAILWAY TRANSPORTATIONS SAFETY

Objective: To evaluate the effect of failures and malfunctions of GSM-R digital radio, used by different dutyholders of European railways, on the railway safety and availability. **Methods:** Methods of risk analysis including hazard identification, assessment of their frequencies and consequences, and risk minimization measures determination, as well, were used (in accordance with CENELEC Committee EN 50126 and EN 50129 standards). **Results:** 1. European railways FRACAS systems data processing concerning malfunctions and failures of the GSM-R systems components. 2. The causes determination

of the malfunctions and failures in the GSM-R system devices and subsystems. 3. Classification of failures and malfunctions, taking place in the processes of main functions of GSM-R fulfillment (voice and data functions), as the causes of railway transportation safety and availability reducing. 4. Evaluation of failures and malfunctions, taking place in GSM-R voice and data functions, in terms of safety integrity levels. 5. Proposals development to minimize the effect of these failures and malfunctions; the proposals include operational measures (i. e. operational rules improvement), technical measures (i. e. network equipment reliability improvement) and system measures (i. e. emergency call procedure improvement). **Practical importance:** The classification and technique received can be applied for designing of GSM-R and other digital radio systems and for Safety Case preparation as well.

Failure, malfunction, GSM-R, train radio, reliability, safety, safety integrity levels, EN 50126, EN 50129, voice transmission, data transmission

Введение

Одной из основных задач применения цифровой поездной радиосвязи (ПРС) на железнодорожном транспорте, в том числе на высокоскоростных железных дорогах [1, 2], является обеспечение безопасности движения поездов [3–5]. При этом основными функциями цифровой ПРС являются следующие:

- функции передачи речи (индивидуальный и групповой вызовы);
- функции передачи данных (передача пакетов).

Таким функционалом обладают разработанные институтом ETSI (European Telecommunications Standards Institute – Европейский институт стандартов в области телекоммуникаций) стандарты радиосвязи TETRA (Terrestrial Trunked Radio), DMR (Digital Mobile Radio), GSM-R (Global System for Mobile communications – Railway), которые применяются на железных дорогах.

Классификация отказов и сбоев в сетях GSM-R

В настоящее время на европейских железных дорогах, включая высокоскоростные, широкое распространение получила цифровая радиосвязь стандарта GSM-R [6], которая, как показал 15-летний опыт ее применения [7], имеет не только достоинства, но и недостатки.

Европейским железнодорожным агентством (ERA – European Railway Agency) был составлен вопросник аудита, включающий следующие блоки вопросов:

- достоинства и недостатки функции передачи речи;
- достоинства и недостатки функции передачи данных;
- возможности совершенствования функций передачи речи и данных.

Ответы на вопросы аудита были получены от организаций, представленных в табл. 1.

По результатам проведенного аудита был подготовлен отчет [7], в котором представлены данные об отказах и сбоях ПРС, имевших место при эксплуатации GSM-R, проанализированы их последствия и мнения линейного персонала по существу этих последствий и возможностей их предотвращения. В табл. 2 приведен перечень этих отказов и сбоев.

У всех перечисленных сбоев и отказов имеются причины, представленные в табл. 3, которая также содержит описание последствий сбоев и отказов для безопасности движения поездов.

Анализ действия отказов и сбоев в сетях GSM-R на безопасность движения поездов

Данные, представленные в табл. 3, позволяют оценить эти отказы и сбои по уровням

ТАБЛИЦА 1. Перечень респондентов аудита

Вид организации	Страны
Менеджер инфраструктуры	Швейцария, Бельгия, Германия, Финляндия, Швеция, Австрия, Франция, Чешская республика, Великобритания, Словакия, Италия, Нидерланды
Национальный регулирующий орган в области транспортной безопасности	Финляндия, Польша, Чешская республика, Германия, Испания, Великобритания, Литва, Италия, Нидерланды
Оператор-перевозчик	Финляндия, Швеция, Норвегия, Австрия, Финляндия, Франция, Германия, Италия, Великобритания
Поставщики	NSN (Nokia Siemens Network), Kapsch, Siemens
Другие	RSSB – орган по стандартизации в области железнодорожной безопасности (Великобритания)

ТАБЛИЦА 2. Отказы и сбои при выполнении основных функций ПРС стандарта GSM-R

Отказы и сбои функций передачи речи	Отказы и сбои функций передачи данных
Сбой при тестировании. Отказ в доступе к услугам связи. Проблемы передачи соединения при пересечении национальных границ. Проблемы регистрации подвижного состава при пересечении национальных границ	
Ошибочный аварийный вызов. Отказ передачи аварийного вызова. Отказ передачи индивидуального вызова, группового вызова, прерывание группового соединения. Неверная адресация при индивидуальном вызове или аварийном вызове ДНЦ → ТЧМ (поездной диспетчер → машинист локомотива)	Задержка передачи данных о маршруте следования

ТАБЛИЦА 3. Отказы и сбои в цифровой системе ПРС стандарта GSM-R и меры по снижению связанного с ними риска

Отказы и сбои	Причины	Последствия	Уровень полноты безопасности	Меры по снижению риска
Сбой при тестировании	Неисправность оборудования ПРС	—	—	Нет
Задержка передачи данных по радиоканалу о маршруте следования	Сбой канала GPRS	—	—	

Продолжение табл. 3

Отказы и сбои	Причины	Последствия	Уровень полноты безопасности	Меры по снижению риска
Ошибочный аварийный вызов	Недоработка человеко-машинного интерфейса	Недостаточность гарантий безопасности (возможное экстренное торможение в результате ошибочного аварийного вызова имеет потенциал серьезного травмирования людей)	SIL 2	Совершенствование интерфейса и процедуры передачи аварийного вызова
Отказ в доступе к услугам связи	Неисправность сетевой инфраструктуры GSM-R	Недостаточность гарантий безопасности (повышение вероятности появления опасных событий из-за неполучения важного распоряжения)	SIL 2	Повышение надежности сетевого оборудования
Проблемы регистрации подвижного состава при пересечении национальных границ	Недоработка процедуры межнационального роуминга, обусловленная различиями в правилах эксплуатации	Недостаточность гарантий безопасности (повышение вероятности появления опасных событий из-за неполучения важного распоряжения (15–30 мин на 1 поезд))	SIL 4+	Совершенствование процедуры роуминга и правил эксплуатации. Временное применение других средств связи
Проблемы передачи соединения при пересечении национальных границ	Несовершенство процедуры передачи соединения	Недостаточность гарантий безопасности (повышение вероятности появления опасных событий из-за задержек получения важного распоряжения, потери связи на время до 20 с)	SIL 4+	Совершенствование процедуры передачи соединения. Временное применение других средств связи
Отказ передачи аварийного вызова GSM-R	Неисправность оборудования ПРС (из-за повреждения при крушении поезда на каменной осыпи)	Недостаточность гарантий безопасности (две аварийных ситуации подряд с потенциалом схода 2-го поезда и гибели людей в нем)	SIL 4+	Повышение надежности оборудования ПРС. Временное применение других средств связи
		Недостаточность гарантий безопасности (возможное ухудшение состояния травмированных при сходе поезда пассажиров из-за несвоевременной помощи)	SIL 4+	
	Помехи со стороны публичных сетей GSM	Недостаточность гарантий безопасности (повышение тяжести последствий опасного события из-за несвоевременности передачи аварийного вызова)	SIL 4+	Частотно-территориальное планирование (ЧТП) + государственное регулирование в сфере распределения частот

Окончание табл. 3

Отказы и сбои	Причины	Последствия	Уровень полноты безопасности	Меры по снижению риска
Отказ передачи группового вызова, прерывание группового соединения	Помехи со стороны побочных сетей GSM	Недостаточность гарантий безопасности (несколько столкновений при маневровых работах (без человеческих жертв, но со значительным потенциалом их появления))	SIL 4+	ЧТП + государственное регулирование в сфере распределения частот
Отказ передачи индивидуального вызова GSM-R		Недостаточность гарантий безопасности (повышение вероятности появления опасных событий из-за задержек получения важного распоряжения)	SIL 4+	
Неверная адресация при индивидуальном вызове ДНЦ→ТЧМ	Неправильное определение соты, в которой находится поезд	Недостаточность гарантий безопасности (вызов ДНЦ был направлен в соту, из которой вызываемый поезд уже вышел, повышение вероятности появления опасных событий из-за неполучения важного распоряжения)	SIL 4+	Настройка системы на автоматическое перенаправление вызова при отсутствии соединения
Неверная адресация при аварийном вызове ДНЦ→ТЧМ			SIL 4+	

полноты безопасности (Safety Integrity Levels – *SIL*) [8, 9]. Полнота безопасности – способность системы к выполнению функции безопасности при всех заданных условиях в течение установленного промежутка времени. Для определения уровня полноты безопасности можно использовать метод [8, 10], который иллюстрируется рисунком.

Параметры риска C , T , P , F определены в табл. 4.

Для этих параметров действуют следующие соотношения:

$$C_1 < C_2 < C_3 < C_4,$$

$$T_1 < T_2,$$

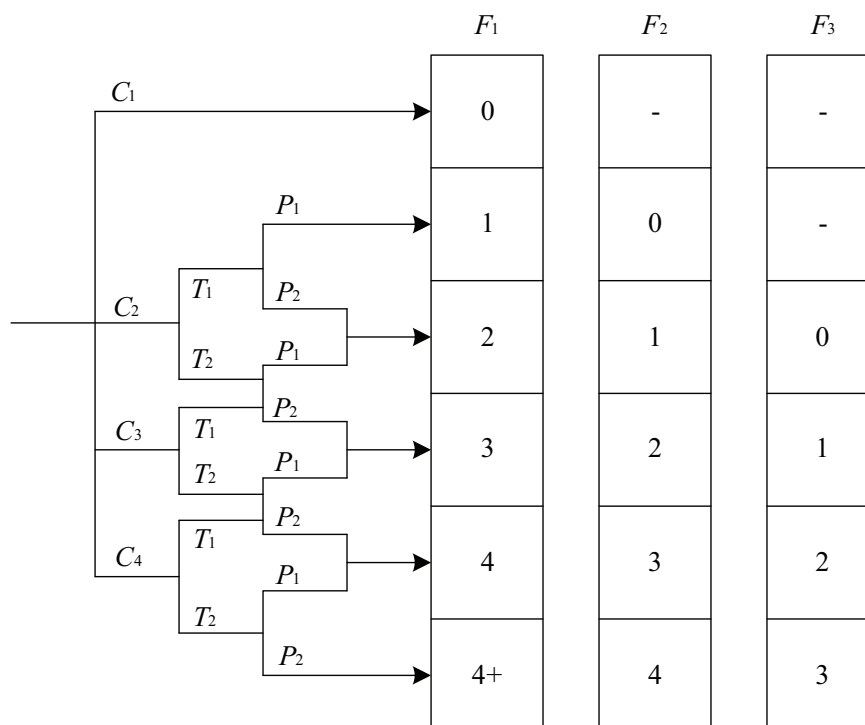
$$P_1 < P_2,$$

$$F_1 < F_2 < F_3.$$

Параметрами риска выражаются факторы, действие которых носит ключевой характер для обеспечения безопасности и соответственно для ее классификации по уровням *SIL*.

Определение уровней *SIL* осуществляется следующим образом:

- выбирается одно значение C из четырех, т. е. возможный потенциал последствий опасного события;
- выбирается одно значение T из двух, т. е. значительное или незначительное время экспозиции;
- выбирается одно значение P из двух, т. е. можно или нельзя предотвратить опасное событие;
- выбирается одно значение F из трех, т. е. является ли опасное событие частым, редким или очень редким.



Определение уровней полноты безопасности

ТАБЛИЦА 4. Определение уровней полноты безопасности

Параметры риска		Градация параметров
Тяжесть последствий	C_1	Легкие травмы, незначительный ущерб
	C_2	Тяжелые травмы, смерть одного человека, значительный, но поправимый ущерб
	C_3	Несколько погибших, значительный ущерб с длительным восстановлением
	C_4	Множество погибших, катастрофический ущерб
Время экспозиции	T_1	Незначительное
	T_2	Значительное и постоянное
Возможность предотвращения (подконтрольность)	P_1	Предотвращение опасного события возможно
	P_2	Событие неотвратимо
Вероятность появления опасного события	F_1	Очень низкая (очень редкие события)
	F_2	Низкая (редкие события)
	F_3	Высокая (частые события)

В результате будет получено одно из значений *SIL*:

- допустимый риск, никакие требования по безопасности не предъявляются;

0

SIL 1

могут быть предъявлены специальные требования по безопасности (требования заказчика);
низкий уровень полноты безопасности;

- SIL 2* повышенный уровень полноты безопасности;
- SIL 3* высокий уровень полноты безопасности;
- SIL 4* наивысший уровень полноты безопасности;
- SIL 4+* необходимы диверситет электрических или электронных систем и глубокий анализ причинно-следственных связей.

Мероприятия по обеспечению уровней полноты безопасности *SIL1*, *SIL2*, *SIL3*, *SIL4* изложены в документе Европейского комитета по стандартизации в области электротехники CENELEC EN 50126 (действующая редакция – стандарт IEC 62278 [9]), а действия по контролю этих мероприятий – в документе EN 50129 (действующая редакция – стандарт IEC 62425 [11]).

Применение рассмотренного метода к причинам и последствиям отказов и сбоев цифровой системы ПРС стандарта GSM-R позволило получить оценки уровней *SIL* для этих отказов и сбоев и предложить меры по снижению связанного с ними риска (см. табл. 3) [12].

Для того чтобы исключить указанные последствия, необходима такая система радиосвязи, отказы и сбои которой должны быть сведены к минимуму.

При этом меры по предотвращению возможных последствий можно разделить на три группы:

- реализация дополнительных функций обеспечения безопасности;
- совершенствование процессов применения системы радиосвязи;
- настройки системы радиосвязи.

Большинство отказов и сбоев являются серьезными и измеряются уровнями полноты безопасности *SIL 4+* [12] (в качестве последствий может быть гибель людей).

Представленный подход к оценке уровней полноты безопасности позволяет эффективно классифицировать опасные события (отказы и сбои) и определить меры по снижению связанного с ними риска в соответствии с этой классификацией.

Заключение

В статье рассмотрено применение методологии определения уровней полноты безопасности [9, 10] для анализа риска отказов и сбоев, имевших место на железных дорогах Европы [7]. Результаты анализа риска позволили установить высокий уровень угроз, связанных с некоторыми отказами и сбоями. Определенные угрозы были выражены уровнями полноты безопасности (*SIL*) в соответствии с действующими стандартами [9, 11]. Предложены меры по снижению риска, связанного с отказами и сбоями, направленные на уменьшение вероятности появления и время экспозиции, а также на возможность предотвращения этих отказов и сбоев. Данные меры должны быть обязательно рассмотрены и учтены в [13–15], а также при проектировании систем управления движением транспортных средств.

В связи с вышеизложенным представляется целесообразным провести анализ отказов и сбоев в сетях GSM-R на своевременность прибытия поездов (готовность).

Библиографический список

1. Специальные технические условия «Железнодорожная электросвязь участка Москва–Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва–Казань–Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству железнодорожной радиосвязи». – СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. – 50 с.
2. Специальные технические условия «Проверка действия и контроль параметров поездной радиосвязи и беспроводных систем передачи данных на участке Москва–Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва–Казань–Екатеринбург». – СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. – 30 с.
3. Плеханов П. А. Вопросы обеспечения безопасности железнодорожных телекоммуникационных систем международных транспортных коридоров / П. А. Плеханов // Бюл. результатов науч. исследований. – 2012. – № 3 (2). – С. 85–97.

4. Шматченко В.В. Расширение функциональной полноты и требований по безопасности к поездной радиосвязи при переходе с аналоговых на цифровые технологии / В.В. Шматченко, П.А. Плеханов, Д.Н. Роенков, В.Г. Иванов, П.Е. Ерлыков // Бюл. результатов науч. исследований. – 2015. – № 2 (15). – С. 61–71.

5. Шматченко В.В. Требования по надежности, готовности и ремонтпригодности для сетей GSM-R / В.В. Шматченко, П.Н. Ерлыков, П.А. Плеханов // Изв. ПГУПС. – 2010. – Вып. 1. – С. 94–106.

6. Роенков Д.Н. Основные требования к организации радиосвязи на высокоскоростной магистрали / Д.Н. Роенков, В.В. Шматченко, П.А. Плеханов, В.Г. Иванов // Транспорт Российской Федерации. – 2015. – № 2 (57). – С. 49–52.

7. Operational requirements of railway radio communication systems. – European railway agency, 2014. – 77 p.

8. ГОСТ Р МЭК 61508-5-2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2013. – 47 с.

9. IEC 62278 Railway applications – Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS)¹. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2002. – 162 с.

10. IEC 62280 Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety-related communication in transmission systems². – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2014. – 136 с.

11. IEC 62425 Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety related electronic systems for signalling³. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2007. – 198 с.

¹ Железнодорожные приложения – Обоснование и подтверждение выполнения требований по надежности, готовности, ремонтпригодности и безопасности.

² Железнодорожные приложения – Системы связи, сигнализации и обработки данных. Безопасная передача данных в системах связи.

³ Железнодорожные приложения – Системы связи, сигнализации и обработки данных. Безопасные электронные системы сигнализации.

12. Шматченко В.В. Основные функциональные требования к системе радиосвязи для магнитолевитационного транспорта / В.В. Шматченко, Д.Н. Роенков, Н.В. Яронова // 4-я Междунар. науч. конференция «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии». – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. – С. 85–86.

13. EIRENE (European Integrated Railway Radio Enhanced Network). Functional Requirements Specification / Version 7.3.0. – European railway agency, 2012. – 111 p. – URL: <http://www.era.europa.eu> (дата обращения: 20.08.2016).

14. EIRENE (European Integrated Railway Radio Enhanced Network). System Requirements Specification / Version 16.0.0. – European railway agency, 2015. – 197 p. – URL: <http://www.era.europa.eu> (дата обращения: 20.08.2016).

15. GSM-R Implementation and Procurement Guide / Version V 1.0–15.03.2009. Paris: UIC, 2009. – 251 p.

References

1. Spetsial'nye tekhnicheskie usloviya “Zheleznodorozhnaya jelektrosvyaz' uchastka Moskva–Kazan' vysokoskorostnoj zheleznodorozhnoj magistrali Moskva–Kazan'–Ekaterinburg. Tekhnicheskie normy i trebovaniya k proektirovaniju i stroitel'stvu zheleznodorozhnoj radiosvyazi” [Project-specific design code “Railway telecommunications on the Moscow–Kazan section of high-speed railway line Moscow–Kazan–Yekaterinburg. Technical standards and requirements for the planning and construction of railway radio communications”]. Saint Petersburg, FGBOU VO PGUPS Publ., 2016, 50 p. (In Russian)

2. Spetsial'nye tekhnicheskie usloviya “Proverka dejstviya i kontrol' parametrov poezdnoj radiosvyazi i besprovodnykh sistem peredachi dannykh na uchastke Moskva–Kazan' vysokoskorostnoj zheleznodorozhnoj magistrali Moskva–Kazan'–Ekaterinburg” [Project-specific design code “Functional check and parameter checkout of train radio communications and wireless data transmission systems on the Moscow–Kazan section of high-speed railway line Moscow–Kazan–Yekaterinburg”]. Saint Petersburg, FGBOU VO PGUPS Publ., 2016, 30 p. (In Russian)

3. Plekhanov P.A. Voprosy obespecheniya bezopasnosti zheleznodorozhnykh telekommunikatsionnykh sistem mezhdunarodnykh transportnykh koridorov [Safety arrangements for railway telecommunications systems in international transportation corridors]. *Scientific research results bulletin*, 2012, no. 3 (2), pp. 85–97. (In Russian)
4. Shmatchenko V. V., Plekhanov P. A., Roenkov D. N., Ivanov V. G. & Erlykov P. E. Rasshirenie funktsional'noj polnoty i trebovanij po bezopasnosti k poezdnoj radiosvyazi pri perekhode s analogovykh na tsifrovye tekhnologii [Increasing the functional integrity and safety requirements for train radio communications when transferring from analog to digital technology]. *Scientific research results bulletin*, 2015, no. 2 (15), pp. 61–71. (In Russian)
5. Shmatchenko V. V., Erlykov P. N. & Plekhanov P. A. Trebovaniya po nadezhnosti, gotovnosti i remontoprigodnosti dlya setej GSM-R [Reliability, readiness and maintainability requirements for GSM-R networks]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [The St. Petersburg Transport University Bulletin]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2010, issue 1, pp. 94–106. (In Russian)
6. Roenkov D. N., Shmatchenko V. V., Plekhanov P. A. & Ivanov V. G. Osnovnye trebovaniya k organizatsii radiosvyazi na vysokoskorostnoj magistrali [Principal requirements for the organization of radio communications on a high-speed railway line]. *Transport Rossijskoj Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2015, no. 2 (57), pp. 49–52. (In Russian)
7. *Operational requirements of railway radio communication systems*. European railway agency, 2014, 77 p.
8. GOST IEC 61508–5-2012. *Functional safety of electrical, electronic, programmable electronic safety-related systems*. Moscow, FGUP Standartinform Publ., 2013, 47 p. (In Russian)
9. IEC 62278 *Railway applications – Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS)*. Moscow, FGUP Standartinform Publ., 2002, 162 p.
10. IEC 62280 *Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety-related communication in transmission systems*. Moscow, FGUP Standartinform Publ., 2014, 136 p.
11. IEC 62425 *Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety related electronic systems for signalling*. Moscow, FGUP Standartinform Publ., 2007, 198 p.
12. Shmatchenko V. V., Roenkov D. N. & Yaronova N. V. Osnovnye funktsional'nye trebovaniya k sisteme radiosvyazi dlya magnitolevitatsionnogo transporta [Primary functional requirements for the radio communications system used in magnetic levitation vehicles]. *4th International Workshop “Magnetic levitation transport systems and technologies”*. Saint Petersburg, FGBOU VO PGUPS Publ., 2016, pp. 85–86. (In Russian)
13. EIRENE (European Integrated Railway Radio Enhanced Network). *Functional Requirements Specification/Version 7.3.0*. European railway agency, 2012, 111 p. URL: <http://www.era.europa.eu> (retrieved on: 20.08.2016).
14. EIRENE (European Integrated Railway Radio Enhanced Network). *System Requirements Specification/Version 16.0.0*. European railway agency, 2015, 197 p. URL: <http://www.era.europa.eu> (retrieved on: 20.08.2016).
15. GSM-R *Implementation and Procurement Guide/Version V 1.0*. 2009, 15 March. Paris, UIC, 2009, 251 p.

ШМАТЧЕНКО Владимир Владимирович – канд. техн. наук, доцент, railwayradio@gmail.com; РОЕНКОВ Дмитрий Николаевич – канд. техн. наук, доцент, roenkov_dmitry@mail.ru; ПЛЕХАНОВ Павел Андреевич – канд. техн. наук, доцент, pavelplekhanov@gmail.com; ИВАНОВ Виктор Геннадьевич – старший преподаватель, ivanov.v.g.spb@gmail.com; *ЯРОНОВА Наталья Валерьевна – аспирант, tatotchka83@list.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 004.896+656:25

М. А. Гордон, М. Н. Василенко, Д. В. Седых, Д. В. Зуев

МАСКИРОВКА ОШИБОК В ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ И МЕТОДЫ ИХ ОБНАРУЖЕНИЯ

Дата поступления: 16.08.2016

Решение о публикации: 16.12.2016

Цель: Исследование видов маскировки ошибок в технической документации и методов их устранения. **Методы:** Используются методы теории информации, а также теории графов для представления технической документации в электронном виде. **Результаты:** Дано определение ошибки в технической документации. Описаны основные проблемы и особенности при работе с электронной технической документацией. Рассмотрены особенности отдельных видов документов, ошибки в которых могут повлечь за собой опасные последствия, такие как аварии и крушения поездов. Исследованы причины возникновения ошибок, а также степень их обнаружимости в различных документах и на разных стадиях эксплуатации систем автоматики. Разработана классификация маскировки преднамеренных ошибок по следующим критериям: по выбору технологического момента времени, кратности ошибки, по времени ее существования, по обнаружимости. Отдельно изучены вопросы маскировки ошибок по кратности и особенности для различных схем автоматики. Приведены примеры маскировок различных видов ошибок в реальных схемах устройств автоматики с исследованием последствий. Предложены методы защиты от ошибок в электронной документации. **Практическая значимость:** Применение созданного классификатора ошибок позволяет перейти к практической разработке технических решений по автоматизированной проверке технической документации. В данной статье описаны ошибки в технической документации, хранимой в электронном виде; предложены методы защиты от ошибок в электронной технической документации, которые при применении их комплексно смогут выйти на новый уровень безопасности использования современных подходов к проектированию и ведению технической документации.

Электронный документооборот, АРМ-ВТД, кибербезопасность, техническая документация.

Mikhail A. Gordon, engineer, gordon_ma@mail.ru; **Mikhail N. Vasilenko**, D. Eng., professor, vasilenko.m.n@gmail.com; ***Dmitry V. Sedykh**, engineer, sedyhdmity@gmail.com; **Denis V. Zuev**, Cand. Eng., associate professor, zuev dv@gmail.com (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) **CONCEALED ERRORS IN ELECTRONIC TECHNICAL DOCUMENTATION AND METHODS FOR THEIR DETECTION**

Objective: Research the types of concealed errors in technical documentation and elucidate methods for their elimination. **Methods:** Information theory methods and graph theory methods for presenting technical documentation in electronic format are employed. **Results:** A definition is given for error in technical documentation. Main problems and specifics pertaining to work with electronic technical documentation are examined. Specifics of particular types of documents wherein errors may cause severe repercussions such as train breakdowns and derailment are examined. Causes of errors are investigated, along with the extent of their detectability in various documents and at various stages of automatic systems operation. A classification was developed for concealed deliberate errors, based on the following criteria: technological time point, error repetition factor, error existence time and error detectability. Additionally,

the research investigates error concealment based on the repetition factor and specifics for various automatics designs. Examples are given for concealment of various types of errors in real automatics structure diagrams, with investigation of their consequences. Methods of protection against errors in electronic documentation are suggested. **Practical importance:** The application of the suggested error classification allows to proceed toward practical design of technical solutions for automated checking of technical documentation. This article describes errors in technical documentation stored in electronic format. The article suggests methods for protections against errors in electronic technical documentation, which, when applied in an integrated fashion, will allow for a new level of safety in the application of modern approaches toward planning and maintaining technical documentation.

Electronic document flow, automated workplace for technical documentation maintenance, cybersecurity, technical documentation.

Введение

В настоящее время хозяйство автоматики и телемеханики ОАО «РЖД» переходит на безбумажные технологии. В ближайшее время вся техническая документация (ТД) будет только электронной, в частности и на микропроцессорные системы электрической централизации. В связи с тем, что ТД на объекты железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) переходит полностью в киберпространство, возникает вопрос о кибербезопасности электронной ТД [1, 2].

Главным вопросом кибербезопасности является защита объектов (в рассматриваемом случае это ТД) от кибератак, которые могут либо нарушать конфиденциальность ТД, либо изменять ТД, внося в нее ошибки.

Понятие ошибки и ее маскировки в технической документации

Перед тем, как дать определение ошибки, будем разделять ТД ЖАТ на проектную (до ввода в эксплуатацию) и исполненную (после ввода в эксплуатацию систем ЖАТ и соответствующую действующим устройствам). Внесение изменения в исполненную документацию возможно только в случаях, определенных инструкцией по ведению технической документации железнодорожной автоматики и телемеханики, утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 18 августа 2015 г. № 2080р.

Тогда под ошибкой проектной ТД будем понимать любое отклонение от нормативно-технической документации (НТД) (ГОСТов, ОСТов, инструкций, типовых материалов по проектированию, технических решений, указаний и т.д.), приводящее к невыполнению функциональных требований к системе. Ошибкой в исполненной ТД понимается любое внесение изменений в нее, не соответствующее причине изменений (указания, приказа, распоряжения и др.).

По причине возникновения ошибки можно разделить на:

1) случайные – ошибки в электронном документе, возникшие в случае какого-либо технического сбоя без влияния человека;

2) преднамеренные – изменение электронного документа посредством кибератаки, включая изменение ТД на каком-либо этапе ее жизненного цикла как по злему умыслу, так и по незнанию нормативной документации, приводящее к изменению логики системы или не стабильной ее работе.

Необходимо понимать, что не все ошибки могут быть обнаружены. То есть возможна такая ситуация, когда техническое решение с ошибкой может пройти все согласования и проверки. Таким образом, ошибка маскируется различными факторами, о которых будет рассказано ниже.

Маскировки преднамеренных ошибок в ТД можно классифицировать по следующим критериям:

– по выбору технологического момента времени (внесение ошибки после сохранения

и утверждения проекта, после внешнего контроля, по результатам необходимых изменений при производстве, в результате плановых изменений в ТД);

- по выбору типа ТД (внесение ошибки в текстовые документы, эксплуатационные чертежи, принципиальные схемы, монтажные схемы, программное обеспечение);

- по кратности ошибки (одиночные, кратные);

- по времени существования (статические, временные);

- по обнаружимости (в процессе стандартных проверок при пуско-наладочных работах (ПНР), не обнаружимые).

Ошибки по выбору технологического момента времени можно разделить на внесенные:

- в процессе проектирования;

- после сохранения и утверждения проекта институтом-проектировщиком в момент передачи ТД на внешний контроль, экспертизу, согласование, утверждение;

- после внешней экспертизы, согласования и утверждения в момент передачи на завод-изготовитель и в производство;

- в процессе ПНР;

- в результате процесса плановых изменений ТД в эксплуатирующей организации.

Ошибки по типам ТД

Ошибки по выбору типа ТД можно разделить на следующие:

1. *Ошибки, внесенные в текстовые документы.*

Например, если в таблице зависимости положения стрелок и сигнальных показаний светофоров в маршрутах (ТВЗ) появляются ошибки, то при реализации ее могут произойти аварии или крушения, так как в ТВЗ прописывается вся логика функционирования станции при микропроцессорных системах электрической централизации (МПЦ).

Ошибки в таблице зависимости особенно опасны на этапе проектирования. Таблица

есть исходные данные для составления программного обеспечения (ПО). Если произойдет кибератака на таблицу после ее согласования и утверждения и передачи задания на формирование ПО, то это не повлияет на функциональность системы, и данная ошибка будет обнаружена при проверке ПО и соответствия его таблице зависимости.

Ошибки в спецификациях могут повлечь дополнительные материальные затраты и отказы, если будет изменен тип заказываемого оборудования.

2. *Ошибки, внесенные в эксплуатационные чертежи.*

Так же как и ТВЗ, схематический план есть исходные данные для составления ПО МПЦ. Ошибки в схематическом плане особенно опасны на этапе проектирования. Если произойдет кибератака на схематический план после его согласования и утверждения и передачи задания на формирования ПО, то это не повлияет на функциональность системы.

Ошибки в двухниточном плане могут привести к авариям, задержкам поездов, снижению производительности труда. Например, если появится ошибка, изменяющая тип дроссель-трансформатора, это может вызвать его отказ (выход из строя).

Ошибка в чертежах кабельных сетей может привести к задержкам поездов, снижению производительности труда, дополнительным материальным затратам, в частности когда она изменяет тип кабеля, то к влияниям в цепях ЖАТ, таким как ложное занятие рельсовых цепей.

3. *Ошибки, внесенные в принципиальные схемы.*

В связи с тем, что вся логика систем ЖАТ приведена в принципиальных схемах, то и ошибки в них могут вызвать различные последствия, поэтому они являются наиболее опасными.

Ошибки в принципиальных схемах можно разделить на три вида:

- обнаруживаемые системой и приводящие ее в защитное состояние;

– не обнаруживаемые системой, но выявляемые в процессе ПНР;

– не обнаруживаемые системой и не выявляемые в процессе ПНР.

4. *Ошибки, внесенные в монтажные схемы.*

В связи с тем, что монтажные схемы являются реализуемым на оборудовании и конструктивах воплощением принципиальных схем, то ошибки в них идентичные, но отображаются они иначе, поэтому еще более трудно обнаруживаемые.

5. *Ошибки, внесенные в схемы аппаратов управления.*

Так же как и ошибки в принципиальные схемы, ошибки в схемах аппаратов управления могут приводить к опасным ситуациям. Одним из примеров может служить ошибка, вследствие которой происходит неверное подключение проводов от кнопок: оно может привести к неверным действиям дежурного.

6. *Ошибки, внесенные в программное обеспечение.*

Ошибки в ПО могут происходить только на этапе проектирования разработчиком МПЦ. После записи ПО на компакт-диск оно изменяться не сможет даже в случае кибератаки. Изменить его может лишь разработчик своими силами и установить новое ПО на действующей станции только после проверки всех функциональных зависимостей на имитаторе. В связи с тем, что на российском рынке имеются и иностранные фирмы-разработчики ПО для систем безопасности на железнодорожном транспорте, есть вероятность и преднамеренной ошибки в ПО самим разработчиком.

Маскировка кратностью ошибки

Ошибки по кратности можно разделить на одиночные и кратные.

Под одиночной ошибкой будем понимать одно изменение в одной единице ТД, приводящее к изменению логики системы (исключение какой-либо одной проверки в каком-либо

алгоритме системы, добавление одной лишней проверки в каком-либо алгоритме системы, исключение одного защитного устройства и т. д.).

Под кратной ошибкой будем понимать совокупность нескольких одиночных ошибок.

В современных отечественных системах ЖАТ практически все одиночные ошибки не приводят к опасным ситуациям, а переводят систему в защитное состояние. Например, если исключить контроль положения стрелки при установке маршрута только в наборной части, то маршрут задастся, но система перейдет в защитное состояние и светофор не откроется. Однако, если исключить данный контроль и в наборной части, и в исполнительной части системы, то может произойти опасная ситуация.

Маскировка по времени существования ошибки

Ошибки по состоянию можно разделить на статические и временные.

Под временными будем понимать такие ошибки, которые проявляются либо в ТД только в какой-нибудь промежуток времени, например во время монтажа на производстве или на объекте строительства, а потом автоматически исчезают, либо, наоборот, после ПНР и ввода в эксплуатацию объекта в какой-нибудь заранее определенный момент времени.

Под статическими будем понимать те ошибки, которые по истечению времени автоматически не исчезают.

Временным ошибкам более всего подвержена ТД на ПО микропроцессорных систем.

Маскировка обнаружения при ПНР

Ошибки по обнаружимости можно разделить на обнаружимые в процессе стандартных проверок во время ПНР и необнаружимые.

Под обнаружимой будем понимать такую ошибку в ТД, которая проявляется при процессе стандартных проверок во время ПНР, регламентируемых инструкцией ЦШ/571.

Под необнаружимой будем понимать ошибку, которая не проявляется в процессе ПНР.

Примеры ошибок в ТД

В качестве ошибок в ТД приведем такие примеры:

1. Одинокaя ошибка, обнаруживаемая системой и приводящая ее в защитное состояние. На рис. 1 показана схема управления стрелкой для системы EBIock 950. В качестве изменения схемы выступает перепутывание фаз питания стрелочного электропривода. При этом по команде перевода стрелки в «плюс» стрелка переведется в «минус». Но система, получив минусовой контроль стрелки, перейдет в защитное состояние.

2. Одинокaя ошибка, не обнаруживаемая системой и приводящая ее в опасное состояние, но выявляемая в процессе ПНР. На рис. 2 показана схема релейного шкафа входного светофора для системы EBIock 950. В качестве изменения схемы выступает перепутывание проводов «1Ж» и «3», идущих с поста ЭЦ в релейный шкаф. При этом по команде зажигания желтого огня на светофоре загорится зеленый огонь. В системе будет ложно осуществляться контроль горения желтого огня. Но при ПНР это обнаруживается визуально. На рис. 3 показано то же изменение в схеме, но представленное в монтажной документации.

3. Кратная ошибка, не обнаруживаемая системой, приводящая ее в опасное состояние и не выявляемая в процессе ПНР. На рис. 4 показана схема релейного шкафа входного светофора для системы EBIock 950. В качестве изменения схемы служит включение переключающего контакта реле «ДСН» в цепь включения желтого огня, тыловой контакт присоединен с проводом «3». При этом при включенном режиме двойного снижения напряжения по команде зажигания желтого огня на светофоре

загорится зеленый огонь. В системе будет ложно осуществляться контроль горения желтого огня. При ПНР нет проверок огней светофоров в режиме двойного снижения напряжения (ДСН), и значит, это изменение схемы никак не обнаружится. На рис. 5 показано то же изменение в схеме, но представленное в монтажной документации.

Методы защиты от ошибок в электронной ТД

Для защиты от ошибок (в том числе и кибератак) должен быть использован комплекс мер защиты, включающий в себя:

1. Использование отечественного ПО для ведения ТД [3–5] на всех этапах ее жизни (проектирование, производство на заводе-изготовителе, ведение в эксплуатирующей организации), обеспечивающее исключение недеklарированных возможностей и несанкционированного доступа к ТД.

2. Применение технологии электронной цифровой подписи для защиты ТД и проверки наличия несанкционированного изменения в ТД на всех стадиях жизни (от проектирования до эксплуатации) [6].

3. Создание эталонного образца ТД, периодическая сверка используемой ТД с эталонной копией (контрольным экземпляром) [7–9].

4. Внедрение экспертной системы проверки ТД АС-ЭСР [10–16], которая проводит полную функциональную проверку эксплуатационной ТД, включая текст ПО для релейно-процессорных и микропроцессорных систем, выполняет соответствие одного типа ТД с другим типом (соответствие двухниточного плана станции со схематическим планом, таблиц зависимости положения стрелок и сигнальных показаний светофоров в маршрутах со схематическим планом, монтажных схем с принципиальными схемами и т. д.).

Для осуществления защиты от ошибок электронной ТД необходимо создать отечественный программный комплекс экспертной проверки ТД, поддерживающий технологию

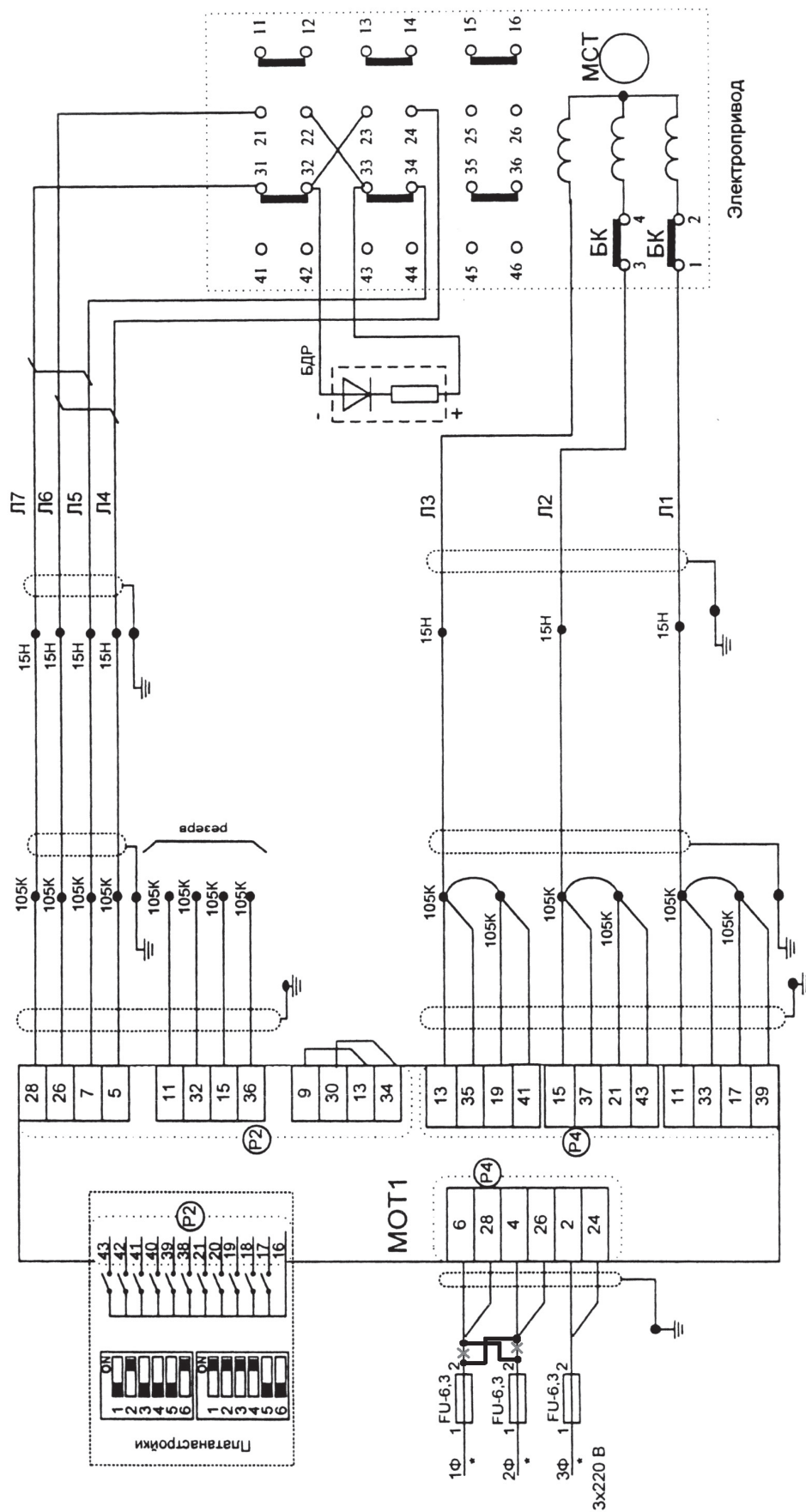


Рис. 1. Ошибка, обнаруживаемая системой и приводящая ее в защитное состояние

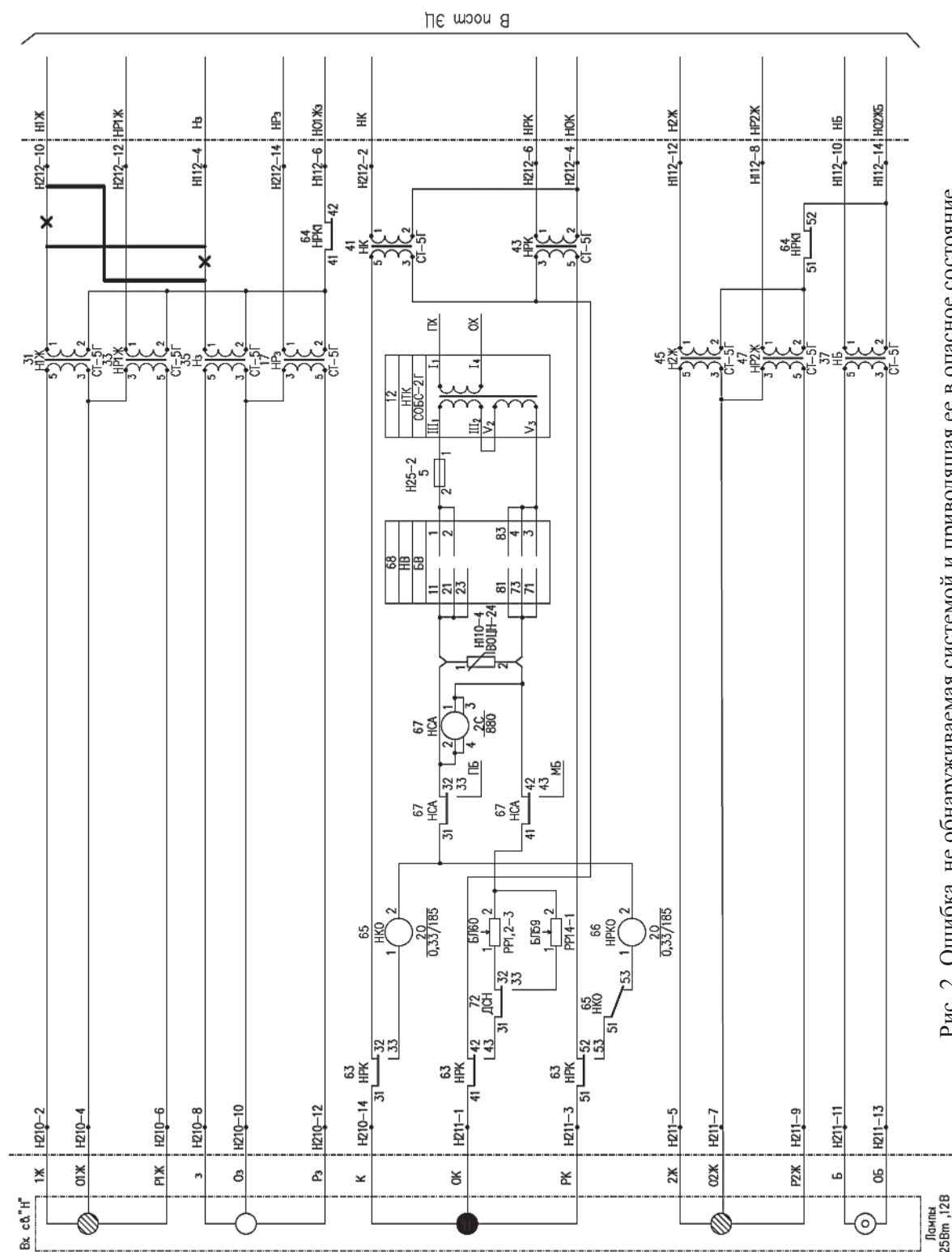


Рис. 2. Ошибка, не обнаруживаемая системой и приводящая ее в опасное состояние, но выявляемая в процессе ПНР (принципиальная схема)

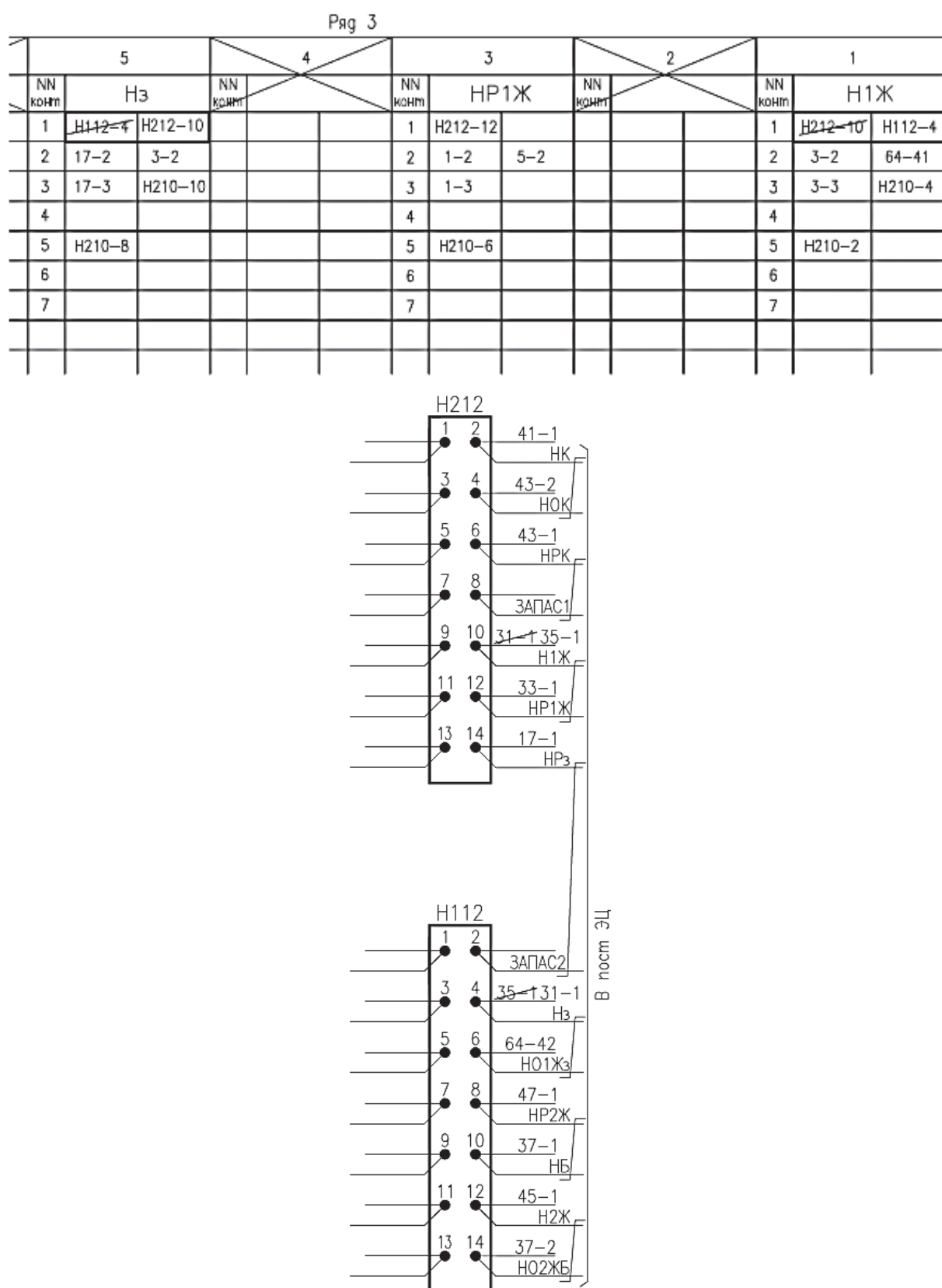


Рис. 3. Ошибка, не обнаруживаемая системой и приводящая ее в опасное состояние, но выявляемая в процессе ПНР (монтажная схема)

Ряд 3														
5			4			3			2			1		
NN конт	Нз		NN конт			NN конт	НР1Ж		NN конт			NN конт	Н1Ж	
1	H112-4	72-11				1	H212-12					1	H212-10	72-12
2	17-2	3-2				2	1-2	5-2				2	3-2	64-41
3	17-3	H210-10				3	1-3					3	3-3	H210-4
4						4						4		
5	H210-8					5	H210-6					5	H210-2	
6						6						6		
7						7						7		

Ряд 7		
2		
NN конт	ДСН	
1	H18-4-2	
2	H18-3-2	
3	4	
4	3	
12	31-1	
11	H212-10	
13	35-1	
22		
21		
23		
32	БЛ60-1	
31	63-43	
33	БЛ59-1	
42		

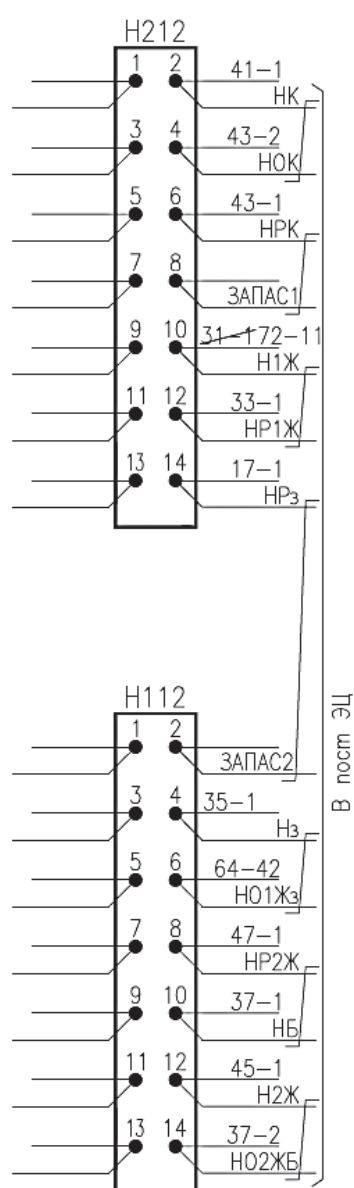


Рис. 5. Ошибка, не обнаруживаемая системой и приводящая ее в опасное состояние, но не выявляемая в процессе ПНР (монтажная схема)

электронной цифровой подписи, а также в хозяйстве железнодорожной автоматики и телемеханики следует регламентировать и ужесточить режим хранения, работу и сверку ТД, хранимой в электронном виде.

Заключение

Разработанная классификация типов маскировки ошибок в электронной ТД показала, что она, хранимая в хозяйстве автоматики и телемеханики по существующей технологии, подвержена кибератакам, которые могут привести к авариям, задержкам поездов, снижению производительности труда и т.д. Для исключения опасного влияния кибератак необходимо пересмотреть технологию проектирования и ведения ТД, введя защиту от преднамеренного доступа к ней и проверки соответствия ТД как эталонным образцам, так и одного типа с другим типом. Такие проверки следует проводить на разных этапах жизненного цикла ТД. А проверки на соответствие с эталонным образцом нужно выполнять периодически.

Библиографический список

1. Василенко М. Н. Кибербезопасность технической документации ЖАТ / М. Н. Василенко, Д. В. Зуев // Автоматика, связь, информатика. – 2015. – № 7. – С. 21–23.
2. Василенко М. Н. Кибербезопасность технической документации железнодорожной автоматики и телемеханики / М. Н. Василенко, Д. В. Зуев // Транспорт Российской Федерации. – 2015. – № 2(57). – С. 55–58.
3. Василенко М. Н. Принципы организации электронного документооборота технической документации / М. Н. Василенко, Б. П. Денисов, П. Е. Булавский, Д. В. Седых // Транспорт Российской Федерации. – 2006. – № 7. – С. 31–35.
4. Василенко М. Н. Развитие электронного документооборота в хозяйстве АТ / М. Н. Василенко, В. Г. Трохов, Д. В. Зуев, Д. В. Седых // Автоматика, связь, информатика. – 2015. – № 1. – С. 14–16.
5. Седых Д. В. Применение отраслевого формата технической документации на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики для интеграции приложений / Д. В. Седых, С. А. Суханов // Изв. ПГУПС. – 2005. – Вып. 3. – С. 74–79.
6. Василенко М. Н. Согласование и утверждение технической документации с использованием электронной цифровой подписи / М. Н. Василенко, П. Е. Булавский, Б. П. Денисов, Д. А. Имануилов // Наука и техника транспорта. – 2010. – № 1. – С. 18–23.
7. Василенко М. Н. Сверка технической документации ЖАТ / М. Н. Василенко, А. М. Горбачев, Р. Т. Мустафаев // Автоматика, связь, информатика. – 2013. – № 4. – С. 11–13.
8. Балугев Н. Н. Проблемы внедрения отраслевого формата / Н. Н. Балугев, М. Н. Василенко, В. Г. Трохов, Д. В. Седых // Автоматика, связь, информатика. – 2010. – № 3. – С. 2.
9. Матушев А. А. Распознавание структуры монтажных схем ЖАТ / А. А. Матушев, Д. В. Седых // Автоматика, связь, информатика. – 2015. – № 10. – С. 4–7.
10. Горбачев А. М. Автоматизация анализа, экспертизы и сверки технической документации системы железнодорожной автоматики и телемеханики / А. М. Горбачев // Изв. ПГУПС. – 2012. – Вып. 4. – С. 73–78.
11. Безродный Б. Ф. Автоматизация проверки проектов на основе АРМ-ТЕСТ / Б. Ф. Безродный, М. Н. Василенко, Б. П. Денисов, Д. В. Седых // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – № 9. – С. 22–24.
12. Седых Д. В. Учет работы приборов с помощью АРМ-УРП / Д. В. Седых // Автоматика, связь, информатика. – 2007. – № 3. – С. 7–8.
13. Василенко М. Н. Автоматизированная система экспертизы схемных решений железнодорожной автоматики и телемеханики / М. Н. Василенко, А. М. Горбачев, Д. В. Зуев, Е. В. Григорьев // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 5(36). – С. 64–67.
14. Тележенко Т. А. Автоматизированная система экспертизы схемных решений / Т. А. Тележенко // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 5. – С. 24–26.

15. Гладкий А. В. Формальные грамматики и языки / А. В. Гладкий. – М. : Наука, 1973. – 368 с.

16. Люгер Дж. Ф. Искусственный интеллект : стратегии и методы решения сложных проблем / Дж. Ф. Люгер ; пер. с англ. К. Протасова. – М. : Вильямс, 2005. – 864 с.

References

1. Vasilenko M. N., Zuev D. V. Kiberbezopasnost' tekhnicheskoy dokumentatsii ZhAT [Cybersecurity of technical documentation for railway automatics and telemechanics]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automatics, communication, informatics], 2015, no. 7, pp. 21–23. (In Russian)

2. Vasilenko M. N., Zuev D. V. Kiberbezopasnost' tekhnicheskoy dokumentatsii zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Cybersecurity of technical documentation for railway automatics and telemechanics]. *Transport Rossijskoj Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2015, no. 2 (57), pp. 55–58. (In Russian)

3. Vasilenko M. N., Denisov B. P., Bulavskij P. E., Sedykh D. V. Printsipy organizatsii jelektronnogo dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentatsii [Technical documentation: electronic workflow management]. *Transport Rossijskoj Federatsii* [Russian Federation Transport], 2006, no. 7, pp. 31–35. (In Russian)

4. Vasilenko M. N., Trokhov V. G., Zuev D. V., Sedykh D. V. Razvitie jelektronnogo dokumentooborota v khozyajstve AT [Developing electronic document workflow in AT units]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automatics, communication, informatics], 2015, no. 1, pp. 14–16. (In Russian)

5. Sedykh D. V., Sukhanov S. A. Primenenie otraslevogo formata tekhnicheskoy dokumentatsii na ustrojstva zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki dlya integratsii prilozhenij [Applying industry-specific formats of technical documentation for railway automatics and telemechanics equipment for integration of applications]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [The St. Petersburg Transport University Bulletin]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2005, no. 3, pp. 74–79. (In Russian)

6. Vasilenko M. N., Bulavskij P. E., Denisov B. P., Imanuilov D. A. Soglasovanie i utverzhdenie tekhnicheskoy dokumentatsii s ispol'zovaniem jelektronnoj tsifrovoj podpisi [Coordinating and approving technical documentation using an electronic digital signature]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and engineering of transport], 2010, no. 1, pp. 18–23. (In Russian)

7. Vasilenko M. N., Gorbachev A. M., Mustafaev R. T. Sverka tekhnicheskoy dokumentatsii ZhAT. [Verification of technical documentation for railway automatics and telemechanics]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automatics, communication, informatics], 2013, no. 4, pp. 11–13. (In Russian)

8. Baluev N. N., Vasilenko M. N., Trokhov V. G., Sedykh D. V. Problemy vnedreniya otraslevogo formata [Industry format implementation issues]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automatics, communication, informatics], 2010, no. 3, pp. 2. (In Russian)

9. Matushev A. A., Sedykh D. V. Raspoznavanie struktury montazhnykh skhem ZhAT [Identification of wiring diagrams for railway automatics and telemechanics]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automatics, communication, informatics], 2015, no. 10, pp. 4–7. (In Russian)

10. Gorbachev A. M. Avtomatizatsiya analiza, jekspertizy i sverki tekhnicheskoy dokumentatsii sistemy zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Automation of analysis, expert assessment and verification of technical documentation for railway automatics and telemechanics systems]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [The St. Petersburg Transport University Bulletin]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2012. 4, pp. 73–78. (In Russian)

11. Bezrodnyj B. F., Vasilenko M. N., Denisov B. P., Sedykh D. V. Avtomatizatsiya proverki proektov na osnove ARM-TES [Automation of project checking based on automated workplace testing]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automatics, communication, informatics], 2008, no. 9, pp. 22–24. (In Russian)

12. Sedykh D. V. Uchet raboty priborov s pomoshch'yu ARM-URP [Logging of device operation based on the automated workplace for equipment operation control]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automatics, communication, informatics], 2007, no. 3, pp. 7–8. (In Russian)

13. Vasilenko M. N., Gorbachev A. M., Zuev D. V., Grigoriev E. V. Avtomatizirovannaya sistema jekspertizy skhemnykh reshenij zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Automated system for expert analysis

of circuit design in railway automatics and telemechanics]. *Transport Rossijskoj Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2011, no. 5 (36), pp. 64–67. (In Russian)

14. Telezhenko T. A. Avtomatizirovannaya sistema jekspertizy skhemnykh reshenij [Automated expert analysis system for circuit design]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automatics, communication, informatics], 2009, no. 5, pp. 24–26. (In Russian)

15. Gladkij A. V. *Formal'nye grammatiki i yazyki* [Formal grammar and languages]. Moscow, Nauka Publ., 1973, 368 p. (In Russian)

16. Luger George. F. *Iskusstvennyj intellekt: strategii i metody resheniya slozhnykh problem* [Artificial Intelligence. Structures and Strategies for Complex Problem Solving]. 4th edition/translated from English. Moscow, Williams Publ., 2005, 864 p. (In Russian)

ГОРДОН Михаил Аркадьевич – инженер, gordon_ma@mail.ru; ВАСИЛЕНКО Михаил Николаевич – доктор техн. наук, профессор, vasilenko.m.n@gmail.com; *СЕДЫХ Дмитрий Владимирович – инженер, sedyhdmityriy@gmail.com; ЗУЕВ Денис Владимирович – канд. техн. наук, доцент, zuevdv@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 69.059.22

Ш. Ш. Исхаков, Ф. Е. Ковалев, Р. Э. Косенков, А. П. Мохнаткин**ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНИВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ СООРУЖЕНИЙ НАЗЕМНОЙ
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ И ИДЕНТИФИКАЦИИ
ИХ ТЕХНИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ**

Дата поступления: 08.07.2016

Решение о публикации: 16.12.2016

Цель: Анализ современного методологического уровня возможностей оценивания и обеспечения надежности и безопасности зданий и сооружений в нормативной базе по проектированию и диагностике их технического состояния. **Методы:** Использование метода вибрационной диагностики позволяет аппаратным способом оценивать техническое состояние конструкций и основания стартовых сооружений по критерию снижения их несущей способности. **Результаты:** Возможность применения графоаналитического метода оценивания количественной меры надежности сооружения как вероятности того, что объект может находиться в заданном техническом состоянии, а его безопасность оценивается коэффициентом запаса несущей способности при соответствующей вероятности аварийного состояния (обрушения) сооружения. **Практическая значимость:** Особенностью специальных сооружений космической отрасли является отсутствие научно обоснованных критериев для назначения и обеспечения гарантийных сроков их эксплуатации. Обусловлено это тем, что длительность жизненного цикла рассматриваемых сооружений определяется прежде всего востребованностью образцов космической техники и ракет космического назначения. Так, ракеты-носители типа «Протон» используются начиная с 1965 г., уже более 50 лет, что обуславливает необходимость поддержания работоспособного состояния стартовых сооружений в течение всего срока их востребованности, спрогнозировать который конструкторам ракетной техники весьма затруднительно. В этой связи можно лишь ориентировочно предполагать, что востребованность нового перспективного типа ракеты-носителя «Ангара» может составить 70 лет и более. В указанных условиях неопределенности актуальными являются оценивание и обеспечение необходимых сроков эксплуатации специальных сооружений космической отрасли на стадиях их проектирования и длительной эксплуатации.

Вибрационная диагностика, мониторинг, сооружения, техническое состояние, эксплуатация.

Shavkat S. Iskhakov, Cand. Eng., associate professor, iskhakova_julia@mail.ru; ***Fyodor E. Kovalev**, Cand. Eng., assistant professor, kovaleff81@mail.ru; **Ruslan E. Kosenkov**, adjunct, kosenkovruslan@mail.ru; **Aleksei P. Mokhnatkin**, head of laboratory, moxnatkin@mail.ru (Alexander Mozhaysky Military Space Academy) **ISSUES OF ASSESSING RELIABILITY AND SAFETY OF ACTIVE GROUND-BASED SPACE INFRASTRUCTURE FACILITIES**

Objective: Analyze the current methodological level of ability to evaluate and ensure reliability and safety of buildings and structures in the regulatory system for the design and diagnostics thereof. **Methods:** Application of the vibration diagnostics method allows for hardware testing of the technical condition of structures and foundation of the launch installations based on the criterion of reduced bearing capacity. **Results:** An ability to apply the graphical analytic method for evaluating the quantitative measure of reliability of a structure as the likelihood of the facility's being in a desired technical condition, while its safety is assessed based on the assurance factor of bearing capacity at the corresponding likelihood of the

structure's critical condition (collapse). **Practical importance:** The specific feature of the space industry's special-purpose facilities is the lack of scientifically grounded criteria for assigning and maintaining their guaranteed service life terms. It is caused by the fact that the duration of the service life of the structures in question is determined primarily by the demand for the specimens of space technology and space-mission vehicles. Thus, Proton-type space launch vehicles have been used since 1965, or over 50 years, causing the need for maintaining the operational condition of launch installations throughout the entire term of demand, which is rather difficult for the space vehicle designers to predict. In this regard, one can only approximately assume that the demand for the new state-of-the-art space launch vehicle Angara may constitute 70 years and more. Under said conditions of uncertainty, it is relevant to evaluate and ensure the necessary service life for special-purpose facilities of the space industry both at design stages and throughout long-term operation.

Vibration diagnostics, monitoring, structures, technical conditions, operation.

Введение

Стартовые сооружения (СС) и другие строительные объекты ракетно-космических комплексов (РКК), предназначенные для пуска ракет космического назначения (РКН), могут рассматриваться как специальные сооружения, обеспечивающие транспортировку космонавтов, грузов и запуск космических аппаратов (КА).

Для всех сооружений транспортных объектов свойственны специфические особенности в зависимости от условий эксплуатации и факторов, вызванных природными, технологическими и техногенными воздействиями. СС и другие строительные объекты наземной космической инфраструктуры (НКИ) имеют как общие со всеми транспортными объектами, так и специфические особенности, связанные с такими факторами как:

- механическое и высокотемпературное воздействие газовой струи первой ступени РКН на СС;
- агрессивное воздействие компонентов ракетного топлива (КРТ);
- риск воздействия аварийного взрыва КРТ при хранении, подготовке и пуске РКН;
- отсутствие научно обоснованных критериев для назначения и обеспечения гарантийных сроков эксплуатации строительных объектов РКК и в целом НКИ.

Вышеуказанные факторы обуславливают проблемы в обеспечении надежности и

безопасности эксплуатации строительных объектов, предназначенных для хранения и заправки КРТ, подготовки и пуска РКН.

Для указанных специальных сооружений НКИ в данной статье рассматриваются проблемы по обеспечению их надежности и безопасности на современном уровне развития строительной практики и ее нормативной базы.

Анализ нормативной базы по обеспечению и безопасности строительных объектов на стадиях проектирования и эксплуатации

При проектировании надежность и безопасность зданий и сооружений обеспечивается, как известно, использованием коэффициентов запаса γ_i по материалу, нагрузкам, условиям работы и ответственности [1] (рис. 1), а также расчетами по 1-му и 2-му предельным состояниям. При этом количественную меру надежности регламентируется оценивать как вероятность $P = \{0, \dots, 1\}$ того, что в заданный момент времени объект может обладать заданным техническим состоянием [1].

Федеральным законом № 384-ФЗ от 30 декабря 2009 г. [2] надежность эксплуатируемых зданий и сооружений должна обеспечиваться их механической безопасностью, основным показателем которой является несущая способность (НС) конструкций и оснований (рис. 1).



Рис. 1. Структурно-логический алгоритм обеспечения надежности и безопасности эксплуатации зданий и сооружений

На стадии эксплуатации зданий и сооружений оценивание их фактического состояния должно выполняться по методологическим основам технической диагностики [3]. При этом в классификации технических состояний в СП 13-102-2003 [4] и ГОСТ 31937-2011 [5] (рис. 1) основным показателем также служит несущая способность конструкций и оснований. Однако при этом в определениях категорий технических состояний отсутствуют количественные показатели снижения НДС конструкций и оснований при переходе этих технических состояний в более низкие категории (рис. 1). Таким образом, отсутствует методологическая связь между обеспечением надежности и безопасностью зданий и сооружений на стадии их проектирования [1] и возможностями оценивания этих же показателей путем диагностирования снижения НДС конструкций и оснований на стадии эксплуатации строительных объектов по СП 13-102-2003 [4] и ГОСТ 31937-2011 [5].

Наличие указанной проблемы проявляется при организации длительной эксплуатации зданий и сооружений в течение требуемого периода T_3 (рис. 2) [6] с оцениванием снижения НДС элементов строительных объектов по информации, которая должна получаться диагностированием технических состояний путем их обследований или мониторинга [4, 5].

На начальный момент эксплуатации объекта НДС его элементов может оцениваться коэффициентом запаса γ , который с вероятностной точки зрения может быть получен перемножением независимых коэффициентов запаса γ_i (см. рис. 1), регламентируемых в ГОСТ Р 54257-2010 [1].

При максимальном значении коэффициентов γ_i , равном, например, 1,2, как это регламентируется в СНиПах по проектированию строительных конструкций и грунтовых оснований, общий коэффициент запаса γ получается равным 2,07, или 207 %, как представлено на рис. 2:

$$\gamma = \gamma_m \cdot \gamma_f \cdot \gamma_c \cdot \gamma_n = 2,07.$$

При эксплуатации снижение НС строительных объектов должно оцениваться с некоторой периодичностью Δt (рис. 2), регламентируемой нормативными документами [4, 5], на основе поверочных расчетов, выполняемых по фактическим значениям физико-механических характеристик материала конструкций и оснований, устанавливаемым аппаратным способом при обследовании или мониторинге технического состояния зданий и сооружений. Однако в условиях экспресс-диагностирования, т. е. по определению ГОСТ 20911-89 [3], в условиях, когда заключение о техническом состоянии зданий и сооружений приходится давать «по ограниченному числу параметров за заранее установленное время», существенно снижается достоверность и объективность результатов обследования и во многом зависит от квалификации экспертов. Но самым проблемным оказывается вопрос о том, как результаты поверочных расчетов соотносить с категориями технического состояния эксплуатируемых зданий и сооружений (см. рис. 1), в которых не определены количественные показатели НС. В этой связи одним из актуальных вопросов в методоло-

гии оценивания надежности и безопасности эксплуатируемых зданий и сооружений является разработка **аппаратурных методов** идентификации снижения НС конструкций и оснований, не требующих использования поверочных расчетов.

Анализ современных аппаратурных возможностей регистрации снижения несущей способности строительных объектов

В общем случае обеспеченность НС может оцениваться по следующим критериям:

- 1) по фактическим нагрузкам P_ϕ , которые не должны превышать критических нагрузок $P_{кр}$;
- 2) по фактическим напряжениям σ_ϕ , которые не должны превышать предела прочности материала конструкций и грунтов R ;
- 3) по жесткости (упругости) C элементов зданий и сооружений.

При статических загрузках в случае регистрации напряжений σ_ϕ с помощью тензометров, используемых в стационарных системах мониторинга, возможна идентификация снижения НС в конструкциях и грунтовых основаниях.

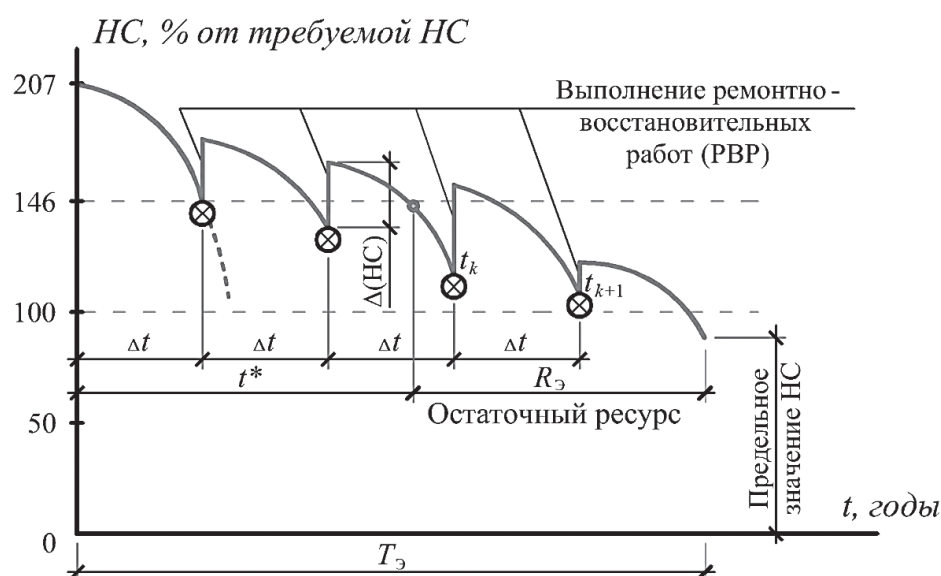


Рис. 2. Графическая модель эксплуатации объекта:

⊗ — диагностирование технического состояния и обоснование объема РВР

При динамических нагружениях более продуктивным оказывается подход по применению такого параметра как жесткость C деформируемых элементов при условии, если имеется возможность эту жесткость интерпретировать как интегральный показатель несущей способности строительных элементов [7–9]. Однако проблема заключается в нахождении информативных диагностических признаков (ДП) снижения показателя жесткости C несущих элементов зданий и сооружений. Поскольку выявить такие ДП при статических нагружениях затруднительно, то еще в 70-х годах XX в. специалистами ВКА имени А. Ф. Можайского стали исследоваться возможности диагностирования снижения жесткости несущих элементов при динамических нагружениях на уникальных стартовых сооружениях на космодроме «Байконур» под тяжелые и сверхтяжелые РКН [10]. При этом в качестве несущих элементов строительной части СС рассматривались грунтовое основание и пролетные железобетонные конструкции, испытывающие при пусках РКН вибрации в пролетных сечениях относительно опорных узлов.

При изучении динамики грунтовых оснований СС использовалась модель «жесткое сооружение – грунт», широко известная по трудам О. А. Савинова [11] и положенная в основу СНиП 2.02.05-87 [12] для проектирования фундаментов под машины с динамическими нагрузками. Применение этой же модели для целей **диагностирования** состояния грунтовых оснований СС позволило выявить информативные ДП снижения жесткости C (несущей способности) в виде коэффициента упругости грунта K_z , которые вытекают из передаточной функции системы $\eta(\omega)$ [13], откуда следует, что уменьшение коэффициента упругости (жесткости) грунтового основания K_z вызывает (при постоянстве массы объекта M) уменьшение собственной (резонансной) частоты колебаний системы λ_z на некоторую величину $\Delta\lambda$ и увеличение экстремума передаточной функции $\eta(\omega)$ в какое-то ν раз [14].

Аналогичные ДП могут использоваться для индикации снижения жесткости C про-

летных конструкций при анализе изменения их передаточных функций $\eta_j(\omega)$ по первой (основной) форме их колебаний, которые могут описываться дифференциальным уравнением движения как для системы с одной степенью свободы, обладающей собственной частотой колебаний λ_1 по аналогии с λ_z [6–9, 10, 14].

Таким образом, современные аппаратные средства позволяют оценивать снижение НС конструкций и грунтовых оснований с помощью регистрации напряжений σ_Φ при статических нагружениях и путем идентификации изменения значения жесткости C несущих элементов вибрационными (тестовыми [15] и функциональными [6–9, 14]) методами для зданий и сооружений, подверженных воздействию природных и эксплуатационных динамических нагрузок. Данное обстоятельство позволяет вернуться к проблеме оценивания и обеспечения надежности и безопасности зданий и сооружений на стадиях их проектирования и эксплуатации (см. рис. 1).

Вариант решения проблемы

Для ликвидации методологического вакуума, вызванного отсутствием количественных показателей снижения НС конструкций и грунтовых оснований в категориях технического состояния зданий и сооружений [4, 5] (см. рис. 1), в работе [10] показана целесообразность применения параметра η (рис. 3), обратного по отношению к коэффициенту запаса γ (см. формулу на с. 595). В этом случае на качественном уровне становится понятной логическая зависимость между параметром η и вероятностью $P = \{0, \dots, 1\}$ нахождения объекта в аварийном состоянии: чем больше показатель η (чем меньше коэффициент запаса γ), тем выше вероятность P того, что состояние объекта близко к аварийному (рис. 3).

Тогда становится возможным увязать зависимость $P = f(\eta)$ с категориями технического состояния (см. рис. 1), регламентируемыми в СП 13-102-2003 [4] и ГОСТ 31937-2011 [5].

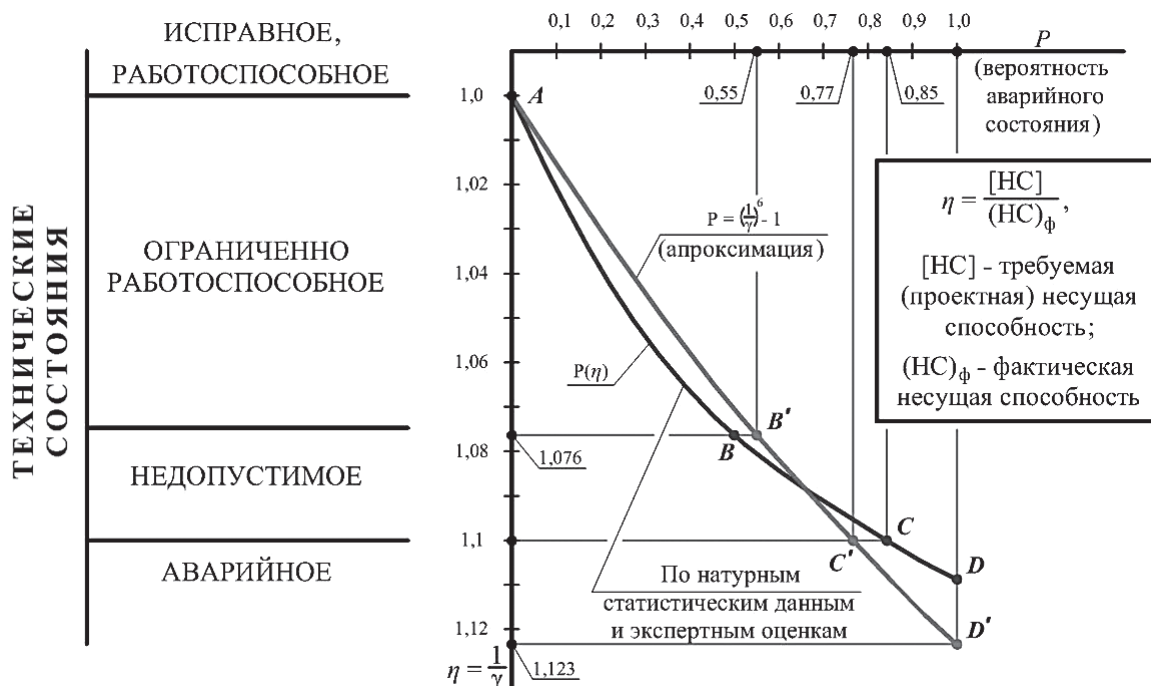


Рис. 3. Вероятностная структура технических состояний

При $\eta \leq 1$ следует полагать, что вероятность нахождения объекта в аварийном состоянии равна нулю ($P = 0$), и это, очевидно, должно соответствовать «исправному» и «работоспособному» состояниям (рис. 3). При снижении НС до некоторого предельного значения (см. рис. 2) вероятность нахождения объекта в аварийном состоянии следует принимать равной единице ($P = 1$), как показано на рис. 3. В промежутке между рассмотренными значениями P должны находиться остальные состояния объекта («ограниченно работоспособное» и «недопустимое»). Использование экспертных оценок специалистов в области проектирования и эксплуатации СС РКК позволило построить график функции P от η , который на рис. 3 прошел через точки $ABCD$. Аппроксимация этого графика дала аналитическую функцию вида $P = \eta^6 - 1$, которая на рис. 3 проходит через точки $AB'C'D'$.

Заключение

Очевидно, что для других типов строительных объектов зависимость P от η может

иметь вид, существенно отличный от приведенного на рис. 3. Необходимо отметить, что в рассматриваемой проблеме (см. рис. 1) универсальным является сам подход к тому, как можно связать такие параметры надежности и безопасности зданий и сооружений как η , γ , P и категории технических состояний эксплуатируемых строительных объектов.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 54257-2010. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования. – М. : ФА по техническому регулированию и метрологии, 2010. – 40 с.
2. Федеральный закон Российской Федерации от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений. – М. : Кремль, 2009. – 22 с.
3. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – М. : Госстандарт СССР, 1989. – 16 с.
4. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. – М. : ГОССТРОЙ РФ, 2004. – 32 с.

5. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М. : ФА по техническому регулированию и метрологии, 2012. – 89 с.

6. Исхаков Ш. Ш. Проблемы и достижения в области строительного инжиниринга / Ш. Ш. Исхаков, Ф. Е. Ковалев, В. Г. Котович // Сб. материалов науч.-метод. конференции, посвященной 150-летию кафедры «Здания». Санкт-Петербург, 25–26 мая 2015 г. – СПб. : ФГОУ ВПО ПГУПС, 2015. – С. 9–14.

7. Исхаков Ш. Ш. Опыт применения систем испытания и долговременного контроля на стартовых сооружениях наземных космических комплексов / Ш. Ш. Исхаков, В. М. Васкевич, Ф. Е. Ковалев // Безопасность России. Безопасность строительного комплекса / под ред. Н. А. Махутова. – М. : МГОФ «Знание», 2012. – Гл. IV, разд. 7. – С. 711–719.

8. Исхаков Ш. Ш. Проектирование и применение систем мониторинга инженерных (строительных) конструкций зданий и сооружений : учеб. пособие / Ш. Ш. Исхаков, В. М. Васкевич, Ф. Е. Ковалев. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2013. – 158 с.

9. Исхаков Ш. Ш. Становление и развитие вибрационных систем мониторинга технического состояния несущих элементов стартовых сооружений : монография / Ш. Ш. Исхаков, Ф. Е. Ковалев, А. П. Мохнаткин, Д. С. Старчуков. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2015. – 110 с.

10. Исхаков Ш. Ш. Оценка надежности эксплуатации зданий и сооружений по методикам возникновения риска их неработоспособных состояний / Ш. Ш. Исхаков, В. М. Васкевич, Ф. Е. Ковалев, В. Ю. Рыжиков // Инженер.-строит. журн. – № 7. – СПб. : ГОУ ВПО СПбГПУ, 2012. – С. 52–61.

11. Савинов О. А. Фундаменты под машины / О. А. Савинов. – Л. ; М. : Стройиздат, 1955. – 292 с.

12. СНиП 2.02.05-87. Фундаменты машин с динамическими нагрузками. – М. : ГОССТРОЙ СССР, 1988. – 52 с.

13. Болотин В. В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений / В. В. Болотин. – М. : Стройиздат, 1971. – 255 с.

14. А. с. RU(21)2008 147445/28(13)А. Метод функциональной вибрационной диагностики изменения несущей способности грунтового осно-

вания и строительных конструкций зданий и сооружений / Н. Н. Гусев, Ш. Ш. Исхаков. – Заявл. 01.12.2008, № 2008147445 // Бюл. № 16 ФГУ по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2010. – 3 с.

15. Савин С. Н. Динамический мониторинг строительных конструкций на примере пандуса киноконцертного зала «Пушкинский» в г. Москва / С. Н. Савин // Инженер.-строит. журн. – № 7. – СПб. : ГОУ ВПО СПбГПУ, 2012. – С. 58–62.

References

1. GOST R 54257-2010. *Nadezhnost' stroitel'nykh konstruksij i osnovanij. Osnovnye polozheniya i trebovaniya* [Reliability of the constructions and foundations. Basic principles and requirements]. Moscow, Federal Agency for Technical Regulation and Metrology, 2010, 40 p. (In Russian)

2. Federal law of the Russian Federation dated December 30, 2009, no. 384-FZ. *Tekhnicheskij reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij* [Technical regulations for safety of buildings and structures]. Moscow, Kremlin, 2009, 22 p. (In Russian)

3. GOST 20911-89. *Tekhnicheskaya diagnostika. Terminy i opredeleniya* [Technical diagnostics. Terms and definitions]. Moscow, Gosstandart USSR, 1989, 16 p. (In Russian)

4. SP 13-102-2003. *Pravila obsledovaniya nesushchikh stroitel'nykh konstruksij zdaniy i sooruzhenij* [Rules for inspection of bearing structures in buildings and facilities]. Moscow, State Committee for Construction of the Russian Federation, 2004, 32 p. (In Russian)

5. GOST 31937-2011. *Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya* [Buildings and Constructions. Technical Condition Examination and Monitoring Rules]. Moscow, Federal Agency for Technical Regulation and Metrology, 2012, 89 p. (In Russian)

6. Iskhakov Sh.Sh., Kovalev F.E. & Koto- vich V.G. Problemy i dostizheniya v oblasti stroitel'nogo inzhiniringa [Problems and achievements in construction engineering]. *Collected edited volume of the workshop commemorating the 150th anniversary of the "Buildings" chair*. Saint Petersburg, FGBOU VO PGUPS Publ., 2015, pp. 9–14. (In Russian)

7. Iskhakov Sh.Sh., Vaskevich V.M. & Kovalev F.E. Opyt primeneniya sistem ispytaniya i dolgovremennogo kontrolya na startovykh sooruzheniyakh nazemnykh kosmicheskikh kompleksov [Experience application of systems test and lasting control on starts building ground cosmic complexes]. *Bezopasnost' Rossii. Bezopasnost' stroitel'nogo kompleksa* [Experience of applying trial and long-term control systems in launch facilities of ground-based space complexes. *Safety of Russia. Construction complex safety*]. Ed. by N.A. Makhutov. Moscow, "Znanie" municipal foundation Publ., 2012, ch. 4, section 7, pp. 711–719. (In Russian)
8. Iskhakov Sh. Sh., Vaskevich V.M. & Kovalev F.E. *Proektirovanie i primeneniye sistem monitoringa inzhenernykh (stroitel'nykh) konstruksij zdaniy i sooruzhenij* [Planning and applying monitoring systems for engineering (building) constructions of buildings and structures]: textbook. Saint Petersburg, Alexander Mozhaysky Military Space Academy Publ., 2013, 158 p. (In Russian)
9. Iskhakov Sh.Sh., Kovalev F.E., Mokhnatkin A.P. & Starchukov D.S. *Stanovlenie i razvitie vibratsionnykh sistem monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya nesushchikh jelementov startovykh sooruzhenij* [Emergence and development of vibration monitoring systems for bearing elements of launch facilities]: a monograph. Saint Petersburg, Alexander Mozhaysky Military Space Academy Publ., 2015, 110 p. (In Russian)
10. Iskhakov Sh.Sh., Vaskevich V.M., Kovalev F.E. & Ryzhikov V.Ju. Otsenka nadezhnosti jekspluatatsii zdaniy i sooruzhenij po metodikam vozniknoveniya riska ikh nerabotosposobnykh sostoyanij [Reliability evaluation of buildings and structures based on methodology of failure state risk emergence]. *Engineering and construction magazine*. Saint Petersburg, State Professional Higher Education Institution SPbGPU Publ., 2012, no. 7, pp. 52–61. (In Russian)
11. Savinov O.A. *Fundamenty pod mashiny* [Machinery foundations]. Leningrad, Moscow, Stroyizdat Publ., 1955, 292 p. (In Russian)
12. SNiP 2.02.05-87. *Fundamenty mashin s dinamicheskimi nagruzkami* [Foundations of machines subject to dynamic loads]. Moscow, State Committee for Construction of the USSR Publ., 1988, 52 p. (In Russian)
13. Bolotin V.V. *Primeneniye metodov teorii veroyatnostej i teorii nadezhnosti v raschetakh sooruzhenij* [Applying the probability and reliability theory methods in building calculations]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971, 255 p. (In Russian)
14. Gusev N.N. & Iskhakov Sh.Sh. A. s. RU (21) 2008 147445/28 (13)A. Metod funktsional'noj vibratsionnoj diagnostiki izmeneniya nesushchej sposobnosti gruntovogo osnovaniya i stroitel'nykh konstruksij zdaniy i sooruzhenij [Functional vibration diagnostic method for the bearing capacity of the ground bed and structural units of buildings and constructions]. No 2008147445; submitted on 01.12.2008. *Bulletin of FSI for Intellectual Property, Patents and Trademarks*, 2010, no. 16, 3 p. (In Russian)
15. Savin S.N. Dinamicheskij monitoring stroitel'nykh konstruksij na primere pandusa kinokontsertnogo zala "Pushkinskij" v g. Moskva [Dynamic monitoring of structural units as exemplified by the ramp of the Pushkinsky cinema and concert hall in Moscow]. *Engineering and construction magazine*. Saint Petersburg, State Professional Higher Education Institution SPbGPU Publ., 2012, no. 7, pp. 58–62. (In Russian)

ИСКХАКОВ Шавкат Шамильевич – канд. техн. наук, доцент, доцент, iskhakova_julia@mail.ru; *КОВАЛЕВ Федор Евгеньевич – канд. техн. наук, ст. преподаватель, kovaleff81@mail.ru; КОСЕНКОВ Руслан Эльдарович – адъюнкт, kosenkovruslan@mail.ru; МОХНАТКИН Алексей Петрович – начальник лаборатории, moxnatkin@mail.ru (Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского).

УДК 694

С. Е. Кирютина, В. Н. Глухих, А. Г. Черных, К. С. Григорьев**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ СТЕНОВЫХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Дата поступления: 19.10.2016

Решение о публикации: 16.12.2016

Цель: Выявление параметров, влияющих на эксплуатационный уровень качества малоэтажных жилых зданий со стеновыми деревянными конструкциями из штучных элементов, уложенных горизонтальными рядами. Такие конструкции обладают характерной особенностью – осадкой в период эксплуатации. Осадка – уменьшение вертикального размера стены из-за усушки деревянных элементов, влияния нагрузки и уплотнения швов. Определение числовых значений деформаций стеновых элементов и влияющих на них факторов позволит прогнозировать величину осадки в зависимости от объемно-планировочных и конструктивных решений малоэтажных зданий срубной конструкции. **Методы:** Числовые значения деформаций деревянных профилированных брусев могут определяться с использованием методов конструирования конечных элементов, численных методов и вычислительных программных комплексов. В данной работе исследование напряженно-деформированного состояния стеновых элементов под нагрузкой, действующей в малоэтажных зданиях, проводилось методом конечных элементов с помощью программного комплекса SCAD Office 15.1. **Результаты:** Анализ результатов расчета, представленных в графическом виде, выявляет, что основной особенностью деформирования бруса и развития осадки стены под воздействием нагрузки является смятие древесины в опорном зубе бруса. Это подтверждает данные величины деформации брусев из клееной древесины под нагрузкой, полученные экспериментальным путем. **Практическая значимость:** Выполненные исследования позволяют сделать вывод: для прогнозирования величины осадки стены здания срубной конструкции и сохранения ее качества в период эксплуатации особое внимание необходимо уделять конфигурации и качеству исполнения стеновых деревянных элементов, что должно отражаться в нормативной базе, отвечающей современным требованиям комплексной оценки технических решений.

Малоэтажные деревянные здания, деревянные конструкции, стены срубной конструкции, метод конечных элементов, период эксплуатации, осадка.

Vladimir N. Glukhikh, D. Eng., professor, svetlana_sodr@mail.ru; **Svetlana E. *Kirjutina**, aspirant, sekir@lan.spbgasu.ru; **Konstantin S. Grigoriev**, expert of the Institute for planning and inspection of construction designs of buildings and structures, sekir@lan.spbgasu.ru (Saint Petersburg State Architecture and Construction University) RESEARCH OF STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF WOODEN WALL STRUCTURES USING FINITE-ELEMENT METHOD

Objective: Determine the parameters impacting the performance quality level of low-rise residential buildings with wooden wall structures from single-piece elements placed in horizontal rows. Such a design has a specific property of shrinkage during operation. Shrinkage is the reduction of the vertical size of the wall due to the drying of wooden elements, the impact of the load and the joint packing. Determining the numeric values of wall elements alteration and the factors impacting it will allow to forecast the extent of the shrinkage depending on layout and arrangement and design solutions in low-

rise timberwork buildings. **Methods:** The numeric values of alteration of profiled wooden beams may be determined using the finite-element elaboration method, numerical methods and computational software suites. In this work, the research of stress-strain behavior of wall elements under load present in low-rise buildings was performed using the finite-element method via the SCAD Office 15.1 software suite. **Results:** Analyzing the results of the calculation presented graphically, displays that the main specific feature of beam alteration and wall shrinkage due to load is the crushing of timber in the abutment of the beam, which confirms the glue laminated timber beam alteration data obtained via experiment. **Practical importance:** The research performed allows to infer that in order to forecast the extent of the timberwork building wall shrinkage and to retain its quality during operation, special emphasis should be placed on the configuration and workmanship of wooden wall elements, which should be reflected in the regulatory system that satisfies today's requirements for complex assessment of technical solutions.

Low-rise timberwork buildings, wooden structures, timberwork walls, finite-element method, operation period, shrinkage.

Исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) стеновых деревянных конструкций методом конечных элементов (МКЭ) проводилось в рамках работы по разработке критериев оценки для системы качества таких конструкций из штучных элементов, уложенных горизонтальными рядами, подверженных осадке в период эксплуатации.

Стеновые конструкции из деревянных штучных элементов характерны для малоэтажных жилых домов срубной конструкции, имеющих многовековые традиции в России [1]. Пример здания в виде 3D модели представлен на рис. 1.

В настоящее время, с увеличением объемов малоэтажного деревянного домостроения [2], в связи с отсутствием нормативной базы, от-

вечающей современным требованиям обеспечения качества [3–5], комплексной оценки технических решений, энергетической эффективности и экологической безопасности зданий, вопросы критериев для оценки качества имеют первоочередное значение.

Характерной особенностью зданий срубной конструкции является наличие осадки стен в период эксплуатации, на которую влияют в том числе анизотропные свойства древесины [6–9]. Вопросы качества деревянных стеновых конструкций, подверженных осадке, подробно рассматриваются в работе [10]. Для изучения зависимости осадки стен от нагрузки в период эксплуатации здания были проведены экспериментальные исследования величины деформации брусев из



Рис. 1. Здание срубной конструкции:
1 – жилые постройки XVIII–XIX вв.; 2 – 3D модель, современное строительство

клееной древесины под нагрузкой, типичной для малоэтажного строительства, которая прилагалась поэтапно:

Этапы увеличения нагрузки, кгс/мм							
14	02	365	458	551	570	588	607

Аналогичные условия были использованы при расчете МКЭ. Он подробно описан в источниках [11, 12], является средством проверки теоретических решений и выработки соответствующих расчетных моделей [13, 14], позволяющих установить качественные и количественные значения характеристик, которые невозможно определить теоретически.

МКЭ применяется в современных программных системах для выполнения прочностных расчетов и проектирования строительных конструкций. В этой работе анализ результатов физического эксперимента проводился с помощью программного комплекса SCAD Office 15.1, особенности которого описаны в [15].

Для оценки влияния конструктивных особенностей соединения было проанализировано напряженно-деформированное состояние

(НДС), фрагмента стеновой конструкции; фотофиксация эксперимента представлена на рис. 2.

Брус был замоделирован с помощью плоских четырехугольных ортотропных конечных элементов (тип КЭ-44). Шаг разбиения сетки – около 15 мм. Жесткостные характеристики каждой пластины заданы следующими параметрами: $E_x = 400$ МПа; $E_y = 400$ МПа; $\nu_{xy} = 0,018$; $\nu_{yx} = 0,018$; $G_{xy} = 700$ МПа; толщина – 100 мм; удельный вес – 430 кг/м³.

Для более точного учета контактных площадок между брусками созданы упругие связи, передающие нагрузки с учетом деформаций (смятия) древесины. Нагрузки между брусками передаются сначала по наклонным плоскостям зуба, затем по горизонтальной плоскости (рис. 3).

Таким образом, с помощью конечно-элементного моделирования создан аналог физического эксперимента. В трех внутренних брусках возникают напряжения и деформации, которые после их анализа можно сравнить с результатами физического эксперимента.

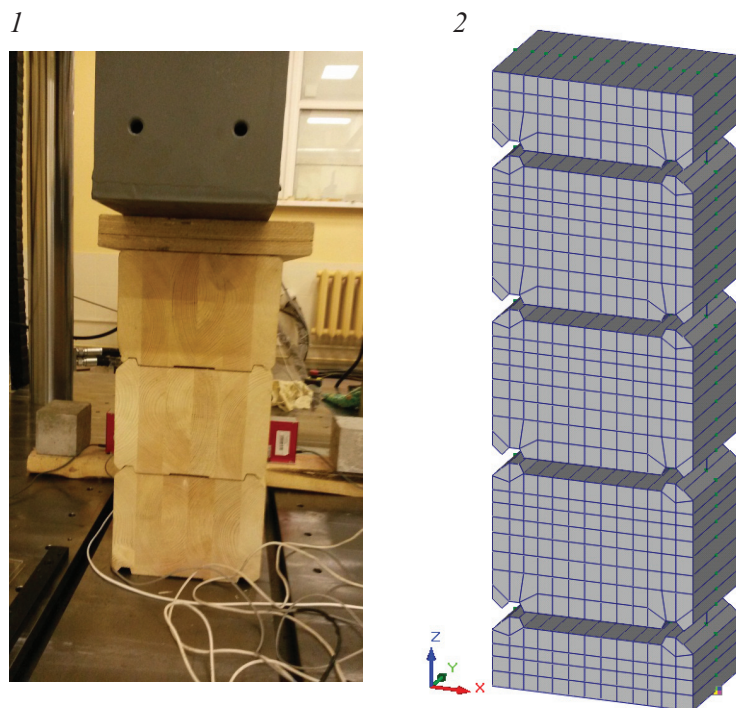


Рис. 2. Вырезанные фрагменты стены из профилированного бруса:

1 – фотофиксация; 2 – модель стеновой конструкции

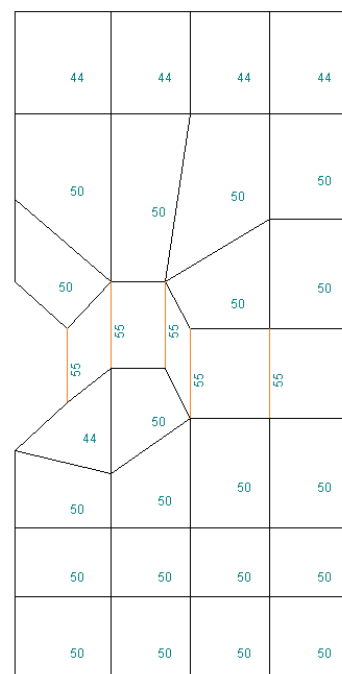


Рис. 3. Схема разбиения сетки

Результаты расчета МКЭ с использованием вычислительного комплекса представлены в графическом виде.

Вертикальные деформации фрагмента стены для бруса типа 1 приведены на рис. 4. Эпюры различных напряжений иллюстрируют рис. 5, 6.

Анализ результатов расчета, представленных в графическом виде, выявляет, что основной особенностью деформирования бруса и развития осадки стены под воздействием нагрузки можно назвать смятие древесины в опорном зубе бруса. Даже при достаточно большой горизонтальной плоскости профилированного бруса в первую очередь происходит смятие по малой площади зуба и в небольших границах возле зуба. После обжатия зуба опорная площадь значительно увеличивается и смятие древесины замедляется. Таким об-

разом, можно выделить две стадии развития деформаций в стыке между брусками. Первая стадия заключается в первоначальном обжатии по малой площади зуба, вторая – во внутренних деформациях бруса и влажностных деформациях. При несимметричном профиле зуба и значительных нагрузках напряжения распределены неравномерно по поперечному сечению и возникают значительные горизонтальные растягивающие напряжения в верхней и нижней гранях бруса, которые могут вызвать образование продольных трещин в бруске. Одновременно возможны скол выступающей части бруса и образование видимого дефекта на видимых (лицевых) поверхностях брусков. Вместе с тем при наиболее широко используемых габаритных размерах домов срубной конструкции значительных нагрузок не возникает и деформации и напряжения при-

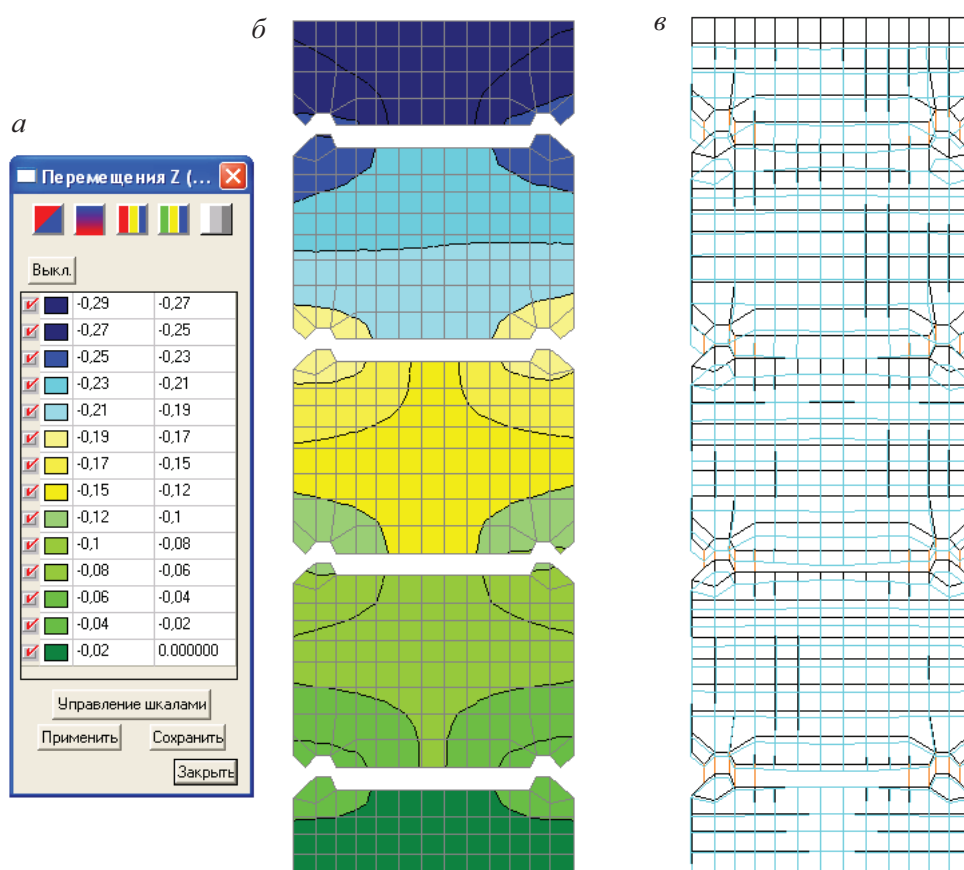


Рис. 4. Вертикальные деформации (в мм):

а – шкала значений деформаций/напряжений; б – эпюры напряжений; в – схема деформирования

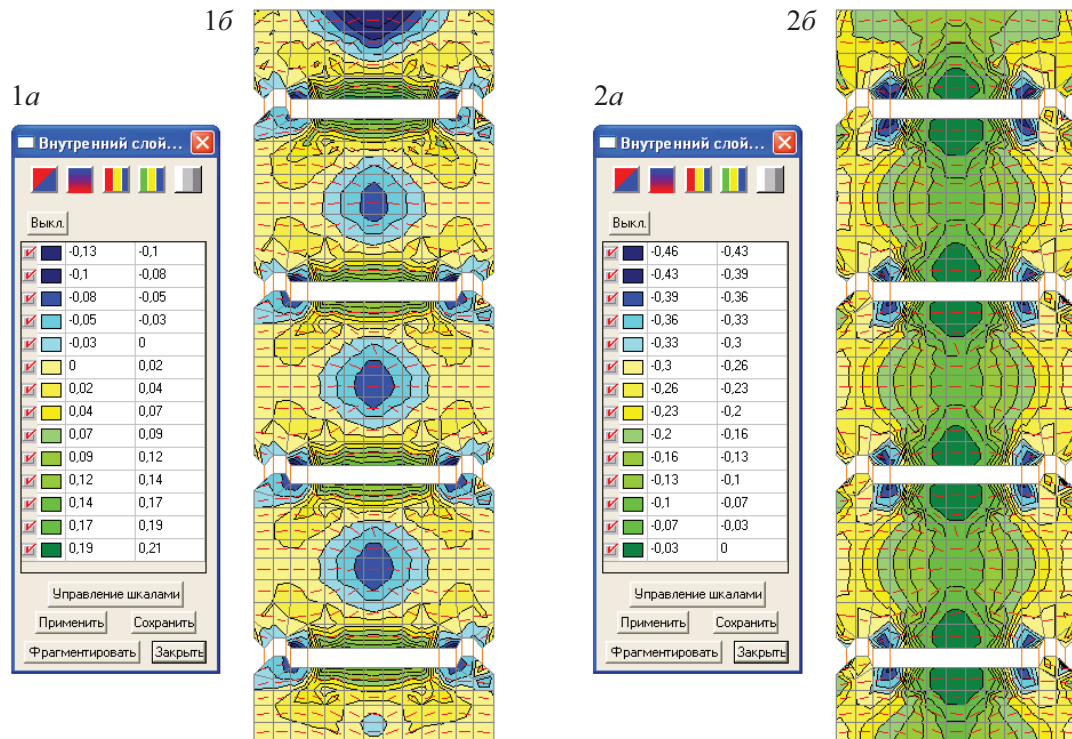


Рис. 5. Главные сжимающие напряжения (в МПа, 1) и главные растягивающие напряжения (в Т/м², 2):
а – шкала значений деформаций/напряжений; б – эпюры напряжений

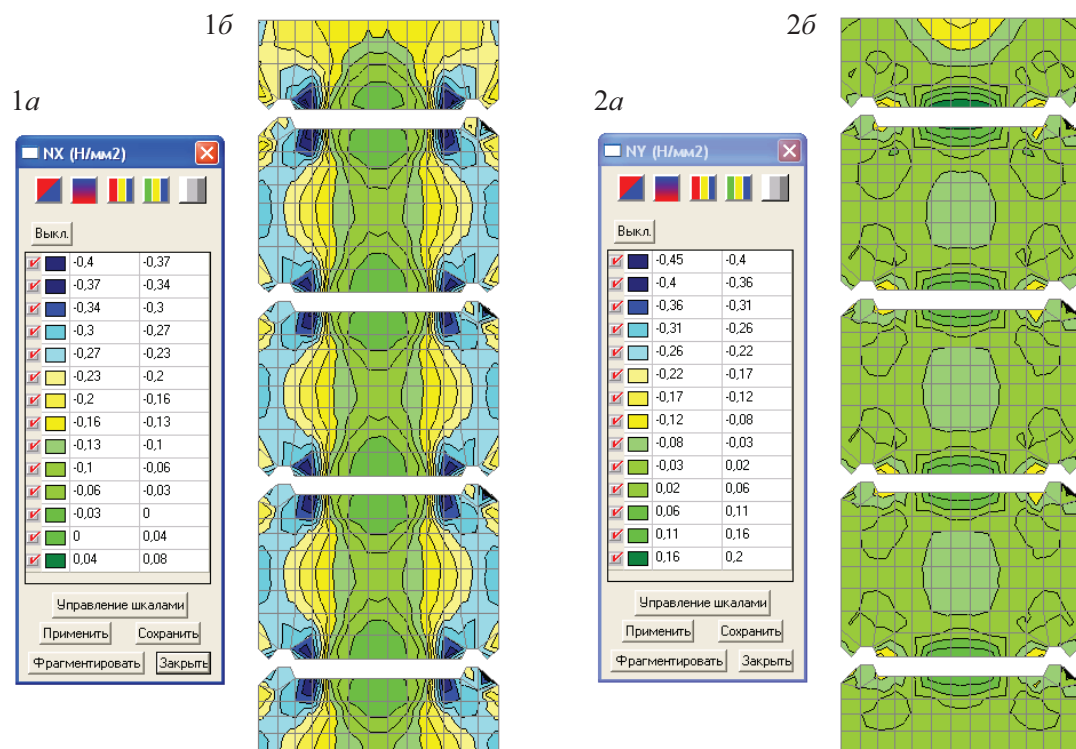


Рис. 6. Напряжения N_x (в МПа, 1) и N_y (в МПа, 2):
а – шкала значений деформаций/напряжений; б – эпюры напряжений

водят лишь к более плотному и герметичному «замыканию» зуба, что, несомненно, является преимуществом подобного профиля. Вопрос локального разрушения древесины от смятия для герметизации стыков нуждается в отдельном исследовании.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что для прогнозирования величины деформаций стеновых элементов, осадки стены здания срубной конструкции и сохранения ее качества в период эксплуатации особое внимание необходимо уделять конфигурации и качеству исполнения стеновых деревянных элементов, правильному подбору поперечного сечения бруса для соответствующих нагрузок и конфигураций сруба.

Библиографический список

1. Деревянное домостроение / под общ. ред. А. Г. Черных. – СПб. : НП «Ассоциация деревянного домостроения», 2007. – 348 с.
2. Вестник Ассоциации деревянного домостроения. – 2011. – № 2 (18). – 12 с.
3. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – М., 1979.
4. ГОСТ Р ИСО 9001-2011. Системы менеджмента качества. Требования. – М., 2011.
5. Кирютина С. Е. Актуальность разработки системы контроля качества деревянных конструкций строящихся зданий / С. Е. Кирютина // Вестник гражданских инженеров. – СПб. : СПбГАСУ, 2015. – № 2 (49). – С. 48–52.
6. Глухих В. Н. Анизотропия древесины. Технологический аспект : монография / В. Н. Глухих, А. Г. Черных. – СПб. : СПбГАСУ, 2013. – 240 с.
7. Ашкенази Е. К. Анизотропия древесины и древесных материалов / Е. К. Ашкенази. – М. : Лесн. пром-сть, 1978. – 224 с.
8. Ашкенази Е. К. Анизотропия конструкционных материалов : справочник / Е. К. Ашкенази, Э. В. Ганов. – Л. : Машиностроение, 1980. – 247 с.
9. Глухих В. Н. Упругие постоянные древесины поперек волокон / В. Н. Глухих // Изв. С.-Петерб. лесотехн. академии. – 2007. – Вып. 177. – С. 78–92.

10. Кирютина С. Е. Эксплуатационный уровень качества деревянных зданий, вопросы осадки стен / С. Е. Кирютина // Вестник гражданских инженеров. – СПб. : СПбГАСУ, 2016. – № 2 (55). – С. 33–38.

11. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич ; пер. с англ. Б. Е. Победри. – М. : Мир, 1975. – 541 с.

12. Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимации / О. Зенкевич, К. Морган ; пер. с англ. Б. И. Квасова, под ред. Н. С. Бахвалова. – М. : Мир, 1986. – 318 с.

13. Перельмутер А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Киев : Сталь, 2002. – 600 с.

14. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ : межвуз. тематич. сб. трудов. Вып. 17 / ред. Б. Г. Вагер. – СПб. : Министерство образования и науки Российской Федерации, С.-Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т, 2011. – 227 с.

15. Карпиловский В. С. Вычислительный комплекс SCAD / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. А. Маляренко, А. В. Перельмутер, М. А. Перельмутер. – М. : АСВ, 2006. – 592 с.

References

1. *Derevijanoe domostroenie* [Timber building construction]. Ed. by A. G. Chernykh. Saint Petersburg, NP "Timber Building Construction Association" Publ., 2007, 348 p. (In Russian)
2. *Vestnik Assotsiatsii derevyannogo domostroeniya* [The Timber Building Construction Association bulletin]. November-December 2011, no. 2 (18), 12 p. (In Russian)
3. GOST 15467-79. *Product-quality control. Basic concepts. Terms and definitions*. Moscow, 1979. (In Russian)
4. GOST R ISO 9001-2011. *Quality management systems. Requirements*. Moscow, 2011. (In Russian)
5. Kiryutina S. E. Aktual'nost' razrabotki sistemy kontrolya kachestva derevyannykh konstruksij stroyashchikhsya zdaniy [Relevance of developing a quality control system for wooden structures in buildings under

construction]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [The civil engineers bulletin]. Saint Petersburg, SPbGASU Publ., 2015, no. 2 (49), pp. 48–52. (In Russian)

6. Glukhikh V. N., Chernykh A. G. *Anizotropiya drevesiny. Tekhnologicheskij aspekt* [The timber anisotropy. Technological aspect]. Saint Petersburg, SPbGASU Publ., 2013, 240 p. (In Russian)

7. Ashkenazi E. K. *Anizotropiya drevesiny i drevesnykh materialov* [Anisotropy of timber and timber-based materials]. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1978, 224 p.

8. Ashkenazi E. K., Ganov E. V. *Anizotropiya konstruktivnykh materialov* [Anisotropy of architectural materials. Reference guide]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1980, 247 p. (In Russian)

9. Glukhikh V. N. Uprugie postoyannye drevesiny poperek volokon [Elastic constants of timber across grain]. *Izvestiya Sankt-Petersburgskoj lesotekhnicheskoy akademii* [The Saint Petersburg forest engineering academy bulletin], 2007, issue 177, pp. 78–92. (In Russian)

10. Kiryutina S. E. Jekspluatatsionnyj uroven' kachestva derevyannykh zdaniy. Voprosy osadki sten [Quality performance level of timberwork buildings. Wall shrinkage issues]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [The civil engineers bulletin]. Saint Petersburg, SPbGASU Publ., 2016, no. 2 (55), pp. 33–38. (In Russian)

11. Zenkevich O. *Metod konechnykh jelementov v tekhnike* [Finite elements method in engineering]. Moscow, Mir Publ., 1975, 541 p. (In Russian)

12. Zenkevich O., Morgan K. *Konechnye jelementy i approksimatsii* [Finite elements and approximations]. Moscow, Mir Publ., 1986, 318 p. (In Russian)

13. Perel'muter A. V., Slivker V. I. *Raschetnye modeli sooruzhenij i vozmozhnost' ikh analiza* [Structure simulation models and analysis ability]. Kyiv, Stal Publ., 2002, 600 p. (In Russian)

14. *Matematicheskoe modelirovanie, chislennye metody i komplekсы programm* [Mathematical modeling, numerical methods and program systems]: interacademic edited volume. Ed. by B. G. Vager. Saint Petersburg, Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Saint Petersburg State Architecture and Construction University, 2011, issue 17, 227 p. (In Russian)

15. Karpilovskij V. S., Kriksunov Je. Z., Malyarenko A. A., Perel'muter A. V., Perel'muter M. A. *Vychislitel'nyj kompleks SCAD* [SCAD computer system]. Moscow, ASV Publ., 2006, 592 p. (In Russian)

ГЛУХИХ Владимир Николаевич – доктор техн. наук, профессор, svetlana_sodr@mail.ru; ЧЕРНЫХ Александр Григорьевич – доктор техн. наук, профессор, agdom@inbox.ru (Карачаевский филиал Орловского гос. опорного ун-та им. И. С. Тургенева; *КИРЮТИНА Светлана Евгеньевна – аспирант, sekir@lan.spbgasu.ru; ГРИГОРЬЕВ Константин Станиславович – специалист Института проектирования и обследований строительных конструкций зданий и сооружений, sekir@lan.spbgasu.ru (Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет).

УДК 681.518.5:004.052.32

Д. А. Никитин**АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИМАЛЬНЫХ КОДОВ
С СУММИРОВАНИЕМ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ОСНОВЕ
ВЗВЕШИВАНИЯ РАЗРЯДОВ ИНФОРМАЦИОННЫХ ВЕКТОРОВ,
В СИСТЕМАХ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ**

Дата поступления: 25.11.2016

Решение о публикации: 16.12.2016

Цель: Исследование особенностей модульных взвешенных кодов и модифицированных взвешенных кодов при организации систем функциональной диагностики. **Методы:** Используются методы теории информации и помехоустойчивого кодирования, теории дискретных устройств и технической диагностики дискретных систем. **Результаты:** Описаны правила построения различных модификаций взвешенных кодов с суммированием, исследованы обнаруживающие характеристики этих кодов. Результаты исследований показали, что возможно построение двух различных модификаций кодов, которые дают наилучшие результаты с точки зрения обнаружения искажений и являются оптимальными при фиксированных длинах информационных и контрольных векторов. Эксперименты с набором контрольных комбинационных схем показали, что возможно построение систем функционального контроля с помощью модульного взвешенного кода с суммированием и модифицированного кода с суммированием, которые полностью исключают необнаруживаемые ошибки для некоторых контролируемых схем. Также проведено изучение характеристик аппаратной избыточности систем функционального контроля, построенных по представленным кодам. При реализации таких систем функционального контроля наглядно продемонстрированы преимущества одного типа кодирования перед другим на каждом конкретном примере из набора тестовых комбинационных схем LGSynth89. **Практическая значимость:** Использование различных модификаций кодов с суммированием позволяет проектировать системы функционального контроля, полностью исключая вероятность возникновения необнаруживаемого искажения, а также обладающие небольшой аппаратной избыточностью.

Система функционального контроля, код Бергера, взвешенный код с суммированием, модульно взвешенный код с суммированием, модифицированный взвешенный код с суммированием.

Dmitrij A. Nikitin, postgraduate, nikitin239@gmail.com (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) RESPONSE ANALYSIS OF OPTIMUM SUM CODES OBTAINED BASED ON WEIGHING DATA VECTOR BITS IN FUNCTIONAL CONTROL SYSTEMS

Objective: Assess the specifics of weighted modular codes and modified weighted codes in organizing functional diagnostics systems. **Methods:** Methods of information theory and error-control coding, theory of discrete devices and technical diagnostics of discrete systems. **Results:** Rules for building different versions of weighted sum codes were described and distinctive characteristics of such codes examined. The research results have shown that it is possible to build two different versions of codes granting best results in terms of error detection and which are optimal at fixed lengths of data and control vectors. Experiments with combinational circuit setups have shown that it is possible to build functional control systems using modular weighted sum code and modified sum code that will fully rule out undetectable errors for certain controlled circuits. Additionally, hardware redundancy research was performed for the functional control systems built using the codes presented. In implementing such

functional control systems, advantages of one type of coding over the other were notably illustrated using each specific example from the set of test combinational circuits LGSynth89. **Practical importance:** The use of different versions of sum codes allows to plan functional control systems fully ruling out the possibility of undetectable errors and with little hardware redundancy.

Functional control system, Berger code, weighted sum code, modular weighted sum code, modified weighted sum code.

Введение

При организации систем функционального контроля используются коды с суммированием [1, 2]. Структура системы функционального контроля на основе разделимого кода представлена на рис. 1. В ее состав входит арифметико-логическое устройство $F(x)$, реализующее систему булевых функций $\langle f_1, f_2, \dots, f_m \rangle$, блок контрольной логики $G(x)$, вычисляющий значения контрольных булевых функций $\langle g_1, g_2, \dots, g_k \rangle$ на основе входных воздействий, а также самопроверяемый тестер, который фиксирует соответствие между вычисленными значениями выходов блоков информационной и контрольной логики [3, 4].

Такое соответствие определяется с помощью применяемого кода с суммированием. Выходы блока контролируемого устройства

отождествляют с информационным вектором с m разрядами, а выходы блока $G(x)$ – с контрольным вектором длины k . От выбора кода и его модификаций зависят такие важнейшие параметры систем функционального контроля как аппаратная избыточность и обнаруживающая способность системы.

Модификации взвешенных кодов с суммированием

В основе правил построения классического кода с суммированием, или кода Бергера [5], лежит сложение единичных информационных разрядов и дальнейшее представление полученного числа в двоичной форме в качестве контрольного вектора. Классический код с суммированием обозначается как $S(m,k)$ -код, из-

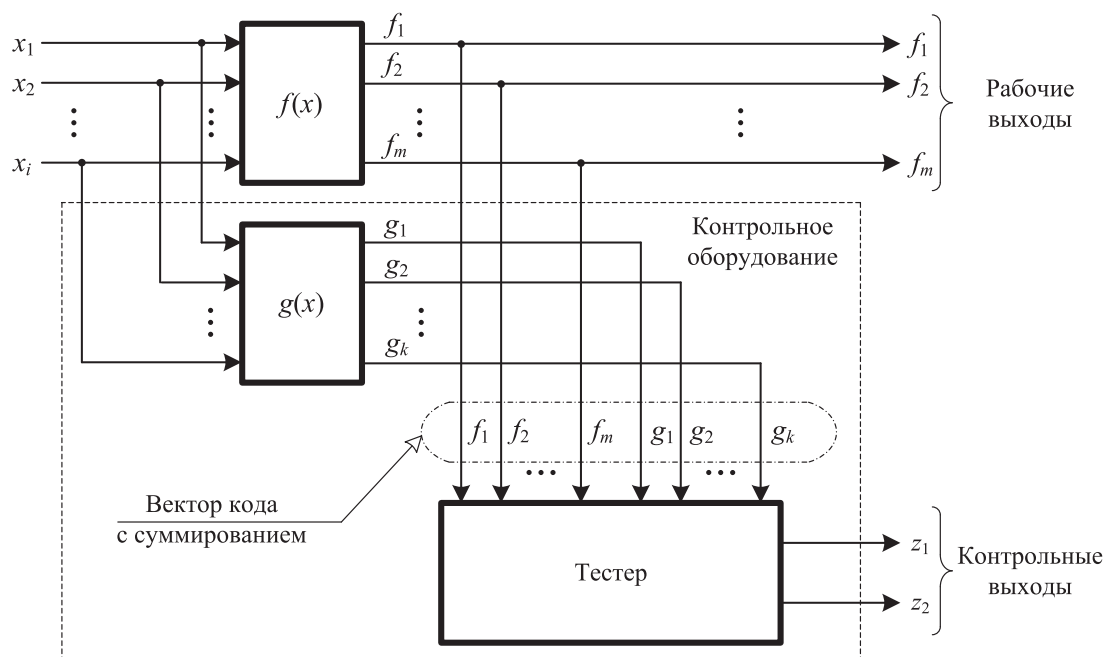


Рис. 1. Структурная схема системы функциональной диагностики

быточность его равна $k = \lceil \log_2(m+1) \rceil$ (запись $\lceil b \rceil$ означает целое сверху от b). При распределении всех возможных информационных слов по контрольным группам в коде Бергера наблюдается неравномерность количества векторов в каждой группе в табл. 1, что приводит к тому, что кодом не обнаруживается 50% двукратных ошибок, 37,5% четырехкратных ошибок, 31,5% шестикратных ошибок [6, 7].

Также могут быть построены различные модификации кодов с суммированием, в которых улучшены обнаруживающие характеристики по сравнению с классическими. В работе [8] было введено понятие оптимального кода, в котором при фиксированных значениях m и k информационные вектора распределены максимально равномерно по контрольным группам, такой код получил название оптимального и не обнаруживает в разы меньше искажений, чем классический код с суммированием. Для $m = 4$ в каждой контрольной группе будет содержаться по 2 информационных вектора из возможных 16 векторов; пример такого распределения представлен в табл. 2.

Оптимальный код с $m = 4$ имеет всего 16 необнаруживаемых искажений, а код Бер-

гера $S(4,3)$ не обнаруживает 54 искажения. Введем понятие эффективности кода, как отношение количества необнаруживаемых искажений в оптимальном коде к числу необнаруживаемых искажений в рассматриваемом коде. Данный коэффициент является относительной характеристикой, обозначается ξ и вычисляется по формуле

$$\xi = \frac{N_{m,k}^{\min}}{N_m}.$$

Эффективность рассматриваемого кода тем лучше, чем ближе значение ξ к единице. Эффективность классических кодов с суммированием редко превосходит значение 0,3 и никогда не поднимается выше 0,5 [8].

Также введем характеристику для определения обнаруживающих свойств кода, как отношение числа необнаруживаемых ошибок в коде к числу всех возможных возникающих искажений. Данный параметр обозначается, как γ , и характеризует обнаруживающую способность кода. Классический код с суммированием не обнаруживает около 20% от всех возникающих искажений [9, 10].

Улучшение свойств обнаружения ошибок кодами с суммированием достигается путем

ТАБЛИЦА 1. Распределение информационных векторов $S(4,3)$ -кода

Контрольные группы							
0	1	2	3	4	5	6	7
0000	0001	0011	0111	1111			
	0010	0101	1011				
	0100	0110	1101				
	1000	1001	1110				
		1010					
		1100					

ТАБЛИЦА 2. Пример одного из распределений информационных векторов оптимального кода при $m = 4$

Контрольные группы							
0	1	2	3	4	5	6	7
0000	0001	0011	0111	1111	0110	1010	1101
1000	0010	0101	1011	0100	1001	1100	1110

взвешивания разрядов заранее установленными натуральными числами [11–14].

Одним из способов повышения эффективности кода является применение взвешивания информационных разрядов прямой последовательностью натуральных чисел [15, 16], где контрольный вектор подсчитывается по следующему правилу:

$$W = \sum_{i=1}^m f_i w_i.$$

Такой код назовем взвешенным кодом с суммированием, при его использовании снижается количество обнаруживаемых искажений, но при этом избыточность кода гораздо выше, чем в классическом коде с суммированием. Рассмотрим применение модульных принципов построения кода на основе взвешенного кода с суммированием. Выберем модуль такой же, как в коде Бергера [17] $M = 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil}$, и представим суммарный вектор взвешенного кода с суммированием по данному модулю. Такой код называется модульным взвешенным кодом с суммированием и обозначается, как $WSM(m, k)$. Рассмотрим перераспределение информационных векторов в $(4, 3)$ -коде по сравнению с классическим кодом с суммированием (табл. 3).

Данный алгоритм построения позволяет получить оптимальный код с точки зрения обнаружения искажений при фиксированных m , k и имеет 16 обнаруживаемых ошибок при

$m = 4$. Дальнейшие эксперименты показали, что для любых m этот метод дает возможность построить оптимальные коды с минимумом обнаруживаемых искажений.

Рассмотрим другую модификацию взвешенного кода с суммированием, основанную на использовании специального поправочного коэффициента [8]. За основу также берется код с суммированием с прямой последовательностью весов, далее вес информационного вектора W рассчитывается по модулю $M = 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil}$. Затем рассчитывается поправочный коэффициент модификации α , как сумма по модулю 2 (XOR) произвольного, заранее установленного, числа информационных разрядов. Результирующий контрольный вектор вычисляется, как $W(mod M) + \alpha M$ и записывается в двоичном виде. Назовем данный метод модификации $RWS(m, k)$ -кодом.

Для примера возьмем $(4, 3)$ -код и применим $RWS(m, k)$ -алгоритм модификации кода. В табл. 4 представлены результаты распределения информационных слов $RWS(4, 3)$ -кода с α , равным сумме по модулю 2 второго и четвертого информационных разрядов.

Модифицированный взвешенный $(4, 3)$ -код также является оптимальным и имеет 16 обнаруживаемых искажений. Дальнейшие эксперименты показали, что при определенном выборе коэффициента α для всех $m = 2 \div 20$ этот алгоритм модификации позволяет построить оптимальный код. Однако су-

ТАБЛИЦА 3. Распределение информационных векторов $WSM(4, 3)$ -кода

Контрольные группы							
0	1	2	3	4	5	6	7
0000	0111	0100	0010	0001	0110	0101	0011
1011	1000	1111	1100	1010	1001	1110	1101

ТАБЛИЦА 4. Распределение информационных векторов $RWS(4, 3)$ -кода

Контрольные группы							
0	1	2	3	4	5	6	7
0000	0111	0101	0010	0001	0110	0100	0011
1010	1000	1111	1101	1011	1001	1110	1100

ществуют такие модифицированные взвешенные коды, которые полностью теряют свои помехоустойчивые свойства при «неудачных» выборах подсчета коэффициента α .

На рис. 2 приведен сравнительный анализ обнаруживающей способности для $S(m,k)$, $WSM(m,k)$ и $RWS(m,k)$ оптимальных кодов. Из него можно сделать вывод, что обнаруживающая способность кода с суммированием в несколько раз хуже, чем у остальных кодов. Как известно, чем меньше значение показателя γ , тем больше ошибок обнаруживает код.

Полученные $WSM(m,k)$ - и $RWS(m,k)$ -коды являются оптимальными при фиксированных значениях m и k , их эффективность всегда равна единице, они обладают одинаковой обнаруживающей характеристикой и могут быть сравнены между собой, так как имеют одинаковую избыточность.

Эксперименты с контрольными комбинационными схемами

Так как в общем виде оба кода не обнаруживают одинаковое количество искажений в

информационных векторах, целесообразно проверить эффективность их применения на практике. За основу возьмем набор тестовых комбинационных схем из пакета LGSynth89 [18] и произведем эксперименты по сравнению обнаруживающей способности систем функционального диагностирования, построенных с использованием $WSM(m,k)$ - и $RWS(m,k)$ -кодов с α , которое вычисляется, как сумма по модулю два всех четных разрядов. Результаты экспериментов представлены в табл. 5.

Так как оба кода являются оптимальными с точки зрения обнаружения ошибок при фиксированных значениях m и k , доля необнаруживаемых искажений в системах функционального контроля с использованием контрольных примеров сравнительно небольшая. В большинстве схем количество необнаруживаемых ошибок равно нулю. Для некоторых примеров лучшими обнаруживающими способностями обладает модульный код с прямой последовательностью весов $WSM(m,k)$, для некоторых – наоборот, модифицированный взвешенный $RWS(m,k)$ -код, но выявить однозначного лидера с точки зрения обнаруживающей способности нельзя.

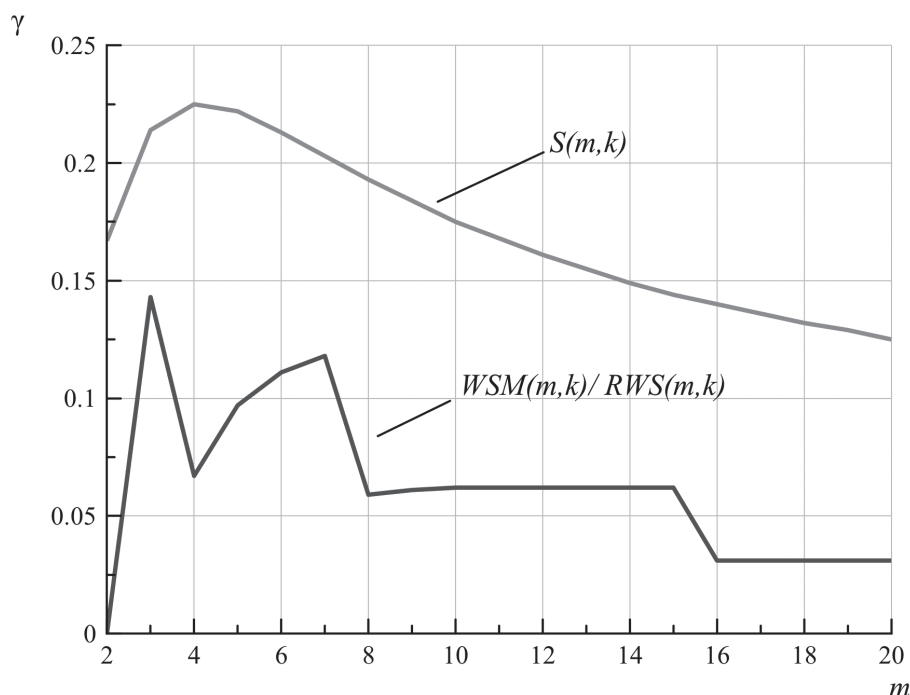


Рис. 2. Обнаруживающая способность кодов с суммированием

Рассмотрим результаты проведенных экспериментов по занимаемой площади на кристалле для реализованной системы функцио-

нального диагностирования. Данный эксперимент проводился с помощью интерпретатора SIS [19], показатели представлены в табл. 6.

ТАБЛИЦА 5. Сравнение обнаруживающей способности на контрольных примерах

№	Контрольная схема	Число выходов	Общее количество необнаруживаемых ошибок		Всего ошибок в схеме
			$WSM(m,k)$	$RWS(m,k)$	
1	alu2	6	805	1452	61 988
2	b1	4	0	0	44
3	c17	2	0	0	234
4	cm138a	8	0	0	680
5	cm151a	2	0	0	14 592
6	cm162a	5	6277	6277	317 331
7	cm42a	10	0	0	278
8	cm82a	3	4	0	648
9	cm85a	3	0	48	30 912
10	cmb	4	0	0	288 218
11	decod	16	0	0	224
12	z4ml	4	0	0	4168

ТАБЛИЦА 6. Сравнение занимаемой площади на контрольных примерах

№	Контрольная схема	Площадь контрольной схемы, усл. ед.	Площадь системы функционального контроля в stdcell.genlib, усл. ед.		σ
			$WSM(m,k)$	$RWS(m,k)$	
1	alu2	8856	11 280	16 128	0,699
2	b1	304	1144	984	1,163
3	c17	256	560	368	1,522
4	cm138a	560	4576	3656	1,252
5	cm151a	760	312	600	0,52
6	cm162a	1176	4464	3064	1,457
7	cm42a	640	9352	7384	1,267
8	cm82a	656	1160	1328	0,873
9	cm85a	992	1568	1672	0,938
10	cmb	1248	1368	1288	1,062
11	decod	800	20 552	23 400	0,878
12	z4ml	1600	3024	3128	0,967

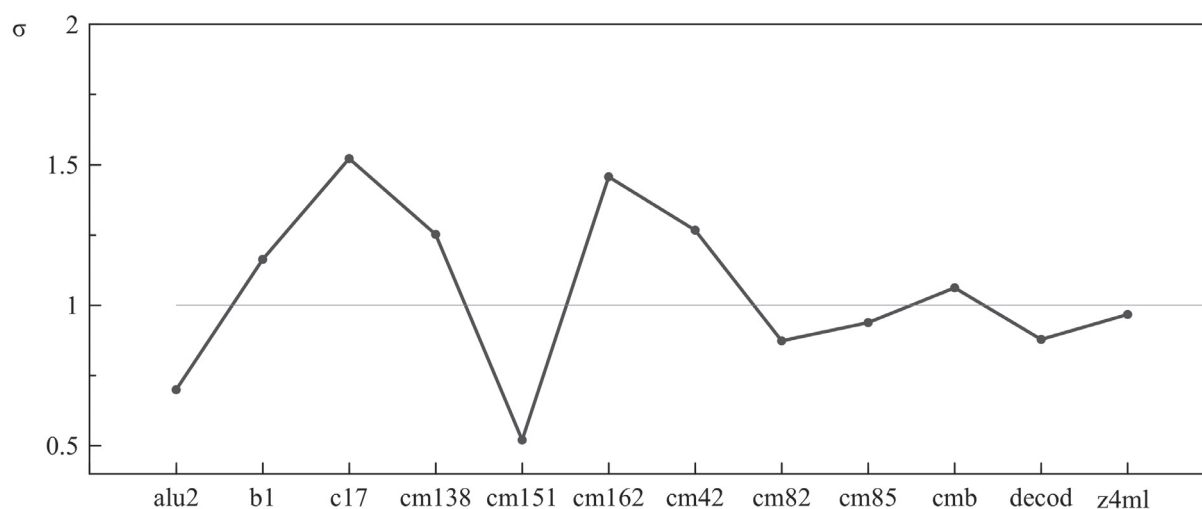


Рис. 3. Сравнение занимаемой площади для контрольных примеров

Коэффициент σ позволяет определить, во сколько раз занимаемая площадь при использовании взвешенного модульного кода с суммированием с прямой последовательностью весов отличается от площади при применении модифицированного взвешенного $RWS(m,k)$ -кода (рис. 3). При $\sigma < 1$ выгоднее применять модульные алгоритмы взвешивания с точки зрения занимаемой площади, в случае $\sigma > 1$ $RWS(m,k)$ -код имеет преимущество при организации систем функционального контроля.

С точки зрения занимаемой площади системы функционального контроля, построенные по разным кодам, также существенно не различаются, среднее значение коэффициента $\sigma = 1,0787$. По графику, представленному выше, видно, что для 6 схем из 12 выгоднее использовать $WSM(m,k)$ -код, а для остальных 6 – $RWS(m,k)$ -код.

Заключение

В статье описаны методы построения оптимальных взвешенных кодов, исследованы обнаруживающие способности этих кодов, а также представлены результаты проведенных экспериментов на наборе тестовых схем. По

данным результатам можно судить об эффективности использования помехоустойчивых кодов с суммированием при проектировании систем функционального контроля, а также о том, что для каждого контрольного примера метод кодирования стоит подбирать индивидуально в силу особенностей реализации того или иного контролируемого устройства. Также показано, что применение $RWS(m,k)$ - и $WSM(m,k)$ -кодов эффективнее классического кода с суммированием, модульный и модифицированный коды являются оптимальными с точки зрения обнаружения ошибок и обладают одинаковыми обнаруживающими характеристиками с точки зрения общего числа ошибок.

Библиографический список

1. Nicolaidis M. On-Line Testing for VLSI – A Compendium of Approaches / M. Nicolaidis, Y. Zorian // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. – 1998. – N 12. – P. 7–20.
2. Мехов В. Б. Контроль комбинационных схем на основе модифицированных кодов с суммированием / В. Б. Мехов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2008. – № 8. – С. 153–165.

3. Сапожников Вал. В. Самопроверяемые дискретные устройства / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
4. Ефанов Д. В. Синтез генераторов тестеров модифицированных кодов Бергера на основе свойств линейных и простых симметричных функций / Д. В. Ефанов // Изв. ПГУПС. – 2014. – Вып. 4. – С. 99–109.
5. Berger J. M. A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels / J. M. Berger // Information and Control. – 1961. – Vol. 4, issue 1. – P. 68–73.
6. Ефанов Д. В. О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля / Д. В. Ефанов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 6. – С. 155–162.
7. Сапожников Вал. В. Модульные коды с суммированием в системах функционального контроля. I. Свойства обнаружения ошибок кодами в информационных векторах / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, М. Р. Черепанова // Электронное моделирование. – 2016. – Т. 38, № 2. – С. 27–48.
8. Блюдов А. А. Построение модифицированного кода Бергера с минимальным числом необнаруживаемых ошибок информационных разрядов / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Электронное моделирование. – 2012. – Т. 34, № 6. – С. 17–29.
9. Сапожников Вал. В. Предельные свойства кода с суммированием / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Изв. ПГУПС. – 2010. – Вып. 3. – С. 290–299.
10. Ефанов Д. В. Три теоремы о кодах Бергера в схемах встроенного контроля / Д. В. Ефанов // Информатика и системы управления. – 2013. – № 1. – С. 77–86.
11. Das D. Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multilevel Circuits / D. Das, N. A. Touba // Proc. 17th IEEE Test Symposium. – California, USA, 1999. – P. 370–376.
12. Das D. Low Cost Concurrent Error Detection Based on Modulo Weight-Based Codes / D. Das, N. A. Touba, M. Seuring, M. Gossel // Proc. of IEEE 6th Intern. On-Line Testing Workshop (IOLTW). – Palma de Mallorca, Spain, July 3–5, 2000. – P. 171–176.
13. Сапожников Вал. В. Об одном классе кодов, пригодных для синтеза систем функционального контроля логических устройств / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщения. – 2014. – № 2. – С. 48–58.
14. Сапожников Вал. В. Взвешенные коды с суммированием для организации контроля логических устройств / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Электронное моделирование. – 2014. – Т. 36, № 1. – С. 59–80.
15. Сапожников Вал. В. О способах построения кодов с суммированием с минимальным общим числом необнаруживаемых искажений в информационных векторах / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, Д. А. Никитин // Изв. ПГУПС. – 2014. – Вып. 1. – С. 82–91.
16. Efanov D. Sum Code Formation with Minimum Total Number of Undetectable Errors in Data Vectors / D. Efanov, Val. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov, D. Nikitin // Proc. of 13th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2015). – Batumi, Georgia, September 26–29, 2015. – P. 141–148. DOI: 10.1109/EWDTS.2015.7493112.
17. Сапожников Вал. В. Модульно взвешенный код с суммированием для систем технического диагностирования / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, Д. А. Никитин // Информатика и системы управления. – 2015. – № 3. – С. 53–62.
18. Collection of Digital Design Benchmarks. – URL : <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks> (дата обращения: 17.11.2016).
19. SIS: A System for Sequential Circuit Synthesis / E. M. Sentovich, K. J. Singh, L. Lavagno, C. Moon, R. Murgai, A. Saldanha, H. Savoj, P. R. Stephan, R. K. Brayton, A. Sangiovanni-Vincentelli. – Berkeley, Electronics Research Laboratory, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, 4 May 1992. – 45 p.

References

1. Nicolaidis M., Zorian Y. On-Line Testing for VLSI – A Compendium of Approaches. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1998, no. 12, pp. 7–20.

2. Mekhov V.B., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. Kontrol' kombinatsionnykh skhem na osnove modifitsirovannykh kodov s summirovaniem [Controlling combinational circuits based on modified sum codes]. *Automatica i telemekhanika* [Automatics and telemekhanics], 2008, no. 8, pp. 153–165. (In Russian)
3. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. *Samoproveryaemye diskretnye ustrojstva* [Self-calibrating discrete devices]. Saint Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1992, 224 p. (In Russian)
4. Efanov D.V. Sintez generatorov testerov modifitsirovannykh kodov Bergera na osnove svoystv lineynykh i prostykh simmetrichnykh funktsij [Synthesis of data test generators for modified Berger codes based on the properties of linear and simple symmetric functions]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [The St. Petersburg Transport University Bulletin]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, issue 4, pp. 99–109. (In Russian)
5. Berger J.M. A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels. *Information and Control*, 1961, vol. 4, issue 1, pp. 68–73.
6. Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. O svoystvakh koda s summirovaniem v skhemakh funktsional'nogo kontrolya [Concerning sum code properties in functional control circuits]. *Automatica i telemekhanika* [Automatics and telemekhanics], 2010, no. 6, pp. 155–162. (In Russian)
7. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Efanov D.V., Cherepanova M.R. Modulnye kody s summirovaniem v sistemakh funktsional'nogo kontrolya [Modular sum codes in functional control systems] I. Svoystva obnaruzheniya oshibok kodami v informatsionnykh vektorakh [Properties of error detection by codes in data vectors]. *Elektronnoye modelirovanie* [Electronic modeling], 2016, vol. 38, no. 2, pp. 27–48. (In Russian)
8. Bljudov A.A., Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. Postroenie modifitsirovannogo koda Bergera s minimal'nym chislom neobnaruzhivaemykh oshibok informatsionnykh razryadov [Building a modified Berger code with minimal number of undetectable data bit errors]. *Elektronnoye modelirovanie* [Electronic modeling], 2012, vol. 34, no. 6, pp. 17–29. (In Russian)
9. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Efanov D.V. Predel'nye svoystva koda s summirovaniem [Ultimate properties of sum code]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [The St. Petersburg Transport University Bulletin]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2010, 3, pp. 290–299. (In Russian)
10. Efanov D.V. Tri teoremy o kodakh Bergera v skhemakh vstroennogo kontrolya [Three theorems on the Berger codes in checker circuits]. *Informatika i sistemy upravleniya* [Information science and control systems], 2013, no. 1, pp. 77–86. (In Russian)
11. Das D., Touba N.A. Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multilevel Circuits. *Proceedings 17th IEEE Test Symposium*. California, USA, 1999, pp. 370–376.
12. Das D., Touba N.A., Seuring M., Gossel M. Low Cost Concurrent Error Detection Based on Modulo Weight-Based Codes. *Proceedings of IEEE 6th International On-Line Testing Workshop (IOLTW)*. Palma de Mallorca, Spain, 2000, 3–5 July, pp. 171–176.
13. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Efanov D.V. Ob odnom klasse kodov, prigodnykh dlya sinteza sistem funktsional'nogo kontrolya logicheskikh ustrojstv [On single code class suitable for synthesizing logical unit functional control systems]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* [The Rostov State University of Transport Bulletin], 2014, no. 2, pp. 48–58. (In Russian)
14. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Efanov D.V. Vzveshennyye kody s summirovaniem dlya organizatsii kontrolya logicheskikh ustrojstv [Weighted sum codes for organizing logical unit control]. *Elektronnoye modelirovanie* [Electronic modeling], 2014, vol. 36, no. 1, pp. 59–80. (In Russian)
15. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Efanov D.V., Nikitin D.A. O sposobakh postroeniya kodov s summirovaniem s minimal'nym obshchim chislom neobnaruzhivaemykh iskazhenij v informatsionnykh vektorakh [On building sum codes with minimum overall number of undetectable errors in data vectors]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [The St. Petersburg Transport University Bulletin], 2014, no. 1, pp. 82–91. (In Russian)
16. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov V.I., Nikitin D. Sum Code Formation with Minimum Total Number of Undetectable Errors in Data Vectors. *Proceedings of 13th IEEE East-West Design &*

Test Symposium (EWDTS'2015). Batumi, Georgia, 2015, 26–29 September, pp. 141–148. DOI: 10.1109/EWDTS.2015.7493112.

17. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Efanzon D.V., Nikitin D.A. Modul'no vzveshennyj kod s summirovaniem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya [Modular weighted sum code for technical diagnostics systems]. *Informatika i sistemy upravleniya* [Information science and control systems], 2015, no. 3, pp. 53–62. (In Russian)

18. Collection of Digital Design Benchmarks. URL: <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks/> (retrieved on: 17.11.2016). (In Russian)

19. Sentovich E.M., Singh K.J., Lavagno L., Monon C., Murgai R., Saldanha A., Savoj H., Stephan P. R., Brayton R. K., Sangiovanni-Vincentelli A. *SIS: a system for sequential circuit synthesis*. Berkeley, Electronics research laboratory, Department of electrical engineering and computer science, University of California, 1992, 4 may, 45 p.

НИКИТИН Дмитрий Александрович – аспирант, nikitin239@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА «ИЗВЕСТИЯ ПГУПС» ЗА 2016 ГОД

Проблематика транспортных систем

	Т., вып.	Стр.
<i>Блажко Л. С., Захаров В. Б., Черняев Е. В.</i> Требования безопасности к конструкции уравнительного стыка для высокоскоростных железнодорожных линий	Т. 13, 4 (49)	443–450
<i>Грошев Г. М., Белозеров В. Л., Кукушкина Я. В., Климова Н. В.</i> Об оптимизации величины состава блок-поездов при доставке контейнеров в морской торговый порт в транспортном узле	Т. 13, 4 (49)	451–459
<i>Кабанов А. В., Жемчугова Н. А.</i> Исследование организационно-технологических моделей переустройства железнодорожных сортировочных станций	Т. 13, 3 (48)	293–301
<i>Числов О. Н., Богачев В. А., Задорожний В. М., Богачев Т. В.</i> Распределение вагонопотоков операторской компании в припортовых транспортных узлах методом экономико-географического разграничения	Т. 13, 3 (48)	302–313

Современные технологии – транспорту

<i>Бекбаев Г. А., Привалов А. А.</i> Модель для расчета устойчивости функционирования телекоммуникационной сети железнодорожной станции в условиях неблагоприятных воздействий на основе схемы функциональной целостности	Т. 13, 4 (49)	460–471
<i>Бельтюков В. П.</i> Способ применения электрического тормоза электропоездов с асинхронным тяговым приводом в качестве автоматического тормоза	Т. 13, 2 (47)	112–120
<i>Бельтюков В. П., Андреев А. В.</i> Особенности определения стоимости жизненного цикла верхнего строения пути на участках с разными условиями эксплуатации	Т. 13, 3 (48)	314–320
<i>Бельтюков В. П., Симонюк И. А.</i> К вопросу об улучшении среднесрочного планирования путевых работ	Т. 13, 4 (49)	472–477
<i>Бельтюков В. П., Третьяков А. А.</i> Комплексная оценка потребности в промежуточных ремонтах пути	Т. 13, 3 (48)	321–327
<i>Бельтюков В. П., Сенникова А. В.</i> Влияние осевых нагрузок на одиночный выход рельсов	Т. 13, 2 (47)	105–111

<i>Блажко Л. С., Чуян С. Н., Захаров В. Б., Черняев Е. В.</i> Анализ способов повышения несущей способности грунтов основной площадки земляного полотна	Т. 13, 3 (48)	328–336
<i>Богданов Г. И., Рыбина И. И., Антонюк А. А.</i> Расчетно-теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния пролетного строения разводного моста раскрывающейся системы	Т. 13, 2 (47)	121–132
<i>Бороненко Ю. П., Житков Ю. Б.</i> Уточнение силовой характеристики связи кузова вагона с тележками при перевалке на плоских пятниках	Т. 13, 2 (47)	133–145
<i>Бурков А. Т., Мирсаитов М. М.</i> Режимы электротяговой сети при эксплуатации электровозов ВЛ-80 Р И УТУ-1	Т. 13, 2 (47)	146–160
<i>Воронцов В. И.</i> Информационная поддержка персонала, обеспечивающего безопасность движения поездов при помощи экспертных систем	Т. 13, 1 (46)	5–13
<i>Грошев Г. М., Ефименко Ю. И., Сугоровский А. В., Сугоровский Ан. В.</i> Обоснование эффективности диспетчерского регулирования на железнодорожных участках	Т. 13, 4 (49)	478–484
<i>Дудкин Е. П., Коланьков С. В., Султанов Н. Н.</i> Методика технико-экономического обоснования выбора конструкции трамвайных путей	Т. 13, 4 (49)	485–492
<i>Евлевская Н. В., Бекбаев Г. А., Привалов А. А., Шахматов Д. Н.</i> Модуль поддержки принятия решений по управлению информационной безопасностью телекоммуникационной сети единого дорожного диспетчерского центра управления перевозками ОАО «РЖД» на основе рационального выбора организационно-технических мероприятий	Т. 13, 2 (47)	161–171
<i>Ефименко Ю. И., Четчуев М. В., Филиппов А. Г.</i> Особенности расчета эксплуатационных показателей, нелинейно связанных с размерами работы станций	Т. 13, 2 (47)	172–179
<i>Иванов И. А., Кононов Д. П., Урушев С. В., Якушев А. В.</i> Остаточные напряжения в цельнокатаных колесах после упрочняющей обработки	Т. 13, 3 (48)	337–343
<i>Карапетов Э. С., Шестовицкий Д. А.</i> Прогноз срока службы железобетонных мостов на основе модели процесса карбонизации защитного слоя	Т. 13, 1 (46)	14–24
<i>Киселев И. Г., Галов В. В., Комиссаров С. Б.</i> Перспективы модернизации системы электронагрева вязких грузов при сливе из железнодорожных цистерн	Т. 13, 1 (46)	25–30

<i>Кондратов В. В., Петров В. А., Ковалинский С. С.</i> Расчетно-экспериментальные исследования динамического взаимодействия пролетного строения и опор железнодорожного моста	Т. 13, 3 (48)	344–352
<i>Костроминов А. М., Рахманин С. А., Смирнов Б. О., Тюляндин О. Н.</i> Контроль состояния ридер-антенного тракта аппаратуры СБПП в условиях электродепо метрополитена	Т. 13, 2 (47)	180–186
<i>Кузнецова И. О., Ваничева С. С., Фрезе М. В., Долгая А. А., Азаев Т. М., Зайнулабидова Х. Р.</i> Применение фрикционно-подвижных болтовых соединений для обеспечения сейсмостойкости строительных конструкций мостов и других сооружений	Т. 13, 3 (48)	353–360
<i>Маликов О. Б., Курилов Е. Г., Илесалиев Д. И.</i> Некоторые вопросы экономической эффективности перевозки сыпучих грузов в контейнерах	Т. 13, 4 (49)	493–500
<i>Мигров А. А., Кучук В. В., Хрущёв А. С., Орлов С. В.</i> Применение современных программ 3D-моделирования для модернизации подвижного состава железнодорожного транспорта	Т. 13, 2 (47)	187–196
<i>Михайловский П. А.</i> Измерения сопротивления изоляции рельсовых путей	Т. 13, 4 (49)	501–508
<i>Моисеев В. И., Комарова Т. А., Жебанов А. В.</i> Проблема железнодорожных перевозок летних марок дизельного топлива при низких температурах воздуха	Т. 13, 3 (48)	361–369
<i>Мыльников П. Д.</i> Исследование характеристик системы формирования ключей для мобильных объектов железнодорожного транспорта на основе оценивания параметров ММО-канала	Т. 13, 1 (46)	31–39
<i>Нестерова Н. С., Анисимов Вл. А.</i> Сбалансированная система показателей для оценки стратегий развития мультимодальной транспортной сети	Т. 13, 2 (47)	197–205
<i>Никитин А. Б., Болтаев С. Т.</i> Обеспечение безопасности на станционных переездах при организации высокоскоростного движения на действующих линиях	Т. 13, 2 (47)	206–214
<i>Никитин А. Б., Болтаев С. Т., Глыбовский А. М.</i> Особенности реализации функций электрической централизации для высокоскоростных поездов на линиях смешанного движения	Т. 13, 2 (47)	215–228

<i>Никитин А. Б., Грошев В. А.</i> Автоматизация контроля хода технологического процесса станции в режиме реального времени	Т. 13, 2 (47)	229–238
<i>Орлова А. М., Рудакова Е. А., Гусев А. В.</i> Определение механических свойств стали пружин рессорного подвешивания тележек грузовых вагонов	Т. 13, 3 (48)	370–376
<i>Покровская О. Д., Коровяковский Е. К.</i> Терминалистика – организация и управление в транспортных узлах	Т. 13, 4 (49)	509–520
<i>Покровская О. Д., Маликов О. Б.</i> Вопросы логистической иерархии железнодорожных объектов	Т. 13, 4 (49)	521–531
<i>Ромен Ю. С.</i> Принципы разработки взаимоувязанных профилей колеса и рельса	Т. 13, 4 (49)	532–538
<i>Седых Д. В.</i> Идентификация топологий рельсовых цепей в отраслевом формате технической документации на устройства СЦБ	Т. 13, 3 (48)	377–387
<i>Смирнов В. И., Зозуля С. С.</i> Оценка живучести железнодорожных рельсов с внутренними поперечными трещинами	Т. 13, 4 (49)	539–545
<i>Талантова К. В.</i> Структура и свойства сталефибробетона, определяющие заданные эксплуатационные характеристики конструкций на его основе	Т. 13, 4 (49)	546–552
<i>Туранов Х. Т., Гордиенко А. А., Мягкова А. В.</i> Уточненные результаты вычислений времени движения и скорости вагона на втором скоростном участке сортировочной горки при воздействии попутного ветра	Т. 13, 1 (46)	40–49
<i>Федоров И. В., Белгородцев В. А., Расщепкина Д. В., Комиченко С. О., Гетманец Р. М.</i> Метод ускоренной экспериментальной оценки изгибной усталостной прочности зубьев колес и шестерен подвижного состава	Т. 13, 4 (49)	553–560
<i>Чижов С. В., Прокопович В. С., Яхшиев Э. Т.</i> Обоснование надежности конструкции дисперсно-армированного пролетного строения под высокоскоростные железнодорожные магистрали в условиях Республики Узбекистан	Т. 13, 2 (47)	239–246
<i>Чижов С. В., Шестакова Е. Б., Яхшиев Э. Т.</i> Разработка расчетных моделей к определению динамических характеристик железобетонных пролетных строений для высокоскоростных железных дорог Узбекистана	Т. 13, 4 (49)	561–569

<i>Чижев С. В., Яхшиев Э. Т., Дьяченко Л. К.</i> Оценка безопасности мостов с учетом динамического фактора надежности	Т. 13, 2 (47)	247–254
<i>Чусовитин М. С., Малышев К. С.</i> Испытание рельсовой подкладки на деревянной шпале	Т. 13, 3 (48)	388–395
<i>Шматченко В. В., Роенков Д. Н., Плеханов П. А., Иванов В. Г., Яронова Н. В.</i> Влияние отказов и сбоя системы радиосвязи GSM-R на безопасность перевозочного процесса	Т. 13, 4 (49)	570–578
<i>Якушев А. Я., Серeda А. Г.</i> Компьютерное моделирование тягового трансформатора с секционированными вторичными обмотками.	Т. 13, 1 (46)	50–59

Общетехнические задачи и пути их решения

<i>Ватулин Я. С., Коровин С. К., Коровина М. С., Орлов С. В., Потахов Д. А., Потахов Е. А.</i> Безопасное применение мобильных подъемников с рабочими платформами на основе результатов натурных и виртуальных экспериментов	Т. 13, 2 (47)	255–268
<i>Вихарев С. О., Мирончиков Е. Т.</i> Экспериментальная проверка методики построения цифровых водяных знаков, устойчивых к атаке «вырезание»	Т. 13, 3 (48)	396–402
<i>Вихарев С. О., Мирончиков Е. Т., Гофман М. В.</i> Методика построения цифровых водяных знаков, устойчивых к сбоям синхронизации	Т. 13, 1 (46)	667
<i>Гарбарук В. В., Фоменко В. Н.</i> Учет априорной информации о параметрах метода наибольшего правдоподобия	Т. 13, 3 (48)	403–409
<i>Гордон М. А., Василенко М. Н., Седых Д. В., Зуев Д. В.</i> Маскировка ошибок в электронной технической документации и методы их обнаружения	Т. 13, 4 (49)	579–591
<i>Ефанов Д. В.</i> Применение равновесного кода «2 из 4» при организации систем функционального контроля	Т. 13, 2 (47)	269–278
<i>Исхаков Ш. Ш., Ковалев Ф. Е., Косенков Р. Э., Мохнаткин А. П.</i> Проблемы оценивания надежности и безопасности эксплуатируемых сооружений наземной космической инфраструктуры и идентификации их технических состояний	Т. 13, 4 (49)	592–599

<i>Канцибер Ю. А., Пономарев А. Б.</i> Расчеты характеристик поверхностного стока систем водоотведения на жилых и производственных территориях Северо-Запада РФ	Т. 13, 1 (46)	68–74
<i>Кирютина С. Е., Глухих В. Н., Григорьев К. С.</i> Исследование напряженно-деформированного состояния стеновых деревянных конструкций методом конечных элементов	Т. 13, 4 (49)	600–606
<i>Климова Н. В., Грошев Г. М., Котенко А. Г., Романова И. Р.</i> Стабилизация отправления контейнерных блок-поездов по расписанию на станциях примыкания тыловых логистических терминалов в транспортном узле	Т. 13, 3 (48)	410–420
<i>Корниенко А. А., Диасамидзе С. В.</i> Подход к структурированию метрик сложности для выявления дефектов безопасности программного обеспечения	Т. 13, 3 (48)	421–429
<i>Никитин Д. А.</i> Анализ характеристик оптимальных кодов с суммированием, полученных на основе взвешивания разрядов информационных векторов, в системах функционального контроля	Т. 13, 4 (49)	607–616
<i>Никонова Н. В.</i> Особенности задания воздействия и расчета нелинейных систем сейсмоизоляции	Т. 13, 3 (48)	430–438
<i>Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., Дмитриев В. В., Хуан Ц.</i> Оптимальный систематический код на основе взвешивания разрядов информационных векторов и суммирования без переносов для систем функционального контроля	Т. 13, 1 (46)	75–84
<i>Сергеев С. А.</i> Многоканальная нестационарная модель удаленного сервера автоматизированной системы мониторинга искусственных сооружений	Т. 13, 1 (46)	85–92
<i>Соловьева Е. А.</i> Технология очистки сточных вод и обработки осадков при глубоком удалении азота и фосфора из сточных вод	Т. 13, 1 (46)	93–99
<i>Черепанова М. Р.</i> Исследование влияния значения модуля кода с суммированием на структурную избыточность систем функционального контроля	Т. 13, 2 (47)	279–288