НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ, том 15, выпуск 1, 2018

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 публикует научные статьи в областях технические науки (05.00.00): транспорт (05.22.00), информатика, вычислительная техника и управление (05.13.00), строительство и архитектура (05.23.00), радиотехника и связь (05.12.00); науки о Земле (25.00.00)

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
Д. Х. Ибрагимова

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

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 20.03.2018.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать МФУ.
Усл. печ. л. 21,5. Установочный тираж 300 экз.
Заказ 323. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ПГУПС
190031, СПб., Московский пр., 9.

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY, volume 15, issue 1, 2018

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
ПИ N ФС2-7499 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 publishes scientific articles in the fields of Technics (05.00.00): Transport (05.22.00), Informatics, computer engineering and management (05.13.00), Construction and architecture (05.23.00), Radiotechnics and communication (05.12.00); Geoscience (25.00.00)

The Journal has the Peer-review division

The Journal is destributed 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
D. Ibragimova

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, Saarbrucken, 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

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, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Баранов А. Н., Ефимов В. П.

Усталостные испытания литых несущих деталей трехосной тележки модели 18–522 А 5

Белый А. А., Андрушко С. Б.

Пути повышения надежности эксплуатации железобетонных мостов для пропуска сверхнормативной нагрузки 17

Болдырев А. П., Ступин Д. А., Гуров А. М.

Основные тенденции разработки и внедрения новых конструкций поглощающих аппаратов автосцепки грузовых вагонов 30

Волохов Г. М., Князев Д. А., Тимаков М. В.

Моделирование процесса роста трещины в сплошной оси диаметром 190 мм из стали EA4T (EN 13261) 36

Ильичев М. В., Гетманова М. Е., Тюфтяев А. С., Филиппов Г. А., Юсупов Д. И.

Актуальные вопросы повышения эксплуатационной стойкости железнодорожных колес 42

Коровяковский Е. К., Хаджимухаметова М. А.

К вопросу о циркуляции воздуха внутри контейнера при открытом люке под определенным углом при модификации контейнеров для перевозки скоропортящихся грузов 47

Кротов С. В., Кононов Д. П.

Контактно-усталостная долговечность рельсовой и колесной сталей 54

Мирахмедов М. М., Досметов С. К.

Вопросы применения международных стандартов ФИДИК в железнодорожных инвестиционно-строительных проектах 62

Орлова А. М., Рудакова Е. А., Гусев А. В.

Совершенствование рессорного подвешивания грузовых вагонов с учетом необходимости снижения воздействия на путь 72

Петуховский С. В.

Расчет кривизны рельсовой нити по стрелам несимметричной измерительной хорды 82

Тепикин В. А., Котенко А. Г., Ролле И. А.

Совершенствование способов расформирования составов с вагонами, запрещенными к роспуску 90

Якушев А. В., Фомин С. А., Гомонец Ю. В.

Изменение величины электрического сопротивления колесных пар вагонов метро с увеличением срока эксплуатации 100

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

Канаев А. К., Логин Э. В.

Модель функционирования системы управления транспортной сетью Carrier Ethernet 108

Никитин А. Б., Кушпиль И. В.

Метод расчета стоимости жизненного цикла систем железнодорожной автоматики и телемеханики 117

Худоногов А. М., Иванов П. Ю., Мануилов Н. И., Дульский Е. Ю.

Интеллектуальная система диагностики тормозной сети поезда 130

→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Агунов А. В., Соколов Д. А.

Компьютерное моделирование и анализ работы устройств автоматики систем электроснабжения железных дорог 136

Герасименко П. В., Благовещенская Е. А., Яковлев В. В., Вертешев С. М.

Моделирование рисков, возникающих при транспортных операциях 141

Корниенко А. А., Бирюков Д. Н., Глухарев М. Л., Глухов А. П., Диасамидзе С. В.

Модель онтологического представления процессов и метод синтеза спецификаций для интеллектуальной системы риск-ориентированного упреждающего управления информационной безопасностью 152

Привалов А. А., Карабанов Ю. С., Кравцов А. О., Сидоров С. И.

Математическая модель XSS-атаки 161

УДК 62-192.629.11.011

А. Н. Баранов, В. П. Ефимов

УСТАЛОСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЛИТЫХ НЕСУЩИХ ДЕТАЛЕЙ ТРЕХОСНОЙ ТЕЛЕЖКИ МОДЕЛИ 18–522 А

Дата поступления: 29.12.2017
Решение о публикации: 21.01.2018

Аннотация

Цель: Экспериментальное определение характеристик сопротивления усталости натурных литых несущих деталей, ответственных за безопасность движения. **Методы:** Применены методы экспериментальных исследований усталостной прочности по разработанной методике и проведены углубленные металлографические исследования зон усталостных разрушений литых несущих деталей. **Результаты:** Получены статистические характеристики сопротивления усталости рам боковых и балок надрессорных трехосной тележки, оценена их несущая способность, которые позволяют обеспечить повышение ресурса в эксплуатации. **Практическая значимость:** Определенные в результате испытаний характеристики усталостной прочности использованы для разработки перспективных конструкций литых несущих деталей трехосных тележек и прогнозирования их эксплуатационного ресурса. Результаты исследований применены для разработки стандарта на литые несущие детали трехосных тележек.

Ключевые слова: Грузовая трехосная тележка, литые несущие детали, усталостная прочность, методика испытаний, повышение эксплуатационного ресурса.

Baranov A. N., Director General, 460135@mail.ru (Co Ltd Ural carriage engineering design bureau); ***Efimov V. P.**, Cand. Eng. Sci., leading research associate, uiz123456@mail.ru (Ural Department of All-Ural Scientific Research Railway Transport Institute, Joint-stock Company) FATIGUE TESTING OF MOLDED CARRIER PIECES OF THREE-AXLE BOGIE MODEL 18-522A

Summary

Objective: Experimental determination of resistance characteristics of natural molded carrier pieces fatigue responsible for motion safety. **Methods:** Experimental investigation methods of fatigue stability by developed procedure are applied and thorough metallographic investigation of fatigue resolution zones of molded carrier pieces are performed. **Results:** Statistical resistance characteristics of solebar and bolster fatigue of three-axle bogie are obtained, their bearing capacity is estimated which allows providing resource increase in operating. **Practical importance:** Characteristics of fatigue stability determined as a result of investigation are used for developing perspective constructions of molded carrier pieces of three-axle bogies and forecasting their operation resource. The results of investigation are applied for developing a standard for molded carrier pieces of three-axle bogies.

Keywords: Freight three-axle bogie, molded carrier pieces, fatigue stability, testing procedure, operating resource increase.

Постоянный рост грузооборота на сети железнодорожных дорог РФ, обусловленный увеличением нагрузок на ось, скоростей движения и веса поездов, требует неуклонного повышения эксплуатационной надежности несущих литых деталей ходовых систем вагонов, ответственных за безопасность движения. В последнее время увеличивается спрос на трехосные грузовые тележки. Литые несущие детали (балка надрессорная и рама боковая) данных тележек имеют ограниченный срок службы. Исследования усталостной прочности не проводились. Нормативная база по трехосным тележкам не развивалась, упор был сделан на двухосные трехэлементные грузовые тележки [1, 2].

Грузоподъемность новых шестиосных грузовых вагонов с осевой нагрузкой 25 тс (245 кН), в сравнении с эксплуатируемыми в настоящее время четырехосными вагонами, будет увеличена на 62–68 % до 110 т, а вместимость – на 58–62 %. Несмотря на это, грузовые вагоны на трехосных тележках можно эксплуатировать на всей сети российских железных дорог, для чего необходимо обеспечить достаточную усталостную прочность и ресурс их ходовых систем. Применение новых моделей грузовых вагонов на трехосных тележках позволяет, с одной стороны, меньшим количеством вагонов перевозить общий объем груза, а с другой – снизить потенциальную нагрузку на инфраструктуру железных дорог.

Литые несущие детали трехосной тележки относятся к наиболее ответственным узлам, от работоспособности которых зависят безопасность движения поездов и безаварийность эксплуатации. Усталостное разрушение боковой рамы или балки надрессорной в эксплуатации, согласно ГОСТ 32192–2013 [3], относится к наиболее опасному отказу на сети железных дорог. Существующие методы неразрушающего контроля данных деталей в производстве по ГОСТ 32699–2014 [4] не обеспечивают высокой степени безопасной эксплуатации и требуют постоянного совершенствования и углубленных металлографических исследований.

АО «Научно-производственная корпорация “Уралвагонзавод”», согласно требованиям ГОСТ 15.309–98 [5], провел конструктивно-технологическую оптимизацию литых несущих деталей трехосной тележки 18-522А с нагрузкой на ось 22 тс (216 кН) с целью повышения их гарантийного срока службы до 22 лет при эксплуатации на магистральных железных дорогах колеи 1520 мм.

Для экспериментального подтверждения показателей надежности литых несущих деталей трехосной тележки и подтверждения соответствия разработанному сертификационному базису [6] проведены их полные ускоренные испытания на усталость.

Усталостные испытания рамы боковой и балки надрессорной трехосной тележки осуществлялись по разработанной методике [7] с учетом положений методики [8] с целью проверки сопротивления усталости рам боковых и балок надрессорных и включали:

– определение статистических параметров характеристик выносливости;

– определение предела выносливости;

– расчет коэффициента запаса сопротивления усталости;

– определение зависимости между амплитудным значением циклической нагрузки и числом циклов до разрушения.

Схема нагружения боковой рамы приведена на рис. 1, общий вид испытаний – на рис. 2. Боковую раму в зоне проема для установки колесной пары и консольную часть в зоне опирания на балансир колесной пары через переходники устанавливают на две цилиндрические опоры, допускающие поворот вокруг бокового направления. Расстояние между цилиндрическими опорами должно соответствовать расстоянию между центром проема для установки колесной пары и центром консольной части в зоне опирания на балансир. Вертикальная сила прикладывается на опорную поверхность боковой рамы для установки рессорного подвешивания. Приспособление в зоне опорной поверхности для рессорного подвешивания обеспечивает равномерное распределение сил реакции по

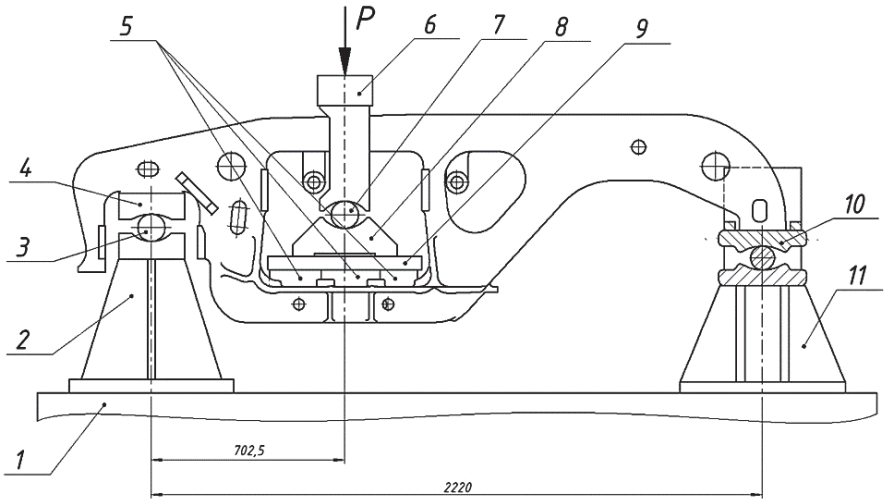


Рис. 1. Схема нагружения боковой рамы:
1 – стол испытательного стенда; *2*, *11* – нижняя опорная плита; *3*, *7* – цилиндр; *4*, *10* – верхняя опорная плита; *5* – сегменты; *6* – П-образное приспособление; *8* – опорная плита; *9* – промежуточная плита (размеры указаны в мм)

Рис. 2. Общий вид усталостных испытаний боковой рамы трехосной тележки модели 18-522А

местам опирания (проектное распределение нагрузки) упругих элементов.

Боковая рама тележки несимметричной конструкции в средней части имеет проем для размещения рессорного комплекта и надрессорной балки. На нижнем поясе проема отлиты бонки и ребра, фиксирующие пружины рессорного комплекта, а для установки фрикционного гасителя колебаний предусмотрено углубление. На одном конце рамы выполнен проем для буксового узла, а на другом – удлиненная часть (хобот) для опоры на противоположное плечо балансира средней колесной пары. Боковые рамы, шарнирно соединенные посредством балансиров, опираются на буксы крайних колесных пар непосредственно, а на буксы средней колесной пары – через балансиры.

Схема нагружения надрессорной балки тележки при проведении усталостных испытаний приведена на рис. 3, общий вид испытаний – на рис. 4. Надрессорную балку в зонах опорных поверхностей для рессорного подвешивания через приспособление устанавливают на две цилиндрические опоры, допускающие поворот вокруг продольного направления. С одной стороны рекомендуется применять сферическую опору, допускающую поворот вокруг продольного и бокового направления. Расстояние между цилиндрическими опорами

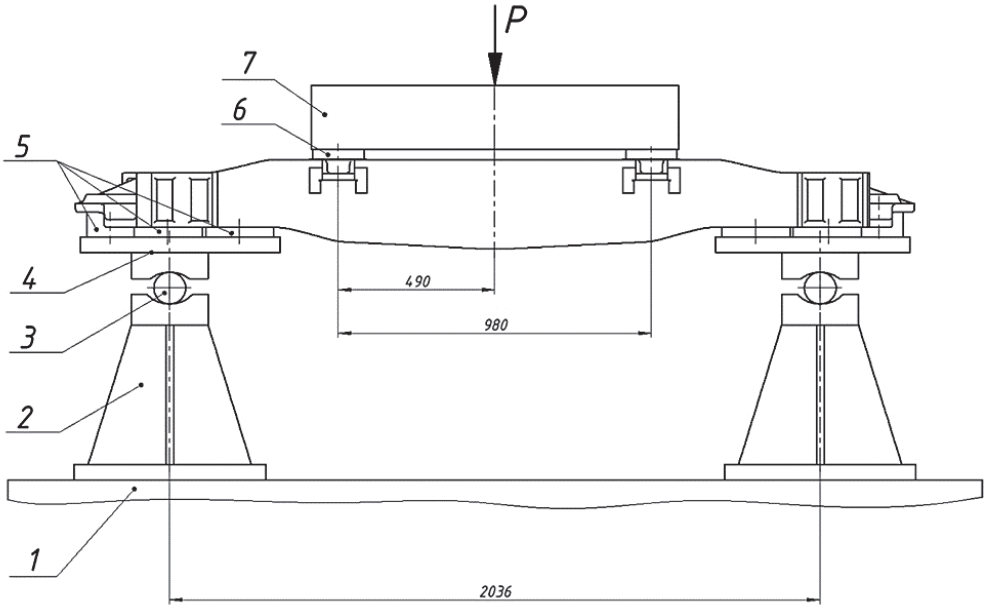


Рис. 3. Схема нагружения надрессорной балки: *1* – стол испытательного стенда; *2* – нижняя опорная плита; *3* – цилиндр; *4* – верхняя опорная плита; *5*, *6* – сегменты; *7* – брус (размеры указаны в мм)

Рис. 4. Общий вид усталостных испытаний надрессорной балки трехосной тележки модели 18-522А

должно соответствовать расстоянию между осями рессорного подвешивания, указанному в конструкторской документации. Силу прикладывают к опорным поверхностям надрессорной балки в местах опирания шкворневой балки. Приспособление в зонах опорных поверхностей для рессорного подвешивания и в зонах опорных поверхностей для шкворневой балки обеспечивает равномерное распределение сил реакции по местам опирания (проектное распределение нагрузки) на упругие элементы и по местам опирания шкворневой балки.

Надрессорная балка тележки литая, коробчатого сечения, в форме бруса равного сопротивления изгибу.

На одной вертикальной стенке расположены направляющие выступы для челюстей шкворневой балки, а на другой – кронштейны с отверстиями для болтов соединения надрессорных и шкворневых балок. Надрессорные балки и боковые рамы изготавливаются из низколегированной стали 20 ГЛ в соответствии с требованиями ГОСТ 32400–2013 [2] и УВЗ-50-13–78 ДТ [9].

Усталостным испытаниям подвергнуто 9 балок надрессорных (черт. 522.00.004-2) и 9 рам боковых (черт. 522.00.001-6; черт. 522.00.002-6) трехосной тележки модели 18-522А, которые отобраны методом отбора «вслепую» по ГОСТ 18321–73 [10] из имеющейся совокупности данной продукции после ее приемки ОТК завода и инспектором-приемщиком ЦТА ОАО «РЖД» на заводе-изготовителе (АО «Научно-производственная корпорация “Уралвагонзавод”»).

Испытания проведены при постоянной средней нагрузке цикла для балки надрессорной P_m = 343 кН и рамы боковой P_m = 294 кН. Амплитудные значения силы при проведении усталостных испытаний назначались:

– для балки надрессорной P_a = 20 тс (196 кН) – 27 тс (264 кН);

– для рамы боковой P_a=17 тс (166 кН) – 25 тс (245 кН).

Детали испытывались при знакопостоянном асимметричном цикле нагружения до разрушения или достижения базового числа циклов $N_0 = 10^7$.

Испытания проведены на испытательных машинах с гидравлическим силовозбуждением (см. рис. 2 и 4). Режимы циклических нагружений деталей контролировались по штатным силоизмерительным устройствам испытательных машин, погрешность измерения ±2 %. Кроме того, действующие динамические силы контролировались с использованием тензорезисторов, установленных на нижнем поясе боковой рамы и балки надрессорной.

Экспериментальные данные, полученные в результате проведенных усталостных испытаний балок надрессорных и рам боковых, подвергались вероятностно-статистической обработке по методике [7, 8]. Основные статистические характеристики показателей выносливости деталей приведены в таблице. Кривые усталости рамы боковой и балки надрессорной тележки модели 18-522А иллюстрирует рис. 5. Они построены при вероятности неразрушения деталей 0,5 и 0,95. Амплитудные значения пределов выносливости деталей при различной вероятности неразрушения указаны в таблице.

Характер и зоны усталостных разрушений рамы боковой в стендовых условиях показаны на рис. 6. Разрушения происходили по нижнему углу опорной площадки рессорного комплекта, а также в зоне перехода на наклонный пояс.

Характер и зоны усталостных разрушений балки надрессорной в стендовых условиях показаны на рис. 7. Разрушения происходили по центру надрессорной балки в зоне нижнего пояса, по наклонной части нижнего пояса и по нижнему поясу в районе технологического отверстия.

Микроструктуру стали боковой рамы определяли на шлифе, изготовленном из тела отливки вблизи очага зарождения усталостной трещины, исследовали на оптическом микроскопе при увеличениях ×100 и ×500. Микроструктура стали боковой рамы феррито-перлитная, мелкозернистая (балл зерна 8 ГОСТ 5639–82 [11]), с выделениями

Основные статистические характеристики показателей выносливости балок надрессорных, рам боковых и результаты корреляционного анализа

Показатель	Обозначение	Величина	
		для балки надрессорной	для рамы боковой
Среднеквадратичное отклонение логарифма амплитуд нагрузки	$S\lg P_a$	0,051	0,067
Среднеквадратичное отклонение логарифма долговечности деталей	$S\lg N$	0,256	0,293
Коэффициент линейной корреляции экспериментальных данных	ρ	–0,89	–0,69
Мера индивидуального рассеивания частных пределов ограниченной выносливости относительно линии регрессии	$S^*\lg P_a$	0,023	0,048
Значение показателя степени в уравнении кривой усталости	m	–5,59	–5,37
Значение предела выносливости на базе 10^7 циклов при вероятности неразрушения деталей 0,5	$(P_{a,N})_{0,5}$	18,57	17,30
Минимальное значение предела выносливости на базе 10^7 циклов при вероятности неразрушения деталей 0,95	$(P_{a,N})_{\min}$	16,09	12,90
Коэффициент запаса усталостной прочности	n	1,637	1,836

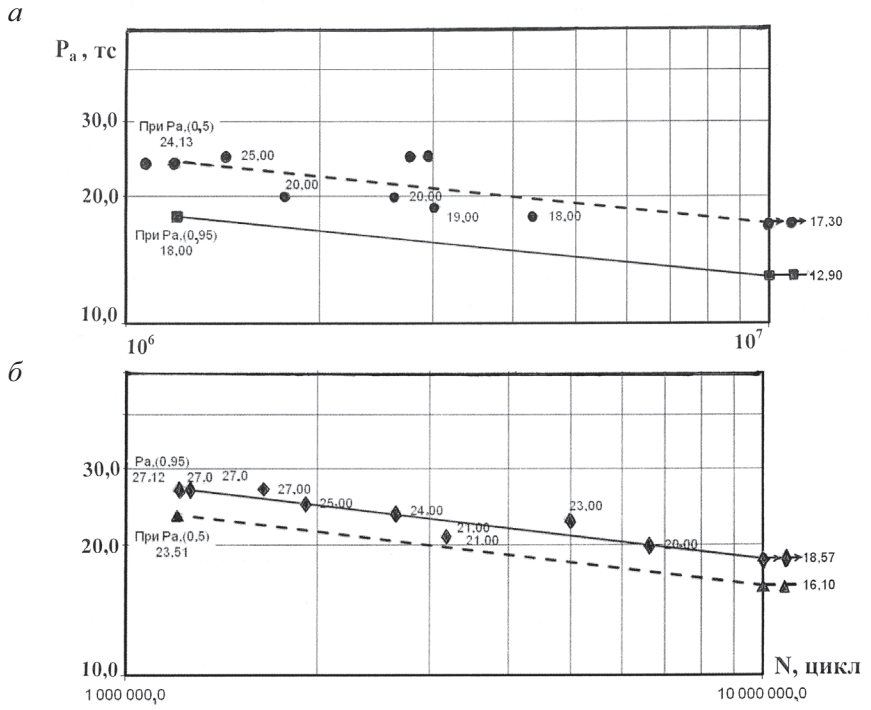


Рис. 5. Кривые усталости рам боковых (*а* - - - – вероятность неразрушения 0,5; —— – вероятность неразрушения 0,95) и балок надрессорных (*б* - - - – вероятность неразрушения 0,5; —— – вероятность неразрушения 0,95) трехосной тележки модели 18-522А

а *б*

Рис. 6. Характер усталостного разрушения боковой рамы: *а* – по нижнему углу опорной площадки рессорного проема; *б* – по опорной площадке рессорного проема

а *б*

Рис. 7. Характер усталостного разрушения надрессорной балки трехосной тележки в стендовых условиях: *а* – по наклонной части нижнего пояса; *б* – по нижнему поясу в районе технологического отверстия

перлита в виде слабовыраженной сетки по границам зерен первичного аустенита (рис. 8).

Фактические значения показателей вида излома, механических свойств из металла деталей и литейных дефектов деталей соответствуют требованиям ГОСТ 32400–2013 [2].

Детальные исследования зоны поверхности разрушения боковой рамы показывают наличие на поверхности разрушения участков, которые содержат скопления неметаллических включений сферообразной формы, размер которых находится в диапазоне 1–2 мкм (рис. 9). Микрорентгено-спектральный анализ (рис. 10) показывает, что основными составляющими этих включений являются алюминий, кислород, марганец и сера, т. е. оксиды алюминия и сложные включения, состоящие из оксида алюминия и сульфида марганца.

Коэффициент запаса усталостной прочности определяли по методике [7, 8] и при помощи параметров построенных кривых усталости рамы боковой и балки надрессорной (см. рис. 5, таблицу).

а *б*

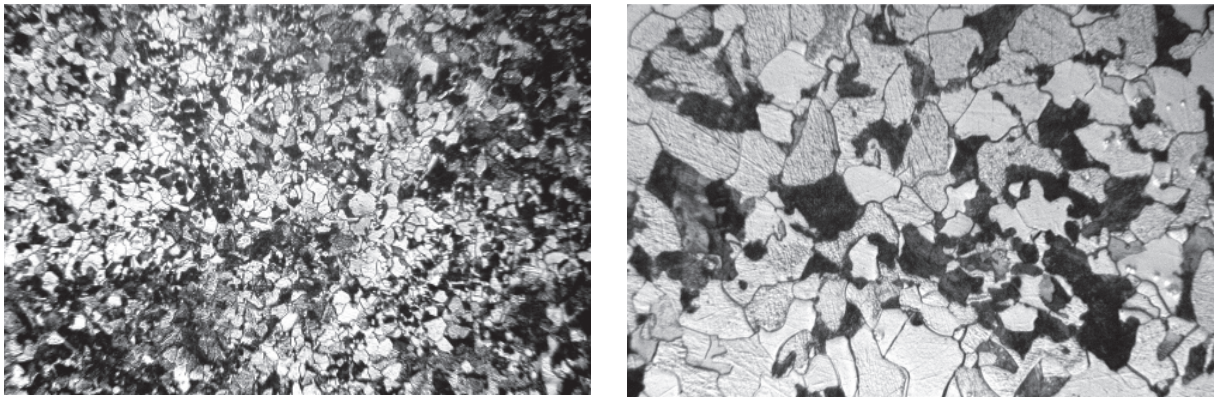


Рис. 8. Микроструктура основного металла боковой рамы трехосной тележки:
а – увеличение ×100; *б* – увеличение ×500

а *б*

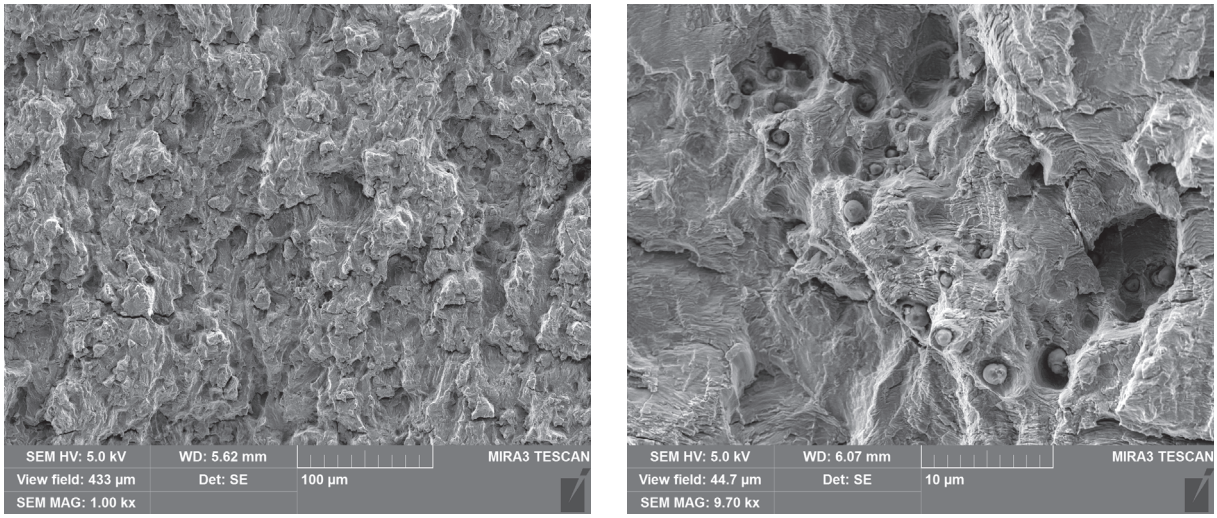


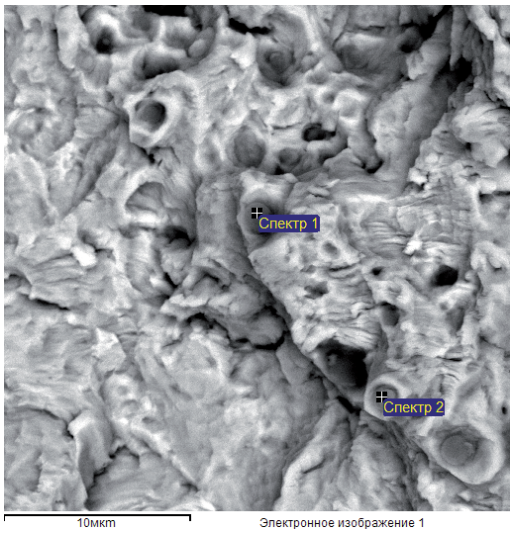
Рис. 9. Микрорельеф поверхности усталостного разрушения:
а – увеличение ×1000; *б* – увеличение ×9700

Допускаемое значение коэффициента запаса для балки надрессорной и рамы боковой, согласно «Сертификационного базиса…» [6], установлено $[n] = 1{,}489$. Полученный по результатам проведенных усталостных испытаний коэффициент запаса $n = 1{,}627 > [n]$, что говорит о достаточной усталостной прочности балки надрессорной трехосной тележки модели 18-522А.

Для рамы боковой определенный по результатам усталостных испытаний коэффициент запаса усталостной прочности $n = 1{,}836 > [n]$, согласно [6]. Полученный экспериментально коэффициент запаса усталостной прочности рамы боковой также превышает нормативное значение данного коэффициента, установленное «Нормами…» [12] и ГОСТ 33211–2014 [13], что говорит о достаточной усталостной прочности детали при ее эксплуатации в пределах назначенного срока службы – 22 года.

По результатам полных ускоренных испытаний на усталость литых деталей тележки модели 18-522А рассчитан гамма-процентный ресурс (срок службы) согласно «Нормам…» [12] и требованиям ГОСТ 33211–2014 [13]. При известном стандарте текущих значений динамических эксплуатационных сил и узкополосном нормальном процессе динамическо-

а



б

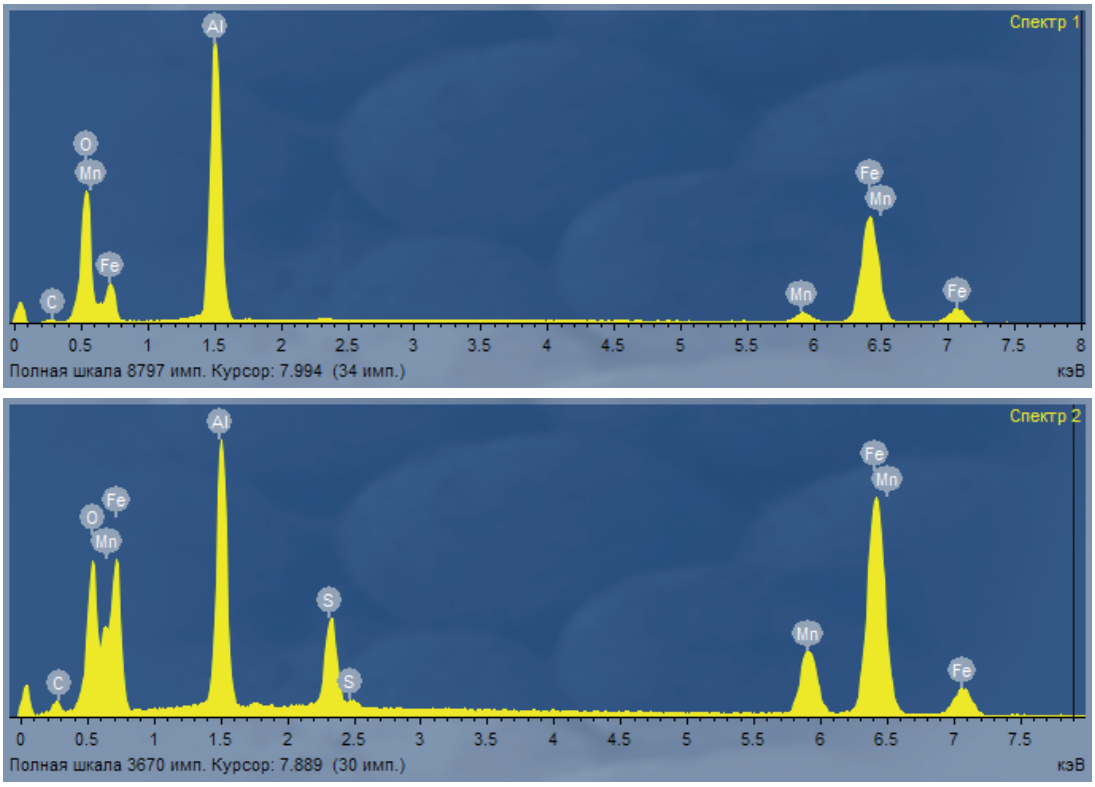


Рис. 10. Неметаллические включения на поверхности усталостного разрушения (*а*) и их элементный состав (*б*)

го нагружения срок службы литых несущих деталей определяется по формуле

$$T_{\text{К}} = \frac{\left(\dfrac{P_{a,N}}{[n]}\right)^m \cdot N_0}{A \cdot B \cdot f_{\text{э}} \cdot K_{\text{И}} \cdot (1 - K_{\text{П}}) \cdot \sum\limits_{k=1}^{p} K_{\text{уч}k} \cdot \sum\limits_{j=1}^{q} S_{P_{aj}}^m \cdot P_{vj}},$$

где $P_{a,N}$ – предел выносливости по амплитуде силы натурной детали (рамы или балки) при установившемся режиме нагружения на базе испытаний $N_0 = 10^7$, кН; P_{ai} – уровень (разряд) амплитуды динамических сил, кН; P_{Pi} – частость (вероятность) появления амплитуд сил с уровнем P_{ai} в j-м интервале скоростей дви-

жения вагона; $S_{P_{a\,j}}$ – среднее квадратичное отклонение текущих значений амплитуд динамических сил в j-м интервале скоростей движения вагона, кН; r – принятое число разрядов амплитуд сил в j-м интервале скоростей движения вагона; $[n]$ – допускаемый коэффициент запаса сопротивления усталости натурных деталей (принимаем по результатам проведенных полных усталостных испытаний рамы боковой и балки надрессорной); m – показатель степени в уравнении кривой усталости, в амплитудах; $N_0 = 10^7$ – базовое число циклов для литых деталей трехосных тележек грузовых вагонов; A – функция показателя m кривой усталости: $A = 2^{\frac{m}{2}}\Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right)$, здесь $\Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right)$ – гамма-функция (значения функции $\sqrt[m]{A}$ принимаются по табл. 3.4 «Норм…» [12]); B – коэффициент перевода календарного расчетного срока службы детали в годах во время непрерывного движения, с/год; $f_э$ – центральная (эффективная) частота процесса изменения динамических напряжений, Гц; $K_И$ – коэффициент использования грузоподъемности вагона (для несущих элементов тележек грузовых вагонов принимаем $K_И = 0{,}9$); $K_П$ – коэффициент порожнего пробега вагона (средние значения $K_П$ для основных типов грузовых вагонов рекомендуется принимать по «Нормам…» [12]); $K_{уч k}$ – средняя доля протяженности характерных участков пути ($k = 1$ – прямые участки пути, $k = 2$ – кривые больших радиусов, $k = 3$ – кривые малых радиусов) в общей длине железнодорожных линий, по которым эксплуатируется вагон на трехосных тележках, для сети магистральных железных дорог рекомендуется принимать $K_{уч1} = 0{,}65$ – доля прямых участков пути, $K_{уч2} = 0{,}20$ – доля кривых больших радиусов, $K_{уч3} = 0{,}15$ – доля кривых малых радиусов; P_{vj} – доля времени (вероятность), приходящаяся на эксплуатацию в j-м интервале скоростей движения вагона (вероятность P_{vj} для грузовых вагонов принимаем по табл. 6 ГОСТ 33211–2914 [13]).

Гамма-процентный ресурс рамы или балки в единицах пробега L_K, км, определяется по формуле

$$L_K = T_K \cdot L_1,$$

в которой L_1 – расчетное среднее значение пробега вагона за год эксплуатации, км/год.

Расчетное среднее значение пробега вагона за год эксплуатации L_1, км/год, рассчитывается так:

$$L_1 = 365 \cdot \overline{z}_C,$$

где $\overline{z}_C$ – расчетный среднесуточный пробег груженого вагона, км/сут. (принимают, что $\overline{z}_C = 210$ км/сут).

Коэффициент перевода календарного расчетного срока службы детали в годах во время непрерывного движения в секундах B (с/год) находится следующим образом:

$$B = 365 \cdot \frac{10^3 \cdot \overline{z}_C}{\overline{V}},$$

здесь $\overline{V}$ – средняя техническая скорость движения вагона, м/с (по табл. 12 ГОСТ 33211–2014 [13]).

Полученные значения составляют $T_{к(балка)} = 64{,}221$ года, $T_{к(рама)} = 87{,}008$ года, что превышает прогнозируемый назначенный календарный срок службы – 22 года (балки надрессорной и рамы боковой соответственно), а также свидетельствует о наличии резервов по эксплуатационной долговечности данных, ответственных за безопасность движения, деталей.

В результате проведенных исследований пришли к следующему заключению:

1) благодаря полным усталостным испытаниям рам боковых и балок надрессорных трехосной тележки модели 18-522А, получены статистические параметры кривых усталости и экспериментальные значения пределов выносливости деталей при различной вероятности их разрушения;

2) установлено, что литые детали «Рама боковая правая» (черт. 522.00.001-6), «Рама

боковая левая» (черт. 522.00.002-6), «Балка надрессорная» (черт. 522.00.004-0) соответствуют требованиям ГОСТ 32400–2013, пп. 4.1.1.3 (коэффициент запаса сопротивления усталости (с учетом «Сертификационного базиса…»));

3) испытания по определению механических свойств, микроструктуры и литейных дефектов литых деталей тележек модели 18-522А подтвердили соответствие деталей требованиям ГОСТ 32400–2013;

4) определены экспериментальные значения коэффициентов запаса усталостной прочности натурных деталей, выполнены расчеты их срока службы, что позволяет обоснованно назначить для ответственных за безопасность литых несущих деталей повышенный до 22 лет срок службы при их эксплуатации в трехосных тележках модели 18-522А на магистральных железных дорогах колеи 1520 мм.

Библиографический список

1. ГОСТ 9246–2013. Тележки двухосные грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 2013.

2. ГОСТ 32400–2013. Рама боковая и балка надрессорная литые тележек железнодорожных грузовых вагонов. Технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 2013.

3. ГОСТ 32192–2013. Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 2013.

4. ГОСТ 32699–2014. Рама боковая и балка надрессорная литые трехэлементных двухосных тележек грузовых вагонов железных дорог колеи 1520 мм. Методы неразрушающего контроля. – М. : Изд-во стандартов, 2014.

5. ГОСТ 15.309–98. Система разработки и постановки продукции на производство. Испытания и приемка выпускаемой продукции. Основные положения. – М. : Изд-во стандартов, 1998.

6. СБ ЖТ ТР ТС 001-004/21429/21430 от 19.08.2016 г. Сертификационный базис для подтверждения соответствия рамы боковой правой, рамы боковой левой, балки надрессорной тележки трехосной модели 18-522А, изготавливаемых АО «Научно-производственная корпорация “Уралвагонзавод”». – М., 2016.

7. Надрессорные балки и боковые рамы литые трехосных вагонных тележек грузовых вагонов колеи 1520 мм. Методики испытаний на усталость. – Нижний Тагил : ООО «УКБВ» ; Екатеринбург : УО АО «ВНИИЖТ», 2016. – 21 с.

8. Надрессорные балки и боковые рамы литые двухосных тележек грузовых вагонов колеи 1520 мм. Методики испытаний на усталость. – М. : ОАО «ВНИИЖТ» ; ОАО «НИИ вагоностроения», 2010. – 14 с.

9. УВЗ-50-13–78 ДТ. Детали литые трехосных тележек. Технические требования. – Утв. ООО «УКБВ» 20.07.2015 г.

10. ГОСТ 18321–73. Статистический контроль качества. Методы случайного отбора выборок штучной продукции. – М. : Изд-во стандартов, 1973.

11. ГОСТ 5639–82. Стали и сплавы. Методы выявления и определение величины зерна. – М. : Изд-во стандартов, 1982.

12. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных).– М. : ГосНИИВ ; ВНИИЖТ, 1996. – 317 с.

13. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – М. : Изд-во стандартов, 2014.

References

1. SSS [State Standard Specification] 9246–2013. *Telezhki dvukhosnye gruzovykh vagonov magistralnykh zheleznykh dorog kolei 1520 mm. Tekhnicheskie usloviya* [*Freight car Two-axle bogies of trunk railway lines of 1520 mm track. Technical Requisites*]. Moscow, Standard Publishing House, 2013. (In Russian).

2. SSS [State Standard Specification] 32400–2013. *Rama bokovaya i balka nadressornaya litye telezhek zheleznykhno-dorozhnykh gruzovykh vagonov. Tekhnicheskie usloviya* [*Molded Solebar and Bolster of Railway Freight Car Bogies. Technical Requisites*]. Moscow, Standard Publishing House, 2013. (In Russian).

3. SSS [State Standard Specification] 32192–2013. *Nadezhnost v zheleznykhno-dorozhnoi tekhnike. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya* [*Reliability in Railway Engineering. Principal Concepts. Terms and Definitions*]. Moscow, Standard Publishing House, 2013. (In Russian).

4. SSS [State Standard Specification] 32699–2014. *Rama bokovaya i balka nadressornaya litye trekhelementnykh dvukhosnykh telezhek gruzovykh vagonov zheleznykh dorog kolei 1520 mm. Metody nerazrushayutschego kontrolya* [*Molded Solebar and Bolster of Three-element Two-axle Bogies of 1520 mm Track Railway Lines Freight Cars. Methods of Nondestructive Check*]. Moscow, Standard Publishing House, 2014. (In Russian).

5. SSS [State Standard Specification] 15.309–98. *Sistema razrabotki i postanovki produktsii na proizvodstvo. Ispytaniya i priemki vypuskaemoi produktsii. Osnovnye polozheniya* [*System of Developing and Setting Production to Implementation. Testing and Acceptance of Output Production. Principal Statements*]. Moscow, Standard Publishing House, 1998. (In Russian).

6. SB ZhT TR TC 001-004/21429/21430 of 19.08.2016. *Sertifikatsionnyi basis dlya podtverzhdeniya sootvetstviya ramy bokovoi pravoi, ramy bokovoi levoi, balki nadressornoi telezhki trekhosnoi modeli 18-522A, izgotavlivaemykh AO Nauchno-proizvodstvennaya korporatsiya Uralvagonzavod* [*Certification Basis for Affirming Conformity of Solebar Right-hand and Solebar left-hand of Bogie Bolster of 18-522A Three-axle Model produced by Ural Car Plant, Scientific-manufacturing Corporation*]. Moscow, 2016. (In Russian).

7. *Nadressornoi balki i bokovoi ramy litye trekhosnykh vagonnykh telezhek gruzovykh vagonov kolei 1520 mm. Metodiki ispytanii na ustalost* [*Molded Bolsters and Solebars of Three-axle Car Bogies of 1520 mm Track Freight Cars. Fatigue Testing Procedure*]. Nizhniy Tagil, OOO "UKBV" [Co Ltd Ural Design Car Engineering Bureau] Publ., [Co Ltd], Ekaterinburg, УО АО «VNIIZhT». [Ural Department of All-Ural Scientific-research Railway Transport Institute, Joint-stock Company] Publ., 2016, 21 p. (In Russian).

8. *Nadressornye balki i bokovye ramy litye dvukhosnykh telezhek gruzovykh vagonov kolei 1520 mm. Metodiki ispytanii na ustalost* [*Molded Bolsters and Solebars of Two-axle Car Bogies of 1520mm Track Freight Cars. Fatigue Testing Procedure*]. Moscow, OAO "VNIIZhT" [All-Ural Scientific-research Railway Transport Institute, Public Corporation] – OAO "Nii vagonostroeniya" Publ. [Scientific-research carriage engineering Institute, Public Corporation], 2010, 14 p. (In Russian).

9. UVZ-50-13–78 DT *Detali litye trekhosnykh telezhek. Tekhnicheskie trebovaniya* [*Molded Pieces of Three-axle Bogies. Technical specifications*]. Confirmed by OOO "UKBV" [Ural Car Engineering Design Bureau], 20.07.2015. (In Russian)

10. SSS [State Standard Specification] 18321–73. *Statisticheskiy control kachestva. Metody sluchainogo otbora vyborok shtuchnoi produktsii* [*Statistical Quality Checking. Methods of Random Sample Selection of Piece Production*]. Moscow, Standard Publishing House, 1973. (In Russian).

11. SSS [State Standard Specification] 5639–82. *Stali I splavy. Metody vyyavleniya i opredeleniya velichiny zerna* [*Steel and alloys. Methods of detection and determination of grain size*]. Moscow, Standard Publishing House, 1982. (In Russian).

12. *Normy dlya rascheta i proektirovaniya novykh i moderniziruemykh vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)* [*Standards for Calculation and Projection of New and Modernised Cars of MPS 1520 mm Track Railways*]. Moscow, GosNIIV [State Scientific-research Car Building Institute] Publ., "VNIIZhT" [All-Ural Scientific-research Railway Transport Institute] Publ., 1996, 317 p. (In Russian).

13. SSS [State Standard Specification]. *Vagony gruzovye. Trebovaniya k Prochnosti i Dinamicheskim Kachestvam* [*Freight Cars. Requirements to Strength and Dynamic Qualities*]. Moscow, Standard Publishing House, 2014. (In Russian).

БАРАНОВ Александр Николаевич – генеральный директор, 460135@mail.ru (ООО «Уральское конструкторское бюро вагоностроения»); *ЕФИМОВ Виктор Петрович – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, uiz123456@mail.ru (Уральское отделение АО «ВНИИЖТ»).

УДК 624.21/.8

А. А. Белый, С. Б. Андрушко

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВ ДЛЯ ПРОПУСКА СВЕРХНОРМАТИВНОЙ НАГРУЗКИ

Дата поступления: 08.11.2017
Решение о публикации: 21.11.2017

Цель: Освещение существующих подходов к оценке надежности эксплуатируемых мостов с выработкой теоретических и практических мер по ее повышению. **Методы:** Анализ имеющихся методов оценки надежности на стадиях проектирования и эксплуатации. Обзор имеющихся теоретических и прикладных инструментов, направленных на сохранение и повышение уровня надежности. Учет действующих нормативных и регламентных документов, а также мирового опыта в данной сфере. Системный подход к решению сформулированной цели, выражающийся в подготовке обоснованных решений, базирующихся на интегральных принципах функционирования предлагаемых мер. **Результаты:** Выполнен обзор существующих подходов к оценке надежности на различных этапах жизненного цикла: проектирования и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры. В связи с доминированием в парке искусственных сооружений железобетонных мостов анализ мер по повышению уровня надежности выполнен именно на них. Исследования по величине нагрузок приведены для автомобильных, железнодорожных и специальных транспортных средств. Подготовлены теоретические и практические предложения по повышению уровня надежности, заключающиеся в оценке, прогнозировании и совместном (интегральном) взаимодействии и учете между собой. **Практическая значимость:** Изложены мероприятия по повышению уровня надежности, такие как использование теории вероятности, современные стратегии содержания, инструменты менеджмента рисков, методы достоверной оценки технического состояния, система мониторинга инженерных конструкций. Во главу исследований были поставлены интегральный подход к предложенным решениям. С практической точки зрения данные мероприятия позволят в будущем обеспечить и поддерживать заданные нормативные (проектные) уровни надежности, безопасности и долговечности мостовых сооружений.

Ключевые слвоа: Надежность, железобетон, мост, индекс безопасности, менеджмент рисков, мониторинг инженерных конструкций.

***Andrei A. Belyi**, Cand. Eng. Sci., associate professor, andbeliy@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University); **Sergei B. Andrushko**, Cand. Eng. Sci., associate professor, head of chair, sb_and@mail.ru (General Khrulev Military academy of logistics) RELIABILITY INCREASE TECHNIQUES OF OPERATING REINFORCED CONCRETE BRIDGES FOR EXCESSIVE LOADING TRANSFER

Summary

Objective: Publication of existing approaches to evaluating operated bridges reliability with developing theoretical and practical measures for its increase. **Methods:** The analysis of available evaluation methods of reliability at design and maintenance stages. The review of available theoretical and application-oriented tools directed to saving and increasing reliability level. Taking into account operating normative and regulated documents and world experience in this sphere as well. The system approach to the formulated purpose solution expressed in preparing reasonable decisions which are based on the integral principles of functioning proposed measures. **Results:** The survey of existing approaches to reliability

evaluation at different stages of life cycle is performed: design and operation of transport infrastructure objects. Due to concrete bridges prevalence in the park of artificial constructions the analysis of measures for increasing reliability level is performed exactly on them. Investigations on load intensity are given for automobile, railway and special vehicles. Theoretical and practical suggestions for increasing reliability level consisting of evaluation, forecast, joint (integral) interaction and in-between consideration are prepared. **Practical importance:** Measures for increasing reliability level such as probability theory application, modern strategy of maintenance, instruments of risk management, methods of reliable technical state evaluation, technical construction monitoring systems are stated. An integral approach to proposed solutions was given top investigation priority. From the practical point of view these measures will allow to provide and support the set standard (design) levels of reliability, safety and durability of bridge constructions in future.

Keywords: Reliability, reinforced concrete, bridge, safety index, risk management, technical construction monitoring.

Введение. Постановка задачи

За последние годы проблемы надежности эксплуатации мостовых сооружений приобретают все бóльшую актуальность. Становится больше исследований на данную тему, например [1–13]. Очевидно, это связано с тем, что значительно возросли интенсивность транспортного потока и нагрузки от транспортных средств в его составе. Следовательно, увеличилась и нагрузка на мостовые сооружения.

Однако помимо общего роста величины обращающихся нагрузок перед специалистами эксплуатирующих организаций все более остро встают вопросы пропуска сверхнормативных нагрузок, а также определение их влияния на надежность эксплуатации.

На сети железных дорог общего пользования тяжеловесное движение оказывает значительное деградационное воздействие на конструкции и элементы мостов [4, 9, 13]. Динамика изменения усталостных трещин в пролетных строениях характеризует сверхнормативные нагрузки как основной фактор их возникновения. Зачастую давление на ось подвижного состава, обращающегося на железных дорогах, достигает 260–300 кН [9, 13] с тенденцией к еще большему увеличению [4].

На автомобильных дорогах ситуация во многом схожая, но при этом даже более острая. Последние 15 лет много и вполне закономерно говорится о необходимости пересмотра временных вертикальных нагрузок по схемам АК и НК для автодорожных мостовых сооружений и обосновывается необходимость их замены [1, 6, 8] на новые, увязанные с длиной загружаемой линии влияния. То, что выглядело прогрессивно в 60-е годы XX в. (а именно тогда апробировались и вводились нагрузки по схеме АК), уже морально устарело к настоящему времени. Помимо этих «общих», «наболевших» вопросов есть еще и проблема тяжеловесного движения. Характеристики многих транспортных средств, обращающихся на автомобильных дорогах общего пользования, значительно превышают принятые при проектировании мостов соответствующие нормативные значения нагрузок Н-13 и НГ-60, Н-30 (Н-18) и НК-80 как по общему весу, так и по давлению на ось. Величина может достигать 520 кН на ось и более [13]. При этом также стоит учесть, что в общем плане количество объектов, запроектированных под современные нагрузки (АК), еще крайне мало в общем числе эксплуатируемых объектов. Так, для условий Санкт-Петербурга их менее 10% [14].

Помимо вышеупомянутого следует принять во внимание, что существуют специальные временные нагрузки, предназначенные прежде всего для мобилизации техники, машин и механизмов как в мирное, так и в военное время. К ним относится техника Мини-

стерства обороны, Министерства внутренних дел, МЧС. Ввиду определенной секретности в использовании подобных сведений привести фотографии и/или схемы подобной нагрузки в открытой печати не представляется возможным, однако отметим здесь лишь то, что величины таких нагрузок достигают 350 кН на ось и выше.

Ввиду того, что в общем плане количество железобетонных мостов составляет около 90% от общего числа мостовых сооружений [15], актуальными становятся исследования, направленные на разработку теоретических и практических мер по повышению надежности эксплуатации именно данных объектов транспортной инфраструктуры.

Общие сведения о надежности. Имеющиеся подходы к обеспечению

Прежде всего отметим, что надежность как таковая нормируется и регламентируется соответствующим документом [16]. Исследования, направленные на управления надежностью эксплуатируемых мостовых сооружений, проводятся на протяжении многих лет и могут быть найдены как в отечественной [3, 17–20], так и в зарубежной литературе [21–24].

Расчетными методами возможно оценить надежность мостов на разных стадиях: проектирования и эксплуатации [25].

В первом случае существуют несколько методов расчета: детерминированные, полувероятностный, вероятностный [26].

Конечная цель всех методов расчета мостов – обеспечение надежности сооружений при пропуске расчетной нагрузки, однако методы получения этой оценки различны. В детерминированных методах расчета по допускаемым напряжениям и по разрушающим усилиям (разрушающим нагрузкам) случайный характер жизненного цикла учитывается просто введением интегрального (общего) коэффициента запаса. В полувероятностном способе расчета по методу предельных состояний факторы, определяющие случайный характер жизненного цикла, учитываются набором коэффициентов, что более точно отражает вероятностную природу этих факторов для каждого конкретного случая. Причем форма оценки надежности по-прежнему носит детерминистический характер. В полной мере случайный характер факторов, обусловливающих надежность сооружений, учитывается в вероятностном методе расчета [25].

Во втором случае, являющемся объектом рассмотрения настоящей статьи, для использования методов теории надежности при оценке эксплуатируемых мостов рассматриваются особенности конструкций и случайный характер факторов, определяющих жизненный цикл мостовых сооружений.

Важнейший показатель надежности мостов – вероятность безотказной работы, т. е. того, что в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки не возникнет отказа.

Основными показателями долговечности служат ресурс, т. е. наработка до предельного состояния, и срок службы [16]. Для мостов к ним относятся срок службы или календарная продолжительность эксплуатации до возникновения предельного состояния.

По разным причинам, в том числе и вследствие накопления усталостных повреждений, надежность мостов P в процессе эксплуатации за время t снижается, а вероятность отказа Q увеличивается (рис. 1). При этом основное

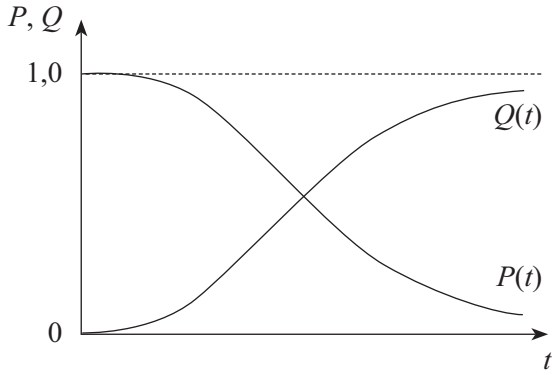


Рис. 1. Графики функции надежности $P(t)$ и вероятности отказа $Q(t)$

соотношение надежности может быть записано в виде

$$P(t)+Q(t)=1.$$

Вероятность отказа $Q(t)$ определяется через функцию плотности вероятности отказов $f(t)$:

$$Q(t)=\int_{-\infty}^{t} f(t)dt.$$

При этом функция надежности, или вероятность безотказной работы $P(t)$, в течение времени t будет равна

$$P(t)=1-Q(t)=1-\int_{-\infty}^{t} f(t)dt=\int_{t}^{t_{\text{к}}} f(t)dt.$$

В мостах могут возникать как внезапные, так и постепенно развивающиеся отказы. В отдельных случаях вводится понятие «предотказное состояние», что отражено в работе [27].

Так как нормальная эксплуатация нарушается при наступлении отказа любого вида, надежность $P(t)$ определяется как

$$P(t)=P_{\text{в}}(t)P_{\text{п}}(t)=[1-Q_{\text{в}}(t)]\times[1-Q_{\text{п}}(t)],$$

где $P_{\text{в}}(t)$ и $Q_{\text{в}}(t)$ – функция надежности (вероятность работоспособного состояния) и вероятность наступления внезапных отказов; $P_{\text{п}}(t)$ и $Q_{\text{п}}(t)$ – то же для постепенных отказов.

Внезапные отказы связаны с так называемыми «ошибками на различных стадиях жизненного цикла» [2]: просчетами при проектировании, нарушениями технологии изготовления и монтажа, а также грубым несоблюдением режима эксплуатации. На основании опытных данных установлено [18, 19, 25], что вероятность $P_{\text{в}}(t)$ удовлетворительно описывается экспоненциальным законом распределения, или распределением Вейбулла:

$$P(t)=t^{-\lambda t^{\alpha}}.$$

Постепенно развивающиеся отказы возникают вследствие проявления закономерных явлений и процессов – износа, коррозии, накопления усталостных повреждений.

Постепенно нарастающие отказы, связанные с износом, а также с усталостными разрушениями, хорошо описываются нормальным законом распределения с плотностью вероятности:

$$f(t)=\frac{1}{\sigma_t\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma_t^2}},$$

где m_t и σ_t – соответственно математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение случайной величины – времени наступления отказа. Средняя наработка (продолжительность работы) t до отказа равна математическому ожиданию m_t.

Теоретические предложения по повышению надежности

В качестве теоретических предложений по повышению уровня надежности эксплуатируемых железобетонных мостовых сооружений предложим следующие:

– прогнозирование состояния с учетом индекса надежности (безопасности);

– переход к современным стратегиям содержания;

– использование инструментов менеджмента рисков при управлении техническим состоянием мостов.

Международный союз лабораторий по испытанию и исследованию материалов (RILEM) в качестве одного из критериев устанавливает соответствие между снижением какого-либо параметра и вероятностью такого снижения. Приняв в качестве параметра достижение того или иного уровня состояния сооружения, возможно учесть этот критерий в настоящей работе. То есть прогнозирование наступления более поздних событий должно вестись с большей обеспеченностью или надежностью.

Данный подход в целом отвечает современным исследованиям как в отечественной [17, 18, 20], так и в зарубежной практике [21, 22].

Известно [18, 25], что уровень надежности удобно задавать коэффициентом безопасности β (индекс надежности), который представляет собой число среднеквадратичных отклонений, укладывающихся в интервале [0; m_z], где m_z – математическое ожидание исследуемой величины (рис. 2).

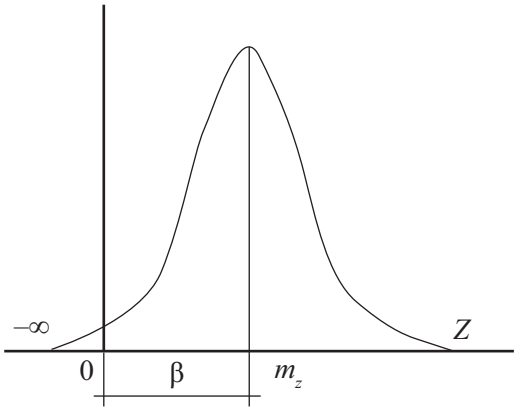


Рис. 2. Коэффициент безопасности (индекс надежности)

Ранее автором [12] была сформулирована зависимость в общем случае между состоянием сооружения W и его сроком службы t в виде

$$W(t) = F(W_{нач}, t, \mu, [система_коэффициентов]),$$

где $W_{нач}$ – начальный уровень состояния сооружения; t – время (срок службы); μ – коэффициент деградации.

Для любого парка мостов, независимо от субъекта эксплуатации, вида обращающейся нагрузки и ее величины, возможно ввести различные критерии оценки остаточного срока (ресурса). В частности, в строгом соответствии с теорией надежности [16] авторами настоящей статьи на основе материалов [12] предлагаются четыре критерия службы сооружения (иными словами, его прогнозирования), представленные в виде точек пересечения заданных уровней и квантилей состояния сооружения (таблица).

Квантили функции $W(t)$

Критерий	Уровень состояния сооружения (в долях от максимальной – 100 отн. ед.), отн. ед.*	Обеспеченность минимальной величины P	Индекс надежности, β	Состояние сооружения, функциональные ограничения
1	25	0,99999	4,27	Достижение зоны предельных состояний, невозможность эксплуатации
2	50	0,9995	3,29	Частично работоспособное состояние, ограничения по потребительским свойствам, необходимость *капитального ремонта* или *реконструкции*
3	70	0,99	2,33	Работоспособное состояние, необходимо проведение *ремонтных работ*
4	90	0,9	1,28	Переход из исправного в неисправное состояние, одновременно работоспособное, *работы по содержанию*

* Конкретные величины уровня состояния сооружения в относительных единицах получены автором [12] и приводятся без соответствующего обоснования.

Соответствующие уровни состояния по приведенным критериям (и соответственно прогнозирование срока службы до достижения заданного уровня, управление надежностью и возможность планирования содержания) отражены на рис. 3.

Следующим моментом теоретического плана, направленным на достижение задачи настоящей статьи, является современный подход к управлению техническим состоянием (а равно, повышением надежности эксплуатации) железобетонных мостовых сооружений.

Общеизвестно, что финансирование строительной сферы в целом, а также дорожной и мостовой отраслей в частности ведется по принципу «реактивного содержания» (либо «пассивного содержания»), когда нормируются определенные показатели, по достижении которых необходимо проводить соответствующие работы (по содержанию, ремонту или капитального характера), т. е. реагировать на них.

А. В. Сырковым [28, 29] была предложена так называемая «стратегия превентивного содержания» (или «проактивного содержания»), основной идеей которой является уход от реакционного поведения, ожидания нормированных показателей, и переход к превентивным мерам. Распространяя данную мысль на предмет настоящей статьи, отметим, что при воздействии сверхнормативных нагрузок на железобетонные мостовые сооружения надежность объекта транспортной инфраструктуры может быть существенно повышена за счет заблаговременных мер. В конечном итоге это приведет к сокращению времени на устранение дефектов, снижению стоимости содержания и увеличению пропускной способности моста.

Еще одним инструментом по повышению надежности является аппарат менеджмента рисков. Методики анализа рисков строительных конструкций применительно к мостовым сооружениям с целью совершенствования оценки их технического состояния уже апробированы и адаптированы [29, 30]. Менеджмент рисков [31] позволяет производить идентификации потенциальных опасностей и возможных видов отказов применительно к мостам, построения новых моделей деревьев отказов с целью моделирования сценариев нежелательных последствий и обеспечения возможности более обоснованного управления рисками. В частности, матрица рисков, пред-

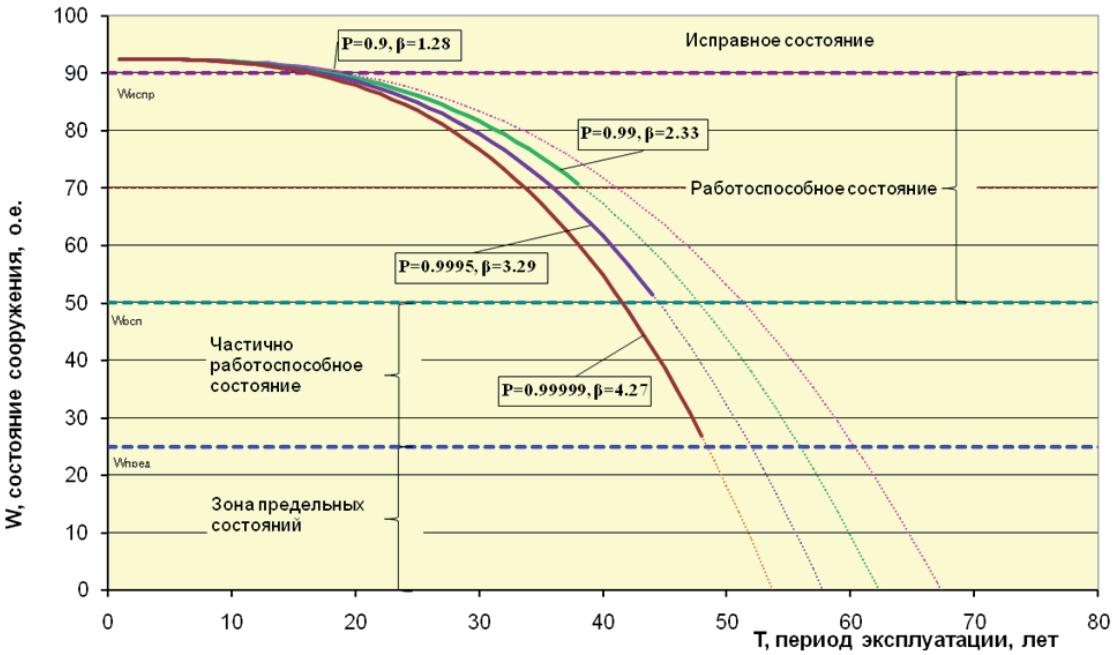


Рис. 3. Квантили функции $W(t)$

ставляющая собой увязку макроэлементов мостового сооружения с причинами отказов и негативных воздействий, – это наглядный пример учета воздействия сверхнормативной нагрузки на элементы объекта.

Матричная система при оценке надежности строительных объектов также может быть использована и с помощью методов теории нечетких множеств [32].

В общем плане разработка увязанных между собой методики управления эксплуатационными рисками мостовых сооружений и теорией надежности – предмет обширного исследования, отдельные положения которого могут быть найдены, к примеру, в пособии [33].

Все три указанные предложения теоретического плана имеют под собой базу, применимую как для эксплуатируемых сооружений общего пользования, так и находящихся в каких-либо тяжелых условиях эксплуатации, например, как заявлено в настоящей статье, при обращении по мостам сверхнормативных нагрузок. В этом случае меняются лишь отдельные позиции предлагаемых теоретических вопросов. В частности, критерии должны быть назначены более точно, а в качестве наиболее вероятных рисков должны быть приняты превышение массы транспортных средств и наступление предельных состояний с высокой долей вероятности.

Практические рекомендации по повышению надежности

В практическом плане прежде всего стоит указать, что повышением уровня контроля качества на всех этапах жизненного цикла, а также проведением обследований и испытаний перед и после пропуска сверхнормативной нагрузки вероятность наступления внезапных отказов может быть сведена к минимуму.

Поэтому в первую очередь отметим необходимость наличия достоверной оценки технического состояния объекта, по которому планируется проезд тяжеловесной техники, а также аналогичную информацию после пропуска сверхнормативной нагрузки.

Современное оборудование, используемое для оценки надежности железобетонных мостов (обследовании и испытании объектов), достаточно широко известно и может быть найдено, например, в работе [34]. А методики обработки результатов измерений с учетом специфики железобетона и современных технологий отражены в публикациях [35–37].

Однако зачастую количество объектов велико, а времени крайне мало, и ручное доскональное обследование весьма трудоемко и дорогостояще. Потому в данной ситуации инструментом, направленным на повышение надежности железобетонных мостов при пропуске сверхнормативной нагрузки, может стать мониторинг инженерных конструкций [38].

Как пример успешной реализации отметим систему компьютеризированного контроля, управления содержанием и непрерывного мониторинга состояния вантового путепровода по пр. Александровской Фермы над главными путями железной дороги «Санкт-Петербург–Москва» [39] – рис. 4. Система, установленная в 2008 г., обеспечивает сплошной контроль конструкций в автоматизированном режиме. Среди приборного оснащения (датчики напряжения и вибраций) размещены видеокамеры, которые позволяют при получении сигналов тревоги с датчиков мониторинга регистрировать изображения за 5 с перед включением сигнала тревоги и 10 с после его включения.

Система контроля нагрузок дает возможность оценить уровень напряжения, которое испытывают конструкции в связи с прохождением большегрузных автомобилей. Также возможно подсчитать циклы прохождения автотранспорта и оценить уровень усталости объекта.

Помимо мониторинга конструкций есть примеры реализации, направленные на мониторинг состояния железнодорожного пути [40]. С помощью предлагаемой системы объективной оценки состояния рельсовой линии и верхнего строения пути в режиме реального

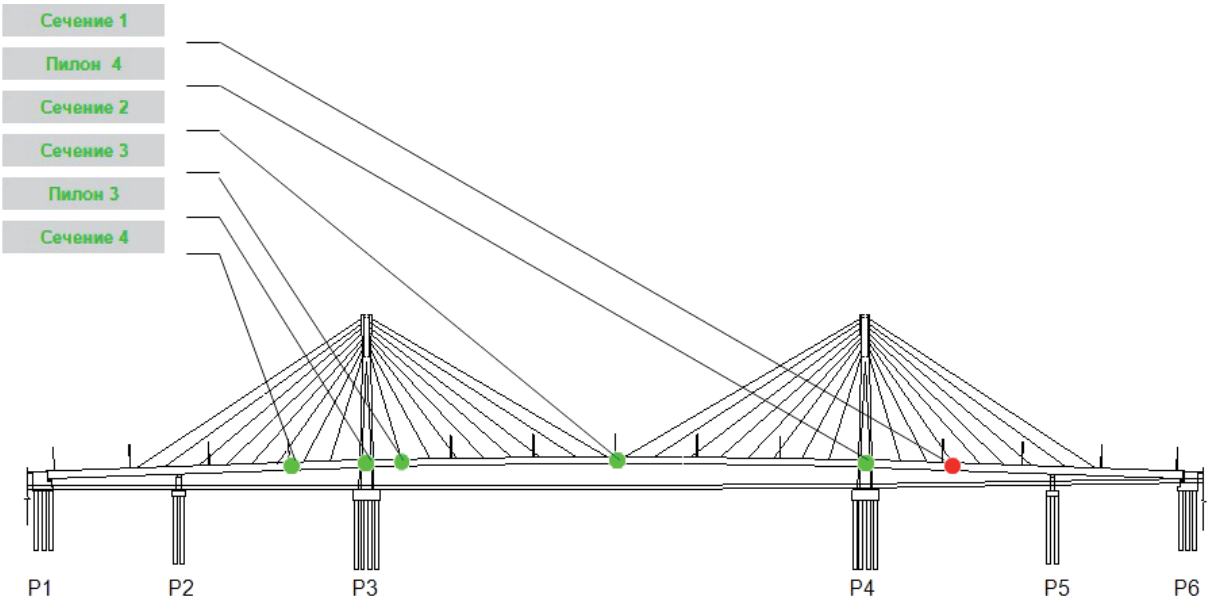


Рис. 4. Мониторинг состояния конструкций при пропуске тяжеловесной техники (путепровод в створе пр. Александровской Фермы)

времени становится возможен анализ причин возникновения аварийных ситуаций на объектах железнодорожной инфраструктуры, особенно при пропуске тяжеловесных поездов (рис. 5, 6).

Заключение

Рост уровня автомобильных, железнодорожных и специальных нагрузок и интенсивности движения транспорта диктует необходимость разработки специальных мер по повышению уровня надежности объектов транспортной инфраструктуры, в частности железобетонных мостов как наиболее массового типа искусственных сооружений.

В этой связи особую важность приобретают вопросы, касающиеся влияния повышенных эксплуатационных нагрузок на физическое состояние элементов мостов. Очевидно, что регулярное обращение по мостам тяжелых транспортных нагрузок, относящихся по воздействию на сооружение к классу, близкому к классу грузоподъемности пролетных строений, не может не сказаться на их уровне надежности. В связи с этим особо важными являются достоверная оценка их техническо-

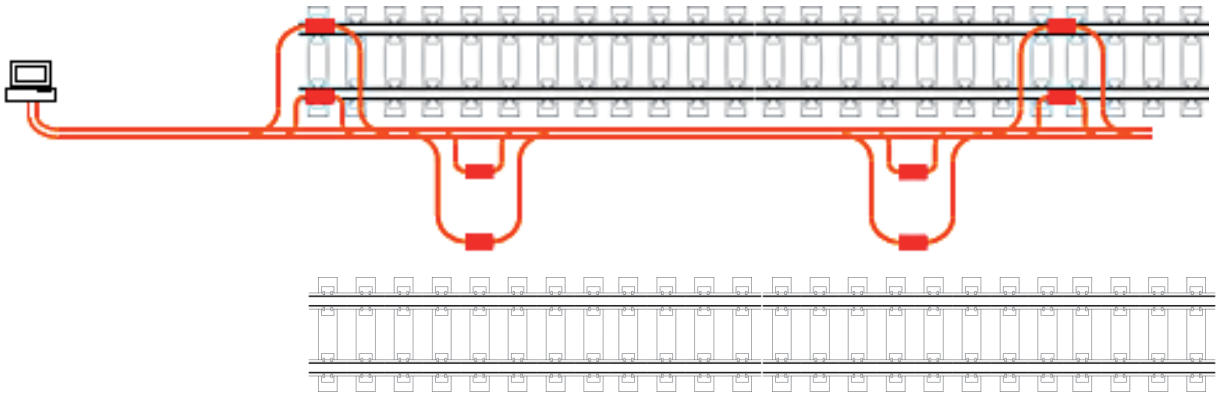


Рис. 5. Мониторинг состояния железнодорожного пути

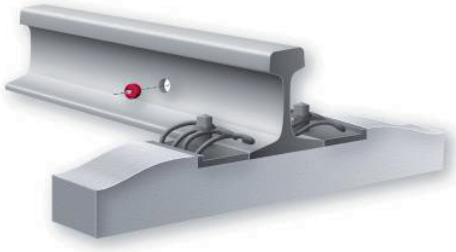


Рис. 6. Датчик системы контроля обращающихся нагрузок

го состояния, прогнозирование возникающих дефектов, сроков их появления и степени развития.

Изложенные в статье пути повышения надежности разделены на два основных блока – теоретический и практический. Применение их в совокупности, интегрально, позволит обеспечить, сохранить и спрогнозировать уровень технического состояния эксплуатируемых железобетонных мостов.

Библиографический список

1. Боханова С. В. Необходимость введения на мостах нормативных нагрузок, отвечающим современным темпам развития автомобильной промышленности / С. В. Боханова // Науч. труды ОАО «ЦНИИС». – 2005. – Вып. 226. – С. 45–48.

2. Карапетов Э. С. Методы оценки технико-эксплуатационных показателей железобетонных мостовых сооружений Санкт-Петербурга / Э. С. Карапетов, А. А. Белый // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2009. – Вып. 2. – С. 177–187.

3. Богданов Г. И. Проблемы эксплуатационной надежности и безопасности городских мостов / Г. И. Богданов // Журн. «Мир дорог». – 2010. – № 46. – С. 34–35.

4. Рупасова И. В. Воздействие обращающегося и перспективного подвижного состава на мосты / И. В. Рупасова, В. В. Кондратов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2012. – Вып. 4 (33). – С. 111–116.

5. Карапетов Э. С. Содержание и реконструкция городских транспортных сооружений : учеб. пособие / Э. С. Карапетов, В. Н. Мячин, Ю. С. Фролов. – М. : ФГБОУ «УМЦ ЖДТ», 2013. – 300 с.

6. Васильев А. И. Нормы нагрузок на мосты от автотранспортных средств общего пользования / А. И. Васильев, Ю. М. Егорушкин, Н. В. Илюшин // Транспортное строительство. – 2014. – № 4. – С. 12–14.

7. Нигаматова О. И. Системы управления состоянием мостовых сооружений / О. И. Нагаматова, И. Г. Овчинников // Интернет-журнал «Науковедение». – 2015. – Т. 7, № 3. – URL : http://naukovedenie.ru/PDF/09TVN315.pdf (дата обращения : 15.10.2017). DOI: 10.15862/09TVN315

8. Саламахин П. М. Требования к нормам на вертикальные нагрузки на мостовые сооружения / П. М. Саламахин // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2015. – № 1 (71). – С. 24–26.

9. Бокарев С. А. Влияние тяжеловесного движения на искусственные сооружения / С. А. Бокарев, Ю. Н. Мурованный, А. М. Усольцев // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 4. – С. 25–28.

10. Быстров В. А. Качество и инновационность проектирования – пути управления безопасностью городских надземных и подземных транспортных сооружений / В. А. Быстров, Г. А. Ярошутин // Вестн. гражданских инженеров. – 2016. – № 6 (59). – С. 168–172.

11. Москвич В. К. Анализ актуальности и проблем оценки состояния мостовых сооружений / В. К. Москвич, М. В. Нененко // Науч. вестн. Воронеж. гос. архитект.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. – 2016. – № 3 (43). – С. 68–75.

12. Белый А. А. Вероятностное прогнозирование технического состояния эксплуатируемых железобетонных мостовых сооружений мегаполиса / А. А. Белый // Вестн. гражданских инженеров. – 2017. – № 2 (61). – С. 64–74. DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-2-64-74

13. Карапетов Э. С. Управление долговечностью железобетонных мостов при сложных условиях эксплуатации / Э. С. Карапетов, А. А. Белый // Путь и путевое хозяйство. – 2017. – № 4. – С. 21–25.

14. Белый А. А. Анализ технического состояния эксплуатируемых железобетонных мостовых сооружений Санкт-Петербурга / А. А. Белый // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2017. – № 3. – С. 37–44. DOI: 10.12737/24624

15. Карапетов Э. С. Проблема долговечности железобетонных мостов / Э. С. Карапетов, Д. А. Шестовицкий // Новые технологии в мостостроении (от прошлого к будущему) : сб. трудов Междунар. науч.-технич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2015. – С. 111–116.

16. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 37 с.

17. Чирков В. П. Вероятностные методы расчета мостовых железобетонных конструкций / В. П. Чирков. – М. : Транспорт, 1980. – 136 с.

18. Иосилевский Л. И. Практические методы управления надежностью железобетонных мостов / Л. И. Иосилевский. – М. : Инженер, 2001. – 296 с.

19. Добромыслов А. Н. Оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам : справ. пособие / А. Н. Добромыслов. – М. : АСВ, 2006. – 72 с.

20. Васильев А. И. Оценка технического состояния мостовых сооружений : учеб. пособие / А. И. Васильев. – М. : КНОРУС, 2017. – 256 с.

21. EN 1990–2001. Eurocode : Basis of Structural Design. – Brussels : CEN, 2001. – 89 p.

22. Sýkora M. Verification of existing reinforced concrete bridges using the semi-probabilistic approach / M. Sýkora, M. Holický, J. Marková // Engineering Structures. – 2013. – Vol. 56. – P. 1419–1426. DOI : 10.1016/j.engstruct.2013.07.015

23. Лантух-Лященко А. И. Концепция надежности в Еврокоде / А. И. Лантух-Лященко // Мости та тунелі : теорія, дослідження, практика. – 2014. – Зб. № 6.– Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2014. – С. 79–88.

24. Steenbergen R. Economic and human safety reliability levels for existing structures / R. Steenbergen, M. Sýkora, D. Diamantidis, M. Holický, T. Vrouwenvelder // Structural Concrete – Journal of fib. – 2015. –Vol. 16, issue 3. – P. 323–332.

25. Богданов Г. И. Надежность мостов : учеб. пособие / Г. И. Богданов, А. А. Белый. – СПб. : ПГУПС, 2017. – 87 с.

26. Шестовицкий Д. А. Прогнозирование срока службы железобетонных пролетных строений автодорожных мостов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д. А. Шестовицкий. – СПб. : ПГУПС, 2017. – 28 с.

27. Сапожников Вл. В. Понятие предотказного состояния / Вл. В. Сапожников, А. А. Лыков, Д. В. Ефанов // Автоматика, связь, информатика. – 2011. – № 12. – С. 6–8.

28. Сырков А. В. Развитие методов количественной оценки деградации мостовых сооружений / А. В. Сырков // Сб. докл. 65-й науч. конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. – СПб. : СПбГАСУ, 2008. – С. 75–79.

29. Сырков А. В. Оценка и управление состоянием мостовых сооружений с помощью анализа рисков / А. В. Сырков // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2009. – № 4. – С. 38–40.

30. Прибытков С. С. Проблема выбора методики анализа рисков, связанных с неисправностями железобетонных пролетных строений мостов / С. С. Прибытков, А. В. Александров // Вестн. СибГУПС. – 2014. – № 30. – С. 16–21.

31. ГОСТ Р 51901–2002. Управление надежностью. Анализ риска технологических систем. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 23 с.

32. Соколов В. А. Диагностика технического состояния конструкций зданий и сооружений с использованием методов теории нечетких множеств / В. А. Соколов // Инженер.-строит. журн. – 2010. – № 5. – С. 31–37.

33. Костерев В. В. Надежность технических систем и управление риском : учеб. пособие / В. В. Костерев. – М. : МИФИ, 2008. – 280 с.

34. Каптелин С. Ю. Современные приборы для обследования и испытания мостов / С. Ю. Каптелин // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 7. – С. 20–27.

35. Солдатенко Т. Н. Модель идентификации и прогноза дефектов строительной конструкции на основе результатов ее обследования / Т. Н. Солдатенко // Инженер.-строит. журн. – 2011. – № 7. – С. 52–61.

36. Улыбин А. В. Качество визуального обследования зданий и сооружений и методика его выполнения / А. В. Улыбин, Н. И. Ватин // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 10 (25). – С. 134–146.

37. Чижов С. В. Анализ системных факторов безотказной работы железобетонных пролетных строений по данным натурных обследований / С. В. Чижов, Э. Т. Яхшиев // Интернет-журн. «Науковедение». – 2016. – Т. 8, № 4. – URL : http://naukovedenie.ru/PDF/70TVN416.pdf (дата обращения : 15.10.2017).

38. Долинский К. Ю. Реализация системы мониторинга инженерных конструкций искусственных сооружений / К. Ю. Долинский, А. А. Белый, Г. В. Осадчий, Л. А. Максименко // Сб. материалов V Всерос. науч.-практич. конференции с международным участием «Информационные технологии и технический дизайн в профессиональном образовании и промышленности». – Новосибирск : НГТУ, 2013. – С. 9–19.

39. Карапетов Э. С. Мониторинг мостовых сооружений Санкт-Петербурга. История. Назначение. Примеры. Перспективы / Э. С. Карапетов, А. А. Белый // Вестник. Зодчий. 21 век. – 2008. – № 4 (29). – С. 80–83.

40. Осадчий Г. В. Система диагностики и удаленного мониторинга состояния железнодорожного пути / Г. В. Осадчий, А. А. Лыков // Открытое образование. – 2011. – М. : Рос. эконом. ун-т им. Г. В. Плеханова, 2011.– № 2-2.– С. 221–224.

References

1. Bokhanova S. V. Neobkhodimost vvedeniya na mostakh normativnykh nagruzok otvechayushchikh sovremennym tempam razvitiya avtomobilnoi promyshlennosti [Necessity of introducing structural load on bridges satisfying current rates of automobile industry development], *Nauchnye trudy OAO TsNIIS* [*Transactions of open joint stock company*], 2005, issue 226, pp. 45–48. (In Russian).

2. Karapetov E. S. & Belyi A. A. Metody otsenki tekhniko-ekspluatatsionnykh pokazatelei zhelezobetonnykh mostovykh sooruzhenii Sankt Peterburga [Methods of evaluating technico-operating characteristics of reinforced-concrete bridge constructions]. *Izvestiya Peterburgskogo Universiteta putei soobscheniya* [*Proceedings of Petersburg Transport University*], 2009, issue 2 (19), pp. 177–187. (In Russian)

3. Bogdanov G. I. Problemy ekspluatatsionnoi nadezhnosti i bezopasnosti gorodskikh mostov [Problems of operating reliability and safety of urban bridges]. *Mir dorog* [*World of lines*], 2010, no. 46, pp. 34–35. (In Russian)

4. Rupasova I. V. & Kondratov V. V. Vozdeistvie obraschayushchegosya i perspectivnogo podvizhnogo sostava na mosty [Impact of running and perspective rolling stock on bridges]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobscheniya* [*Proceedings of Petersburg Transport University*], 2012, issue 4 (33), pp. 111–116. (In Russian)

5. Karapetov E. S., Myachin V. N., Frolov Yu. S. *Soderzhanie i rekonstruktsiya gorodskikh transportnykh sooruzhenii* [*Maintenance and reconstruction of urban transport constructions*]. Moscow, FGBOU “UMTs ZhDT” Publ., 2013, 300 p. (In Russian)

6. Vasiliev A. I., Egorushkin Yu. M. & Ilyushin N. V. Normy nagruzok na mosty ot avtotransportnykh sredstv obshchego polzovaniya [Loading instructions on bridges from public transport vehicles]. *Transport construction*, 2014, no. 4, pp. 12–14. (In Russian)

7. Nigamatova O. I. & Ovchinnikov I. G. Sistemy upravleniya sostoyaniem mostovykh sooruzhenii [Systems of controlling bridge construction state]. *Naukovedenie* [*Science studies*], 2015, vol. 7, no. 3. – URL: http://naukovedenie.ru/PDF/09TVN315.pdf (accessed: 15.10.2017). DOI: 10.15862/09TVN315 (In Russian)

8. Salamakhin P. M. Trebovaniya k normam na vertikalnye nagruzhki yf mostovye sooruzheniya [Requirements for vertical loading instructions on bridge constructions]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli* [*Science and engineering in road branch*], 2015, no. 1 (71), pp. 24–26. (In Russian)

9. Bokarev S. A., Murovannyi Yu. N. & Usoltsev A. M. Vliyanie tyazhelovesnogo dvizheniya na iskustvennye sooruzheniya [Impact of heavy haul environment on artificial constructions]. *Zheleznodorozhnyi transport* [*Railway Transport*], 2016, no. 4, pp. 25–28. (In Russian)

10. Bystrov V. A. & Yaroshutin G. A. Kachestvo i innovatsionnost proektirovaniya – puti upravleniya bezopasnostyu gorodskikh nadzemnykh i podzemnykh transportnykh sooruzhenii [Quality and innovation of projecting – ways of administrating safety of urban elevated and underground transport constructions]. *Vestnik grazhdanskikh ingenerov* [*Civil engineers Bulletin*], 2016, no. 6 (59), pp. 168–172. (In Russian)

11. Moskvich V.K. & Nenenko M.V. Analiz aktualnosti i problem otsenki sostoyaniya mostovykh sooruzhenii [Analysis of relevance and problems of evaluating bridge construction state]. *Building and architecture*, 2016, no. 3 (43), pp. 68–75. (In Russian)

12. Belyi A.A. Veroyatnostnoe prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya ekspluatiruemykh zhelezobetonnykh mostovykh sooruzhenii megapolisa [Probabilistic forecasting technical state of operated reinforced-concrete bridge constructions of metropolis]. *Vestnik grazhdanskikh ingenerov* [*Civil engineers Bulletin*], 2017, no. 2 (61), pp. 64–74. (In Russian)

13. Karapetov E.S. & Belyi A.A. Upravlenie dolgovechnostyu zhelezobetonnykh mostov pri slozhnykh usloviyakh ekspluatatsii [Managing durability of reinforced-concrete bridges under complicated conditions of operating]. *Track and track facilities*, 2017, no. 4, pp. 21–25. (In Russian)

14. Belyi A. A. Analiz tekhnicheskogo sostoyaniya ekspluatiruemykh zhelezobetonnykh mostovykh sooruzhenii [Technical state analysis of operated reinforced-concrete bridge constructions of St. Petersburg]. *Bulletin of Belgorod Shukhov State Technological University*, 2017, no. 3, pp. 37–44. (In Russian)

15. Karapetov E.S. & Shestovitskii D.A. Problema dolgovechnosti zhelezobetonnykh mostov. Novye tekhnologii v mostostroenii (ot proshlogo k budushchemu). [Durability problem of reinforced-concrete bridges. New technologies in bridge engineering (from past to future)]. *Collected papers of International scientific-engineering conference*. Saint Petersburg, PGYuPS Publ., 2015, pp. 111–116. (In Russian)

16. SSS [State Standard Specification] 27.002–89. Nadezhnost *v tekhnike. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya* [*Reliability in technique. The main concepts. Terms and definitions*]. Moscow, Standard Publishing House, 1990, 37 p. (In Russian)

17. Chirkov V.P. *Veroyatnostnye metody of rascheta mostovykh zhelezobetonnykh konstruktsii* [*Probabilistic methods of computing bridge reinforced-concrete constructions*]. Moscow, Transport Publ., 1980, 136 p. (In Russian)

18. Iosilevskiy L.I. *Prakticheskie metody upravleniya nadezhnostyu zhelezobetonnykh mostov* [*Practical methods of managing reinforced-concrete bridges reliability*]. Moscow, Engineer Publ., 2001, 296 p. (In Russian)

19. Dobromyslov A.N. *Otsenka nadezhnosti zdaniy i sooruzheniy po vneshnim priznakam* [*Evaluating building and construction reliability by external indicators*]. Moscow, ACB Publ., 2006, 72 p. (In Russian)

20. Vasiliev A.I. *Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya mostovykh sooruzhenii* [*Evaluating technical state of bridge constructions*]. Moscow, KnoRus Publ., 2017, 256 p. (In Russian)

21. *EN 1990–2001. Eurocode: Basis of Structural Design.* Brussels, CEN, 2001, 89 p.

22. Sýkora M., Holický M. & Marková J. Verification of existing reinforced concrete bridges using the semi-probabilistic approach. *Engineering Structures*, 2013, vol. 56, pp. 1419–1426.

23. Lantukh-Lyashchenko A.I. *Kontseptsiya nadezhnosti v Evrokode. Mosty i tunneli: teoriya, issledovaniya, praktika* [*Reliability concept in Eurocode. Bridges and tunnels: theory, investigation, practice*]. Dnepropetrovsk, Publishing house of Academician V. Lazarev Dnepropetrovsk national Railway Transport University Publ., 2014, Зб. no. 6, pp. 79–88.

24. Steenbergen R., Sýkora M., Diamantidis D., Holický M. & Vrouwenvelder T. Economic and human safety reliability levels for existing structures. *Structural Concrete – Journal of fib.*, 2015, vol. 16, issue 3, pp. 323–332.

25. Bogdanov G.I. & Belyi A.A. *Nadezhnost mostov* [*Bridges reliability*]. Saint Petersburg, PGYuPS Publ., 2017, 87 p. (In Russian)

26. Shestovitskii D.A. *Prognozirovanie sroka sluzhby zhelezobetonnykh stroeniy avtodorozhnykh mostov* [*Forecasting term of service life of reinforced-concrete bridge span constructions of road bridges*]. Cand. of engineering sciences. Thesis. Saint Petersburg, PGYuPS Publ., 2017, 28 p. (In Russian)

27. Sapozhnikov Vl.V., Lykov A.A. & Efanov D.V. Ponyatie predotkaznogo sostoyaniya [Conception of pre-failure condition]. *Avtomatika, svyaz, informatika* [*Automation, connection, informatics*], 2011, no. 12, pp. 6–8. (In Russian)

28. Syrkov A.V. Razvitie metodov kolichestvennoi otsenki degradatsii mostovykh sooruzhenii [Development of quantitative evaluation methods of bridge constructions degradation]. *Collection of papers of the 65th scientific conference of professors, lecturers, scientific research workers, engineers and postgraduate students of the university.* Saint Petersburg, Saint Petersburg

State University of Architecture and Civil Engineering Publ., 2008, pp. 75–79. (In Russian)

29. Syrkov A. V. Otsenka i upravlenie sostoyaniem mostovykh sooruzheniy s pomoshchyu analiza riskov [Evaluation and management of bridge constructions state with the help of risk analysis]. *Science and engineering in road branch*, 2009, no. 4, pp. 38–40. (In Russian)

30. Pribytkov S. S. & Aleksandrov A. V. Problema vybora metodiki analiza riskov, svya zannykh s neispravnostyami zhelezobetonnykh proletnykh stroeniy mostov [Problem of choosing risk analysis procedure connected with malfunction of reinforced-concrete bridge span constructions of bridges]. *The Siberian transport university Bulletin,* 2014, no. 30, pp. 16–21. (In Russian)

31. SSS [State Standard Specification] *Upravlenie nadezhnostiyu. Analiz riska tekhnologicheskikh system* [*Reliability management. Risk analysis of technological systems*]. Moscow, Standard Publishing House, 2002, 23 p. (In Russian)

32. Sokolov V. A. Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya konstruktsii zdanii i sooruzhenii s ispolzovaniem metodov teorii nechetkikh mnozhestv [Technical state diagnostics of building and construction structures with the use of fuzzy set theory methods]. *Engineering building journal*, 2010, no. 5, pp. 31–37. (In Russian)

33. Kosterev V. V. *Nadezhnost tekhnicheskikh system i upravlenie riskom* [*Reliability of technical systems and risk management*]. Moscow, National research nuclear University Publ., 2008, 280 p. (In Russian)

34. Kaptelin S. Yu. Sovremennye pribory dlya obsledovaniya i ispytaniya mostov [Modern tools for surveying and testing bridges]. *Track and track facilities*, 2014, no. 7, pp. 20–27. (In Russian)

35. Soldatenko T. N. Model identifikatsii i prognoza defektov stroitelnoi konstruktsii na osnove rezultatov ee obsledovaniya [The model of identification and prognosis of building construction defects on the base of its survey results]. *Engineering building journal*, 2011, no. 7, pp. 52–61. (In Russian)

36. Ulybin A. V. & Vatin N. I. Kachestvo vizualnogo obsledovaniya zdanii I sooruzheni i metodika ego vypolneniya [Quality of building and construction visual survey and its performance procedure]. *Building unique edificies and constructions*, 2014, no. 10 (25), pp. 134–146. (In Russian)

37. Chizhov S. V. & Yakhshiev E. T. Analiz sistemnykh faktorov bezotkaznoi raboty zhelezobetonnykh proletnykh stroenii po dannym naturnykh obsledovanii [Analysis of system factors of failure-free work of reinforced-concrete bridge span constructions according to nature survey data]. *Naukovedenie* [*Science Studies*], 2016, vol. 8, no. 4. – URL: http://naukovedenie.ru/PDF/70TVN416.pdf (accessed: 15.10.2017). (In Russian)

38. Dolinsky K.Yu., Belyi A. A., Osadchii G. V. & Maksimenko L. A. Realizatsiya sistemy monitoringa ingenernykh konstruktsii iskusstvennykh sooruzhenii [Realization of a system monitoring engineer constructions of artificial structures]. *Collection of papers of the 5th All-Russian scientific-practical conference with international participation "Information Technologies and Technical Design in Professional Education and Industry".* Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ., 2013, pp. 9–19. (In Russian)

39. Karapetov E. S., & Belyi A. A. Monitoring mostovykh sooruzhenii Sankt Peterbyrga. Istoriya. Naznachenie. Primery. Perspektivy [Monitoring of St. Petersburg bridge constructions. History. Purpose. Examples. Perspectives]. *Bulletin "Architect. The 21th Century"*. 2008, no. 4 (29), pp. 80–83. (In Russian)

40. Osadchii G. V.& Lykov A. A. Sistema diagnostiki i udalennogo monitoringa sostoyaniya zheleznodorozhnogo puti [System of diagnostics and remote monitoring of railway track state]. *Open Education*, 2011, no. 2-2, pp. 221–224. (In Russian)

*БЕЛЫЙ Андрей Анатольевич – канд. техн. наук, доцент, andbeliy@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); АНДРУШКО Сергей Борисович – канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры восстановления военных мостов и переправ, sb_and@mail.ru (Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А. В. Хрулева).

УДК 629.4.028.086

А. П. Болдырев, Д. А. Ступин, А. М. Гуров

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОГЛОЩАЮЩИХ АППАРАТОВ АВТОСЦЕПКИ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Дата поступления: 08.11.2017
Решение о публикации: 15.11.2017

Аннотация

Цель: Анализ состояния и путей совершенствования конструкций поглощающих аппаратов автосцепки грузового подвижного состава железных дорог, оценка свойств и перспектив внедрения аппаратов с применением полимерных и эластомерных материалов. **Методы:** Для оценки свойств аппаратов применены методы статистического моделирования. **Результаты:** Проанализированы существующие и перспективные конструкции поглощающих аппаратов автосцепки. Приведена современная классификация поглощающих аппаратов. Показаны достоинства и недостатки конструкций. Проведена сравнительная оценка эксплуатационных качеств аппаратов различных классов. Даны рекомендации по дальнейшему совершенствованию конструкций поглощающих аппаратов за счет современных полимерных и эластомерных материалов, а также новых упругих элементов и пар трения. **Практическая значимость:** Разработанные рекомендации позволяют значительно повысить эксплуатационные качества поглощающих аппаратов автосцепки – их надежность, энергоемкость, остаточный ресурс и др., что даст возможность более эффективно использовать грузовые вагонов, а также повысить безопасность движения.

Ключевые слова: Подвижной состав железных дорог, грузовой вагон, вагон-цистерна, поглощающий аппарат, автосцепка, маневровые соударения, продольные силы, нагруженность, безопасность движения, полимерные и эластомерные амортизаторы, фрикционные материалы, упругие элементы, подпорно-возвратные устройства, эксплуатационные характеристики, энергоемкость, надежность, остаточный ресурс.

***Aleksei P**. **Boldyrev,** D. Eng. Sci., professor, apb.tubryansk@gmail.com (Bryansk State Technical University); **Dmitry A**. **Stupin,** Cand. Eng. Sci., head of laboratory, dstupin@list.ru (All-Russian Scientific-research Railway Transport Institute, Public Corporation); **Aleksandr M. Gurov**, Cand. Eng. Sci., technical director, gurov@diprom.ru (Co Ltd “NPP Diprom”) MAIN TENDENCIES OF DEVELOPING AND IMPLEMENTING NEW CONSTRUCTIONS OF AUTOMATIC COUPLING CUSHIONING DEVICES OF FREIGHT CARS

Summary

Objective: Analysing state and ways of perfecting constructions of automatic coupling cushioning devices of freight railway rolling stock, evaluating properties and perspectives of implementing devices with application of polymeric and elastomeric materials. **Methods:** Methods of statistical modelling are applied for evaluating devices properties. **Results:** Existed and perspective constructions of automatic coupling cushioning devices are analyzed. Current classification of cushioning devices is presented. Virtues and shortcomings of constructions are shown. Comparative evaluation of operated devices qualities of different classes is performed. Recommendations for perfecting cushioning device constructions at the expense of polymeric and elastomeric materials, as well as new elastic elements and friction pairs are given. **Practical importance:** Developed recommendations allow significantly increasing operated

qualities of automatic coupling cushioning devices – their reliability, energy capacity, residual life etc. that will make possible more effective use of freight cars and also increase safety in operation.

Keywords: Railway rolling stock, freight car, tank-car, cushioning device, automatic coupling, shunting collisions, longitudinal forces, loading, safety in operation, polymeric and elastomeric buffers, friction materials, elastic elements, retaining-return devices, operating characteristics, energy capacity, reliability, residual life.

Проблемы защиты вагонов и грузов от продольных нагрузок в настоящее время остаются актуальными: массы составов продолжают увеличиваться, повышаются скорости движения и грузоподъемность вагонов, а также интенсивность маневровых операций [1]. Статистика поступлений в ремонт вагонов по причине неудовлетворительной работы автосцепного устройства подтверждает тот факт, что вагоны, оборудованные серийными аппаратами класса Т0, недостаточно защищены [2]. Это касается и поездных режимов: наблюдаются сходы вагонов в ситуациях торможения [3], обрывы автосцепок и др.

Для нормальной работы в реальных условиях эксплуатации поглощающие аппараты как основной элемент снижения продольной нагруженности вагонов должны обладать достаточными надежностью и прочностью, большей энергоемкостью, необходимой поглощающей способностью и оптимальной формой силовой характеристики.

Историю развития межвагонных амортизирующих устройств принято относить к переходу железных дорог на автосцепку от винтовой упряжи, что обусловило кардинальное повышение безопасности движения. За 80 лет замена винтовой сцепки (которая являлась сильным сдерживающим фактором для увеличения массы поездов) на автосцепку, а также ее постоянное совершенствование позволили достигнуть снижения количества разрывов поездов более чем в 750 раз при росте грузооборота в 13 раз [4]. Не последнюю роль в этом процессе сыграло применение эффективных амортизаторов удара (поглощающих аппаратов автосцепки).

До 2000 г. в эксплуатации на грузовых вагонах находилось несколько моделей поглощающих аппаратов автосцепки: Ш-1-ТМ, Ш-2-В и в меньших количествах – Ш-6-ТО-4 и ПМК-110 с энергоемкостью от 20 до 60 кДж. Однако классификации их не существовало, как и общих требований – на какой вагон какую модель аппарата допускается ставить. Лишь с появлением в конце 1990-х годов эластомерных поглощающих аппаратов повышенной энергоемкости, обеспечивающих бóльшую защиту вагона, но и имеющих значительную стоимость, возникла потребность их классификации, чтобы обеспечить их установку, в первую очередь на вагоны для перевозки опасных грузов, где их применение наиболее эффективно. В результате были разработаны и приняты следующие документы: Технические требования МПС РФ на разработку автосцепного устройства грузовых вагонов нового поколения № 10/31–99 [5], Нормы безопасности НБ ЖТ ЦВ-ЦЛ 022–2000 [6], Изменение и дополнение № 2 в «Нормы для расчета и проектирования вагонов…» [7], Отраслевой стандарт ОСТ 32.175–2001 [8] и, наконец, ГОСТ 32913–2014 «Аппараты поглощающие сцепных и автосцепных устройств железнодорожного подвижного состава. Технические требования и правила приемки» [9]. В них появилась классификация поглощающих аппаратов.

В соответствии с ГОСТ 32913–2014 по способу поглощения энергии удара поглощающие аппараты делятся на фрикционные, гидравлические, эластомерные, аппараты из упругих элементов и комбинированные, использующие сочетание нескольких способов поглощения энергии. По эксплуатационным техническим показателям поглощающие аппараты для грузового подвижного состава делятся на следующие классы:

– класс Т1 – предназначенные для вагонов, перевозящих все виды грузов (кроме опасных), а также маневровых локомотивов массой до 100 т включительно;

– класс Т2 – для специализированных вагонов, перевозящих ценные грузы, опасные грузы классов 3, 4, 5, 8, 9 по ГОСТ 19433–88 [10], а также вагонов с расчетной массой брутто свыше 120 т и магистральных локомотивов;

– класс Т3 – для вагонов, перевозящих особо опасные грузы классов 1, 2, 6, 7 по ГОСТ 19433–88, а также маневровых локомотивов массой свыше 100 т.

Основной особенностью конструкции фрикционных поглощающих аппаратов класса Т1 (РТ-120 и ПМКП-110) является использование блока упругих элементов вместо металлических пружин. Применение полимерных элементов позволило увеличить номинальную энергоемкость аппаратов до 70 кДж, а максимальную – до 90 кДж, а также исключить случаи разрушения, свойственные металлическим пружинам.

В 2004 г. ГК «Вагонмаш» в сотрудничестве с компанией «MINER» был разработан поглощающий аппарат РТ-120 с ходом 120 мм (рис. 1). Фрикционный узел в аппарате подпирается комплектом упругих элементов *4*. Особенностью фрикционного узла, в отличие от других аппаратов шестигранного типа (таких как Ш-2-В), является наличие на внутренних поверхностях корпуса в зоне работы клиньев *2* бронзовых вставок. Они стабилизируют трение и позволяют снизить износы трущихся деталей. Кроме того, аппарат не имеет стяжного болта. Направляющий стержень служит для центрального сжатия упругого комплекта.

Несомненное достоинство данного аппарата – длительный ресурс, однако процесс его приработки занимает достаточно большой промежуток времени. К недостаткам можно отнести общую проблему фрикционных поглощающих аппаратов – нестабильность силовой характеристики (скачкообразное изменение силы при сжатии).

В 2005 г. была разработана модель пластинчатого аппарата ПМКП-110 [11] с ходом 110 мм (рис. 2). Его конструкция аналогична конструкции аппарата ПМК-110 А [12], только в отличие от предшественника фрикционный узел у новой модели подпирается посредством комплекта упругих элементов *4*, имеющих бóльшую энергоемкость по сравнению с комплектом винтовых пружин.

Фрикционный поглощающий аппарат ПМКП-110 стал первым, не требующим предварительной приработки для получения нормативной энергоемкости, благодаря чему он надежно защищает вагон от повреждений уже при первых ударах. Отличительной особенностью аппаратов пластинчатого типа, к которым относится ПМКП-110, заключается

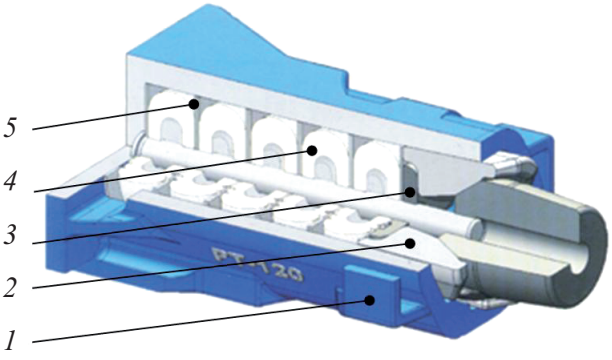


Рис. 1. Поглощающий аппарат РТ-120: *1* – корпус; *2* – фрикционный клин; *3* – шайба; *4* – упругий полимерный элемент; *5* – центрирующая пластина

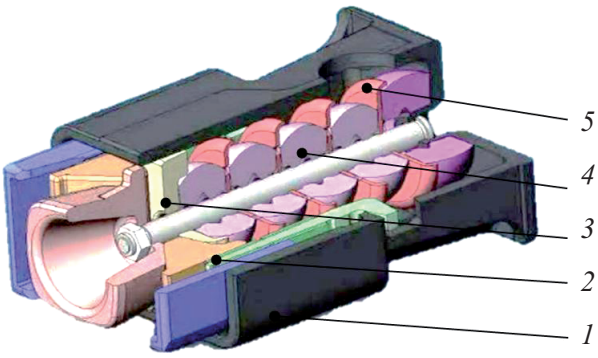


Рис. 2. Поглощающий аппарат ПМКП-110: *1* – корпус; *2* – металлокерамическая пластина; *3* – опорная пластина; *4* – упругий полимерный элемент; *5* – центрирующая пластина

в том, что все главные рабочие поверхности деталей фрикционного узла имеют вид прилегающих друг к другу плоскостей.

Сравнивая конструктивные особенности поглощающих аппаратов класса Т1, можно заметить, что аппарат ПМКП-110 обладает более стабильной силовой характеристикой, а РТ-120 имеет более простую конструкцию и большую износостойкость фрикционных деталей.

Существенным недостатком поглощающих аппаратов с упругими элементами из термоэластопласта является их зависимость от температуры. При повышении температуры жесткость элементов снижается, а при понижении значительно увеличивается, что, в свою очередь, влияет на энергоемкость поглощающих аппаратов. Перегрев аппаратов в гаражах-размораживателях или воздействие крайне низких температур может привести к преждевременному выходу из строя упругих элементов.

Несмотря на указанные недостатки и наличие более эффективных поглощающих аппаратов (эластомерных, гидравлических и т. д.), совершенствование конструкции аппаратов фрикционного типа актуально. Результаты эксплуатации и опытов, проводившихся в нашей стране и за рубежом, позволяют выделить относительно небольшое число конструктивных схем, жизнеспособность и практическое осуществление которых несомненны. Можно выделить три основных направления совершенствования конструкций фрикционных аппаратов:

– применение современных фрикционных материалов на поверхностях трения;

– использование высокоэффективных подпорно-возвратных устройств;

– разработка новых способов создания давления на поверхностях трения.

Наилучший эффект достигается за счет применения специальных фрикционных материалов, работающих в паре со стальными поверхностями. В настоящее время лучшими признаны порошковые металлокерамические материалы, имеющие относительно простые составы и при хороших фрикционных свойствах обладающие достаточной износостойкостью. Этим парам трения несвойственно схватывание, рабочие поверхности не имеют вырывов или наростов, на стальных поверхностях, работающих в паре с порошковым материалом, наблюдается полировальный эффект.

Существенно увеличить эффективность амортизирующих устройств можно в комбинированных фрикционных поглощающих аппаратах, получающих все большее распространение. Основное поглощение энергии в них происходит на поверхностях трения, однако применение современных высокоэффективных полимерных материалов, а также гидравлических и эластомерных амортизаторов в качестве рабочих элементов позволяет значительно улучшить характеристики аппаратов. По данным [13] энергоемкость подпорного блока можно существенно увеличить (до 30 % от общего усилия), если внедрить упругие полимерные элементы, теряющие устойчивость в процессе нагружения, что обеспечит выпуклую рабочую характеристику [14]. Это может в 1,5–2,0 раза увеличить энергоемкость подпора при неизменной максимальной силе. Подобную же (т. е. выпуклую) характеристику приобретает и поглощающий аппарат в целом, что дает возможность перевести его класс уровня Т1 в уровень Т2.

Актуальной с точки зрения экономической целесообразности является также разработка полностью металлических фрикционных поглощающих аппаратов.

В классах Т2 и Т3 представлены эластомерные поглощающие аппараты. В них используется эффект гидродинамических потерь при перетекании эластомера через малый кольцевой зазор.

Производство эластомерных поглощающих аппаратов в России началось в 90-х годах XX в., и первым стал 73ZW с ходом 90 мм. Позднее был запущен серийный выпуск аппарата 73ZWy2 с ходом 110 мм, который по характеристикам соответствовал классу Т3.

Другим примером эластомерного поглощающего аппарата является АПЭ-95-УВЗ с ходом 95 мм. Еще две модели поглощающих аппаратов выпускает АО «Авиаагрегат». Освоение производства началось с аппарата АПЭ-120-И с ходом 120 мм. Он имеет две внутренние камеры – цилиндрическую и сферическую, что позволило реализовать довольно большую силу статического закрытия. С 2009 г. началось производство аппаратов АПЭ-90-А.

Использование поглощающих аппаратов Т2 и Т3 понижает уровень продольных сил в вагонах, в сравнении с аппаратами класса Т1. Оборудование вагонов для перевозки опасных грузов (в том числе и при продлении их срока службы) такими поглощающими аппаратами значительно уменьшает вероятность возникновения нештатных и аварийных ситуаций, а также понижает степень повреждающего воздействия при их возникновении. Это подтверждает обоснованность требований действующих нормативных документов по оборудованию автосцепного устройства вагонов-цистерн и специализированных вагонов, перевозящих ценные и опасные грузы, поглощающими аппаратами классов Т2 и Т3.

Применение поглощающих аппаратов классов Т2 и Т3 увеличивает остаточный ресурс элементов конструкции вагона, воспринимающих продольную нагрузку, и обеспечивает более безопасное движение тяжеловесного поезда. Вместе с тем высокая стоимость аппаратов классов Т2 и Т3 обусловливает их внедрение только на вагонах для перевозки опасных грузов.

Таким образом, развитие конструкций поглощающих аппаратов, направленное на рост их энергоемкости, является одним из решающих факторов увеличения эффективности использования грузовых вагонов и повышения безопасности движения.

Библиографический список

1. Мачерет Д. А. Анализ долгосрочной динамики скоростей в грузовом движении / Д. А. Мачерет // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2012. – № 5. – С. 66–71.

2. Сендеров Г. К. Анализ причин поступлений грузовых вагонов в текущий отцепочный ремонт / Г. К. Сендеров, Е. А. Поздина, В. Б. Митюхин, В. П. Архипов, Л. Б. Володина // Железнодорожный транспорт. – Сер. Вагоны и вагонное хозяйство. Ремонт вагонов. – 1998. – Вып. № 3–4. – С. 29–44.

3. Клавдиенко О. А. Сохранность вагонного парка: проблемы остаются / О. А. Клавдиенко // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2013. – № 1. – С. 23–25.

4. Беляев В. И. Классификация поглощающих аппаратов автосцепки и безопасность движения грузовых вагонов / В. И. Беляев, Д. А. Ступин, И. А. Харыбин // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2016. – № 2. – С. 18–21.

5. Технические требования на разработку автосцепного устройства грузовых вагонов нового поколения № ЦВА-10/31–99. – М. : МПС России, 1999.

6. НБ ЖТ ЦВ-ЦЛ 022–2000. Устройства автосцепные подвижного состава железных дорог. Нормы безопасности. – М. : МПС России, 2000.

7. Нормы для расчета и проектирования вагонов, железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ГосНИИВ ; ВНИИЖТ, 1996. – 317 с.

8. ОСТ 32.175–2001. Аппараты поглощающие автосцепного устройства грузовых вагонов и локомотивов. Общие технические требования. – М. : МПС России, 2001.

9. ГОСТ 32913–2014. Аппараты поглощающие сцепных и автосцепных устройств железнодорожного подвижного состава. Технические требования и правила приемки. МКС 03.220.30. – М. : Стандартинформ, 2015.

10. ГОСТ 19433–88. Грузы опасные. Классификация и маркировка. – М. : Изд-во стандартов, 1990 ; 2-е изд. – М. : Изд-во стандартов, 2004.

11. Болдырев А. П. Разработка и исследование фрикционно-полимерного поглощающего аппарата ПМКП-110 класса Т1 / А. П. Болдырев, Б. Г. Кеглин, А. В. Иванов // Вестн. ВНИИЖТ. – 2005. – № 4. – С. 40–44.

12. Кеглин Б. Г. Улучшение конструкции поглощающих аппаратов / Б. Г. Кеглин, Л. Н. Никольский, А. Г. Стриженок // Железнодорожный транспорт. – 1980. – № 6. – С. 23–26.

13. Артюх Г. В. Перспективы совершенствования поглощающих аппаратов железнодорожных вагонов / Г. В. Артюх, Е. И. Иванов, Ю. В. Сергиенко, Т. В. Корчагина, В. В. Лысенко // Защита металлур-

гических машин от поломок : межвуз. тематич. сб. науч. трудов. – Мариуполь : ПГТУ, 2012. – Вып. 14. – С. 174–179.

14. Пенкин Н.С. Гуммированные детали машин / Н.С. Пенкин. – М.: Машиностроение, 1977. – 200 с.

References

1. Macheret D.A. Analiz dolgosrochnoi dinamiki skorostei v gruzovom dvizhenii [Analysis of long-term speed dynamics in freight moving]. *Cars and car facilities*, 2012, no. 5, pp. 66–71. (In Russian)

2. Senderov G.K., Pozdina E.A., Mityukhin V.B., Arkhipov V.P. & Volodina L.B. Analiz prichin postuplenii gruzovykh vagonov v tekushchii ottsepochnyi remont [Analysis of reasons of freight cars incoming to current cut repair]. *Railway Transport. Series: Cars and car facilities. Car repairing*, 1998, issue 3–4, pp. 29–44. (In Russian)

3. Klavdienko O.A. Sokhrannost vagonnogo parka: problemy ostayutsya [Safety of car park: problems remain]. *Cars and car facilities*, 2013, no. 1, pp. 23–25. (In Russian)

4. Belyaev V.I., Stupin D.A. & Kharybin I.A. Klassifikatsiya pogloshchayushchikh apparatov avtostsepki i bezopasnost dvizheniya gruzovykh vagonov [Classification of automatic coupling cushioning devices and safety in operation of freight cars]. *Cars and car facilities,* 2016, no. 2, pp. 18–21. (In Russian)

5. *Tekhnicheskie trebovaniya na razrabotku avtostsepnogo ustroistva gruzovykh vagonov novogo pokoleniya* [*Technical requirements for developing automatic coupling device of freight cars of new generation*], *no. ЦВА-10/31–99.* Moscow, Ministry of communication lines of Russia Publ., 1999. (In Russian)

6. NB ZhT ShB-ShL 022–2000. *Ustroistva avtostsepnye podvizhnogo sostava zheleznykh dorog. Normy bezopasnosti* [*Automatic coupling devices of railway rolling stock. Standards of safety*]. Moscow, Ministry of communication lines of Russia Publ., 2000. (In Russian)

7. *Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MCL kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)* [*Standards for accounting and projecting cars, MCL railways of 1520 mm track (unpowered)*]. Moscow, State scientific-research car building institute Publ., JSC "VNIIZHT" Publ., 1996, 317 p. (In Russian)

8. SSS [State Standard Specification] 32.175–2001. *Apparaty pogloshchayushchie avtostsepnogo ustroistva gruzovykh vagonov I lokomotivov. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [*Cushioning devices of automatic coupling of freight cars and locomotives. General technical requirements*]. Moscow, Ministry of communication lines of Russia Publ., 2001. (In Russian)

9. SSS [State Standard Specification] 32913–2014. *Apparaty pogloshchayushchie stsepnykh i avtostsepnykh ustroistv zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Tekhnicheskie trebovaniya i pravila priemki* [*Cushioning mechanisms of coupling and automatic coupling devices of railway rolling stock. Technical requirements and acceptance rules*]. *MKS 03.220.30.* Moscow, Standard inform Publ., 2015. (In Russian)

10. SSS [State Standard Specification] 19433–88. *Gruzy opasnye. Klassifikatsiya i markirovka* [*Cargo dangerous. Classification and labeling*]. Moscow, Standard publishing house, 2004. (In Russian)

11. Boldyrev A.P., Keglin B.G. & Ivanov A.V. Razrabotka i issledovanie friktsionno-polimernogo pogloshchayushchego apparata PMKP-110 klassa T1 [Developing and investigation of friction-polymeric cushioning device of PMKP-110 class T1]. *JSC "VNIIZHT" Bulletin*, 2005, no. 4, pp. 40–44. (In Russian)

12. Keglin B.G., Nikolsky L.N. & Strizhenok A.G. Uluchshenie kostruktsii pogloshchayushchikh apparatov [Improving cushioning devices construction]. *Railway Transport*, 1980, no. 6, pp. 23–26. (In Russian)

13. Artyukh B.G., Ivanov E.I., Sergienko Yu.V., Korchagina T.V. & Lysenko V.V. Perspektivy sovershenstvovaniya pogloshchayushchikh apparatov zheleznodorozhnykh vagonov [Perspectives of perfecting cushioning devices of railway cars]. *Protection of metallurgic machines from breakage: interacademic thematic collection of scientific papers*. Mariupol, Pryazovskyi State Technical University Publ., 2012, issue 14, pp.174–179. (In Russian)

14. Penkin N.S. *Gummirovannye detali mashin* [*Rubberized machine details*]. Moscow, Engine building Publ., 1977, 200 p. (In Russian)

*БОЛДЫРЕВ Алексей Петрович – доктор техн. наук, профессор, apb.tubryansk@gmail.com (Брянский государственный технический университет); СТУПИН Дмитрий Алексеевич – канд. техн. наук, заведующий лабораторией, dstupin@list.ru (ОАО «ВНИИЖТ»); ГУРОВ Александр Михайлович – канд. техн. наук, технический директор, gurov@diprom.ru (ООО «НПП Дипром»).

УДК 629.4.227.11:539.4

Г. М. Волохов, Д. А. Князев, М. В. Тимаков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РОСТА ТРЕЩИНЫ В СПЛОШНОЙ ОСИ ДИАМЕТРОМ 190 ММ ИЗ СТАЛИ EA4T (EN 13261)

Дата поступления: 08.11.2017
Решение о публикации: 15.11.2017

Аннотация

Цель: Получение семейства кривых, описывающих рост трещины на сплошной оси при разных режимах нагружения. **Методы:** Применена графическая обработка экспериментальных данных с дальнейшим программированием на языке VBA, встроенном в пакет MS OFFICE. **Результаты:** Представлены результаты эксперимента, в ходе которого наблюдался рост трещины на сплошной оси диаметром 190 мм, изготовленной из стали EA4T по EN 13261, проведены аппроксимация кривой методом наименьших квадратов, оптимально описывающая экспериментальные точки, и сравнение результатов компьютерного моделирования развития трещины при разных режимах нагружения. Определены параметры зависимости глубины трещины на сплошной оси от количества циклов нагружения. Проведено численное интегрирование уравнения Периса и построены кривые при разных уровнях нагрузки. Оценена живучесть оси с трещиной заданной начальной длины. **Практическая значимость:** На основании полученных данных возможно обоснованное назначение межосмотровых интервалов времени на предмет наличия трещин в осях высокоскоростного подвижного состава.

Ключевые слова: Уравнение Периса, возникновение и развитие трещин, метод наименьших квадратов, оси колесных пар, механическое напряжение, амплитуда цикла.

Grigory M. Volokhov, D. Eng. Sci., head of Department, vnikti_odpi@list.ru; **Dmitry A. Knyazev**, head of Laboratory, vnikti_kp@list.ru; ***Maksim V. Timakov**, junior scientific worker, temev@mail.ru
(Joint-stock Company “All-Russian scientific-research and design-technological rolling stock institute”)
MODELLING FRACTURE GROWTH PROCESS IN 190 MM DIAMETER SOLID AXLE OF EA4T (EN 13261) STEEL

Summary

Objective: Obtaining a family of curves describing fracture growth on solid axle under different regimes of loading. **Methods:** Graphic processing of experimental data with subsequent programming in VBA language imbedded in MS OFFICE packet is applied**. Results:** Results of the experiment during which there was observed fracture growth on 190 mm diameter solid axle made of EA4T по EN 13261 steel are presented. Approximation of the curve by the least-squares method optimally describing experimental points and comparison of computer modelling results of fracture development under different regimes of loading are performed. Parameters of dependence of fracture depth on solid axle on loading cycle quantity are defined. Numerical intergration of Peris equation is done and curves under different levels of loading are built. Survivability of an axle with a fracture of given initial length is estimated. **Practical importance:** Based on data obtained, reasonable assignment of inter-survey time intervals for fracture availability in axles of high speed rolling stock is possible.

Keywords: Peris equation, fracture initiation and development, the least-squares method, wheelset axles, mechanical strain, cycle amplitude.

а *б*

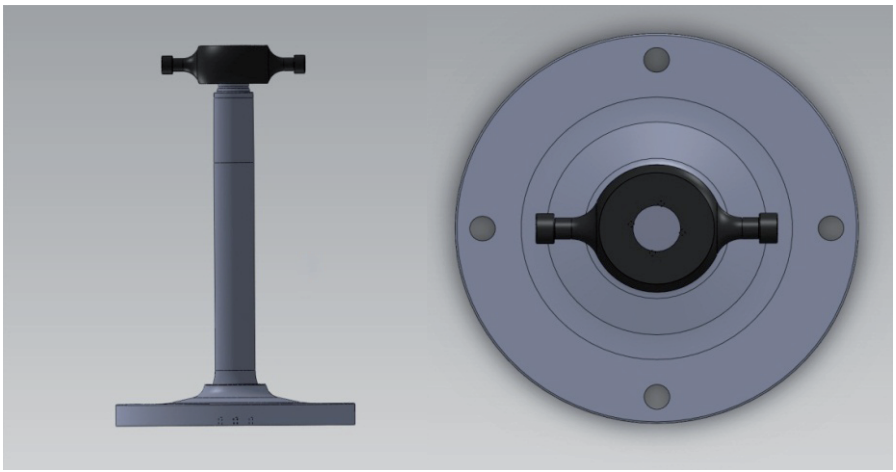


Рис. 1. Модель объекта испытаний: *а* – вид сбоку; *б* – вид сверху

В процессе эксплуатации на поверхности осей возникают механические повреждения, вызванные различными причинами, в том числе фрагментами балласта или осколками льда на большой скорости. Повреждение поверхности может развиться в трещиноподобный дефект, который, в свою очередь, при дальнейшем развитии приведет к инициации усталостной трещины и полной потере несущей способности оси вследствие ее развития. Интервал времени между осмотрами осей на предмет наличия повреждений должен быть гарантированно меньше, чем время, в течение которого потенциально может развиться трещина. Таким образом, результаты исследования в области развития трещин имеют значение при назначении периодичности осмотров. Объектом изучения был фрагмент сплошной оси, выполненной из стали ЕА4Т [1, 2] диаметром 190 мм, запрессованный в технологическую ступицу (рис. 1).

На диаметре 190 мм вблизи заделки в технологическую ступицу было нанесено повреждение, после чего в поврежденном сечении круговым изгибом реализовывалось напряжение амплитудой 160 МПа. От повреждения начинала развиваться трещина [3, 4], длина (глубина) которой измерялась с течением времени. Экспериментальные данные по росту трещины [5] представлены на рис. 2, где за начало отсчета принят момент, после которого наблюдался стабильный прирост длины (глубины) трещины. Пояснения к определению глубины трещины приведены на рис. 3: *OA* и *OC* – радиус оси; часть эллипса *AEC* – фронт трещины внутри оси; точки *A* и *C* – места выхода трещины на поверхность. Принято допущение, что расстояние *ED* приблизительно (длина (глубина) трещины) равно расстоянию *BD*, которое вычислено так: $BD = = R \cdot \left(1 - \cos\frac{< AOC}{2}\right)$. Угол *AOC*, в свою очередь, составляет $< AOC = \frac{ADC}{R}$.

В качестве математической модели скорости роста трещины была принята формула Периса [6, 7] в виде системы уравнений

$$\begin{cases} \dfrac{dl}{dN} = C(\Delta k)^m, \\ \Delta k = \sigma\sqrt{\pi l}. \end{cases} \quad (1)$$

Решение (1) приводит к зависимости количества циклов от длины трещины:

$$N = \frac{1}{C\sigma^m \sqrt{\pi}^m} \cdot \frac{l^{1-\frac{m}{2}}}{1-\frac{m}{2}} + \text{const}. \quad (2)$$

Постоянная интегрирования const в (2) определялась из начальных условий:

$$\text{const} = N_0 - \frac{1}{C\sigma^m\sqrt{\pi}^m} \cdot \frac{l_0^{1-\frac{m}{2}}}{1-\frac{m}{2}}.$$

Для любого значения показателя степени m постоянную C в формуле Периса можно подобрать методом наименьших квадратов [8] таким образом, чтобы теоретическая кривая оптимально проходила по экспериментальным точкам, минимизируя квадрат разности значений экспериментальной и расчетной циклики:

$$C = \frac{1}{\left(1-\frac{m}{2}\right)\cdot\sigma^m\cdot\pi^{\frac{m}{2}}} \cdot \frac{\sum\left(l_i^{1-\frac{m}{2}} - l_0^{1-\frac{m}{2}}\right)^2}{\sum N_i \cdot \left(l_i^{1-\frac{m}{2}} - l_0^{1-\frac{m}{2}}\right)},$$

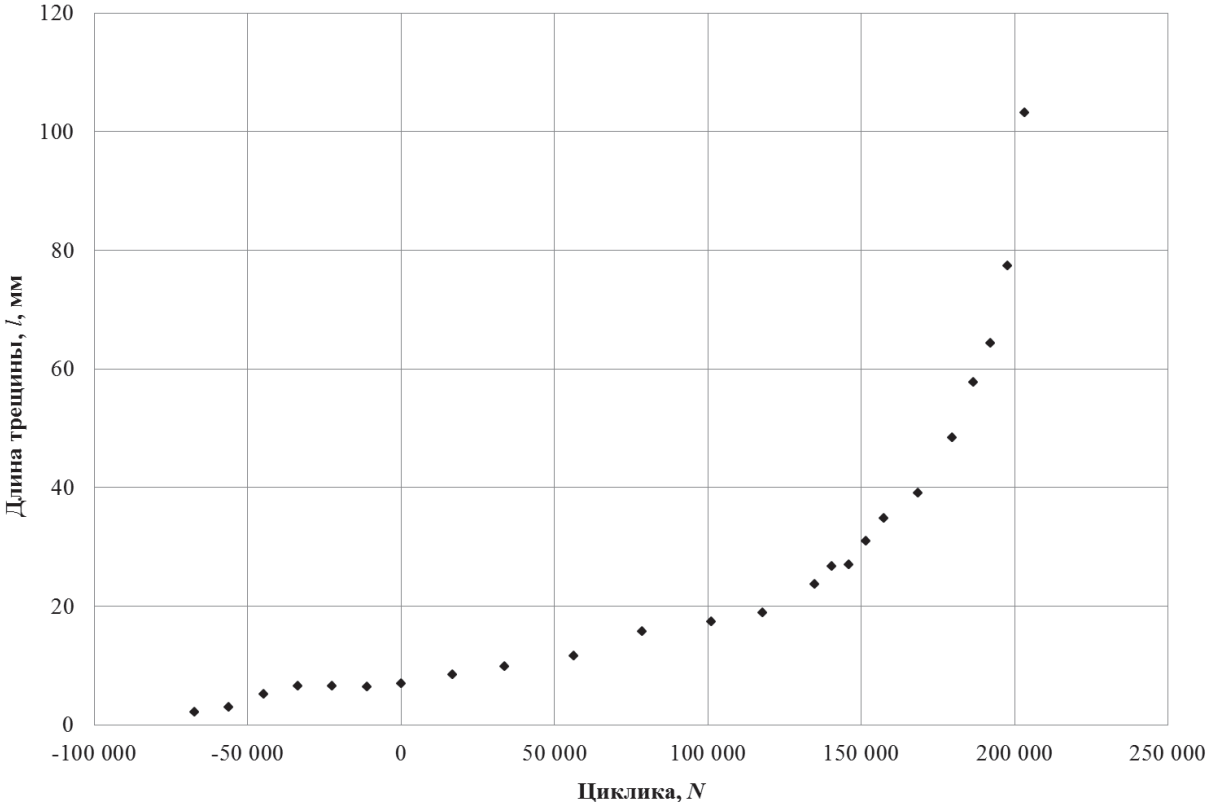


Рис. 2. Процесс роста трещины на сплошной оси

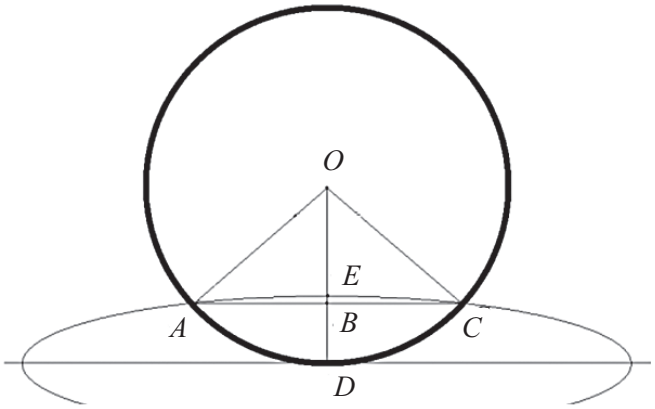


Рис. 3. Определение длины трещины

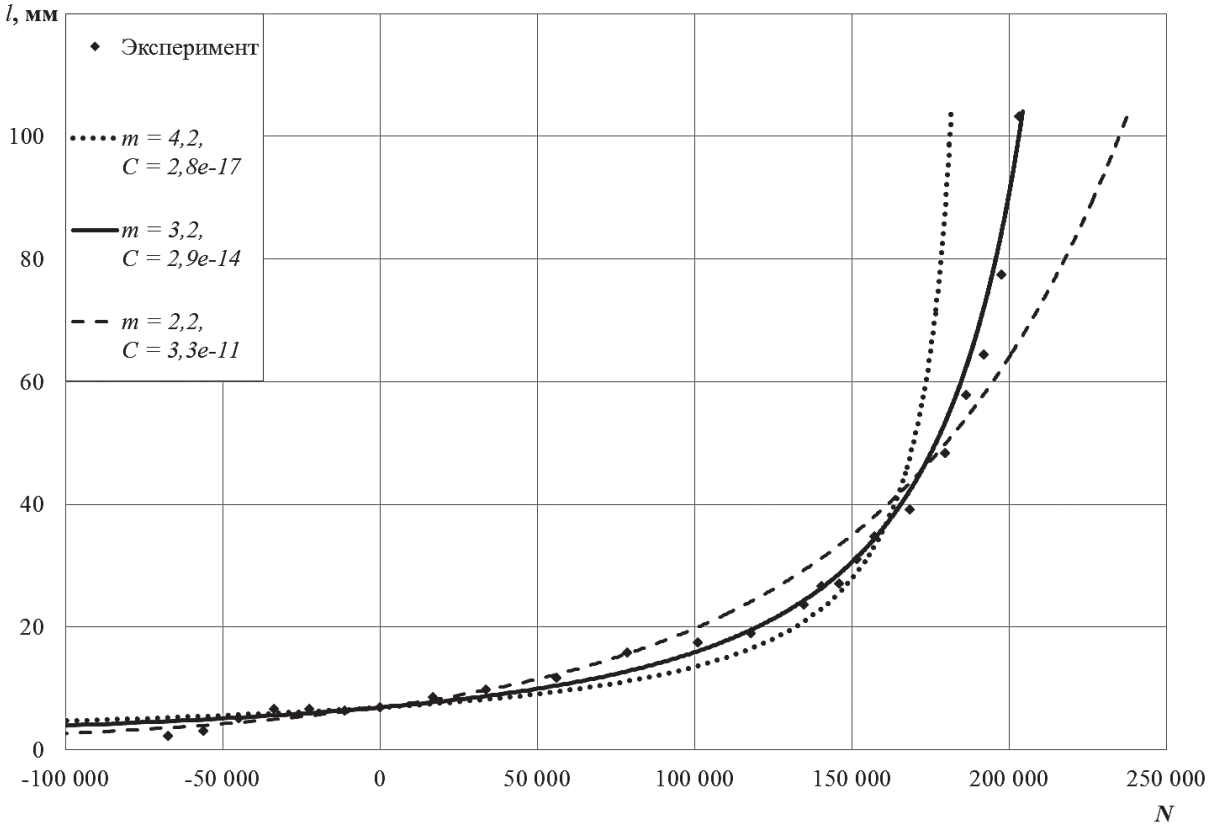


Рис. 4. Представление подбора параметров кривой роста трещины

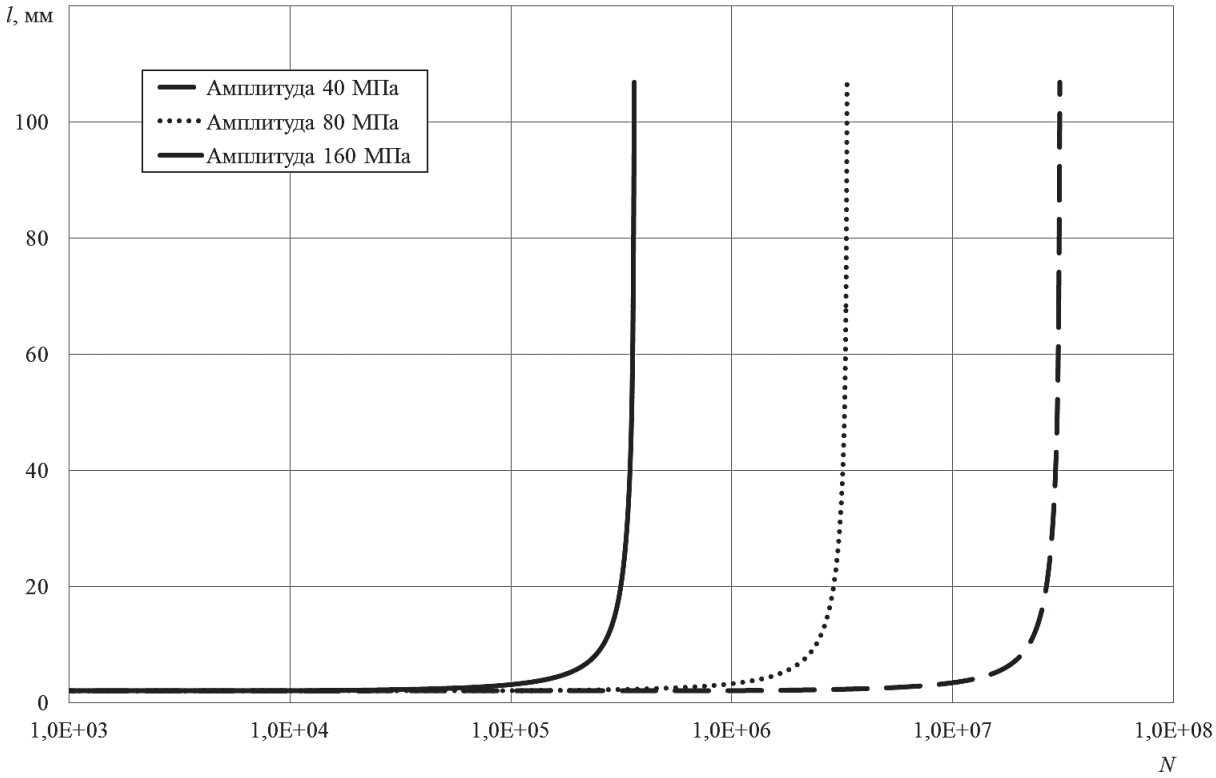


Рис. 5. Моделирование роста трещины при различных амплитудах номинальных напряжений

где l_i – экспериментально измеренная глубина трещины; N_i – экспериментально измеренное количество циклов.

Путем варьирования показателя степени m от 2,2 до 4,2 было получено уравнение кривой $l = l(N)$, оптимально проходящей по экспериментальным точкам (рис. 4).

Сравнивая полученные результаты с данными компании Lucchini [9], можно говорить об удовлетворительном совпадении значений показателя m. Величины m и C были применены для моделирования [10] роста трещины на оси при разных амплитудах номинальных механических напряжений, результаты представлены на рис. 5 и в таблице.

Результаты моделирования роста трещины в сплошной оси

Показатель	Значения		
$\sigma_а$, МПа	160	80	40
$l_{кр}$, мм	95	95	95
N, циклов	$4{,}8 \cdot 10^5$	$4{,}4 \cdot 10^6$	$4{,}1 \cdot 10^7$

Из результатов моделирования видно, что уменьшение амплитуды в 2 раза номинальных механических напряжений увеличивает на порядок время роста трещины до критической длины – половины диаметра оси. Таким образом, создана модель, позволяющая при использовании блока эксплуатационной нагруженности осуществлять моделирование роста трещины в эксплуатации и назначать гарантированно безопасное время между осмотрами на наличие трещины.

Библиографический список

1. EN 13261. Railway applications. Wheelsets and bogies. Product requirements (MOD). 2003.

2. ГОСТ 33200–2014. Оси колесных пар железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия. – Введ. 01.04.2016. – М. : Стандартинформ, 2016. – 42 с.

3. Иванова В.С. Разрушение металлов / В.С. Иванова. – М. : Металлургия, 1979. –168 с.

4. Гудков А. А. Трещиностойкость стали / А. А. Гудков. – М. : Металлургия, 1989. – 376 с.

5. Volokhov G.M. New technologies increasing operational lifecycle of wheelsets / G.M. Volokhov, M.V. Timakov, A.L. Protopopov, D.A. Knyazev. 17th International wheelset congress. September 22–27, 2013. – Kiev, Ukraine (ERWA – European Railway Wheels Association, UNIFE – the European rail industry, KLW – an Interpipe brand). – 2013. – P. 133–137.

6. Хеллан К. Введение в механику разрушения / К. Хеллан ; пер. с англ. – М. : Мир, 1988. – 364 с.

7. Броек Д. Основы механики разрушения / Д. Броек ; пер. с англ. В.И. Дорофеева. – М. : Высшая школа, 1980. – 368 с.

8. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений / Ю.В. Линник. – М. : Физматлит, 1958. – 336 с.

9. Cantini S. Structural reliability assessment of railway axles / S. Cantini, S. Beretta. – Lucchini RS. – 2011. – 208 p.

10. Глушаков С.В. Программирование в среде Widows : учеб. курс / С.В. Глушаков, И.В. Мельников, А.С. Сурядный. – Харьков : Фолио ; М. : АСТ, 2001. – 488 с.

References

1. EN 13261. *Railway applications. Wheelsets and bogies. Product requirements (MOD)*, 2003.

2. SSS [State Standard Specification]. 33200–2014. *Osi kolesnykh par zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [*Wheelset axles of railway rolling stock. General technical requisites*]. Introduction. 01.04.2016. Moscow, StandardInform Publ., 2016, 42 p. (In Russian)

3. Ivanova V.S. *Razrushenie metalla* [*Metal corrosion*]. Moscow, Metallurgy Publ., 1989, 376 p. (In Russian)

4. Gudkov A.A. *Treshchinostoikost stali* [*Steel cracking resistance*]. Moscow, Metallurgy Publ., 1979, 168 p. (In Russian)

5. Volokhov G.M., Timakov M.V., Protopopov A.L. & Knyazev D.A. New technologies increasing operational lifecycle of wheelsets. *The 17th International wheelset congress. September 22–27, 2013.* Kiev, Ukraine (ERWA – European Railway Wheels Associa-

tion, UNIFE – the European rail industry, KLW – an Interpipe brand), 2013, pt 1, pp. 133–137. (In Russian)

6. Hellan K. *Vvedenie v mekhaniku razrusheniya* [*Introduction into fracture mechanics*]. Moscow, Mir Publ., 1988, 364 p. (In Russian)

7. Broek D. *Osnovy mekhaniki razrusheniya* [*Fundamentals of fracture mechanics*]. Tr. from English of V. I. Dorofeeva. Moscow, Higher school Publ., 1980, 368 p. (In Russian)

8. Linnik Yu. V. *Metod naimenshikh kvadratov i osnovy teorii obrabotki nablyudenii* [*The least-squares method and fundamentals of observation processing theory*]. Moscow, PhysMathLit Publ., 1958, 336 p. (In Russian)

9. Cantini S. & Beretta S. *Structural reliability assessment of railway axles*. Lucchini RS, 2011, 208 p.

10. Glushakov S. V., Melnikov I. V. & Suryadnyi A. S. *Programmirovanie v srede Windows* [*Programming in Windows environment*]. Kharkov, Folio Publ.; Moscow, ACT Publ., 2001, 488 p. (In Russian)

ВОЛОХОВ Григорий Михайлович – доктор техн. наук, заведующий отделением динамики, прочности подвижного состава и инфраструктуры, vnikti_odpi@list.ru; КНЯЗЕВ Дмитрий Александрович – заведующий лабораторией колесных пар, vnikti_kp@list.ru; *ТИМАКОВ Максим Владимирович – младший научный сотрудник, temev@mail.ru (АО «Всероссийский научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава»).

УДК 656.222.2

**М. В. Ильичев, М. Е. Гетманова, А. С. Тюфтяев,
Г. А. Филиппов, Д. И. Юсупов**

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

Дата поступления: 08.11.2017
Решение о публикации: 15.11.2017

Аннотация

Цель: Провести анализ методов повышения эксплуатационной стойкости железнодорожных колес. Выявить наиболее перспективные из них. **Методы:** Сравнение результатов эксплуатационных испытаний колес из разных марок сталей, с упрочнением гребня и без. **Результаты:** Выявлено повышение эксплуатационной стойкости колес из новых марок сталей – Т и Л в начале их эксплуатации, которая снижается по мере снятия поверхностных слоев на рабочей поверхности обода при его ремонтной обточке. Проведение плазменной поверхностной термической обработки гребней колесных пар после каждой ремонтной обточки рабочей поверхности обода повышает ресурс колесных пар, оценивавшийся по удельному износу гребня, в 1,6–2,6 раза в зависимости от типа подвижного состава. **Практическая значимость:** Полученные результаты позволяют рекомендовать применение плазменного упрочнения гребня колесных пар после каждой обточки для повышения ее ресурса и увеличения межремонтного интервала. Повсеместное внедрение данной технологии ресурсосбережения как при ремонте локомотивов (тепловозов и электровозов), вагонов электропоездов, так и пассажирских и грузовых вагонов позволит сэкономить существенные средства на простое подвижного состава, затратах на выкатке колесных пар из-под вагонов, обточке колес и т. п.

Ключевые слова: Цельнокатаные колеса, плазменная обработка, ресурсосбережение.

***Maksim V. Ilichev**, Cand. Eng. Sci., imvpl@mail.ru (United High Temperatures Institute RAS); **Marina E. Getmanova**, Engineer-metallurgist, iqs12@yandex.ru (Bardin I. P. Central Scientific-research Ferrous Metallurgy Institute); **Aleksandr S. Tyuftyaev**, D. Eng. Sci., astpl@mail.ru (United High Temperatures Institute RAS); **Georgii A. Filippov**, D. Eng. Sci., professor, iqs12@yandex.ru (Bardin I. P. Central Scientific-research Ferrous Metallurgy Institute); **Damir I. Yusupov**, Cand. Eng. Sci., scientific worker, yusupovDI@ihed.ras.ru (United High Temperatures Institute RAS) CURRENT ISSUES OF INCREASING OPERATING STABILITY OF RAILWAY WHEELS

Summary

Objective: Perform analysis of methods increasing operating steadiness of railway wheels. Ascertain the most perspective of them. **Methods**: Comparison of the results of operational testing of wheels made of different steel types with flange hardening and without it**. Results:** Raising operational steadiness of wheels made of new steel types – T and L at the beginning of their operation which is lowered while removing surface layers on working rim surface during its repair turning is found. Performing plasma surface thermal processing of wheel pair flanges after each repair turning of working rim surface increases the resource of wheel pairs which was assessed according specific flange wear per unit, 1,6–2,6 times more depending on rolling stock type. **Practical importance:** The results obtained allow to recommend applying plasma hardening of a wheel pair flange after each turning for raising its resource and increasing interrepair interval. Mainstreaming the given technology of resource saving both in repairing locomotive (diesel-locomotives and electric locomotives), electric train carriages and passenger and freight carriages

will allow to save essential resources on rolling stock standstill, cost of wheel pair lifting from under the carriages, wheel turning etc.

Keywords: Solid rolled wheels, plasma processing, resource saving.

Техническая политика ОАО «Российские железные дороги» («РЖД») в области железнодорожного транспорта в настоящее время направлена на решение двух основных задач: ввод в эксплуатацию дорог со скоростным движением и создание грузовых вагонов нового поколения с нагрузкой на ось до 30 тс. В связи с этим появилась потребность в цельнокатаных колесах с повышенным уровнем свойств, в частности, с запасом твердости в ободе и усталостной прочности в диске. Кроме того, возник существенный дисбаланс свойств рельса и колеса, который изменил трибометрические характеристики их взаимодействия.

Для повышения уровня твердости обода колеса и приближения его к твердости головки рельса недостаточно только корректировки технологии термической обработки. Необходимо также совершенствование технологии выплавки колесной стали с целью увеличения запаса вязкости. Научно-исследовательские работы, проведенные ОАО «ВМЗ» совместно с ЦНИИчерметом и ВНИИЖТ, создали предпосылки для изготовления колес с более высокой твердостью обода, которые удовлетворяют современным требованиям ОАО «РЖД».

Стали для колес грузовых вагонов. Цельнокатаные колеса для грузовых вагонов изготавливаются в соответствии с ГОСТ 10791 из стали марки 2 и имеют преимущественно структуру перлита: дисперсного на рабочих поверхностях обода и гребня и более грубую в диске и ступице [1]. Такое распределение структур по сечению колеса создается в результате «прерывистой закалки».

Проблему увеличения твердости железнодорожных колес можно решать несколькими путями:

1) при сохранении используемой марки стали 60 Г и структурной основы – перлита твердость можно повысить путем диспергирования перлитной структуры, прежде всего уменьшением межпластиночного расстояния [2] посредством подбора режимов термической обработки [3];

2) ростом содержания углерода в стали;

3) переходом к иной структурной основе, например к мартенситной или бейнитной, при этом возможны варианты сохранения марки стали или замены ее на другую сталь с меньшим количеством углерода.

Другой проблемой при производстве колес является низкая ударная вязкость материала дисков, где при термической обработке формируется грубопластинчатый перлит. Для повышения ударной вязкости необходимо либо диспергировать перлит, либо измельчить размер перлитных колоний, либо понизить содержание углерода в стали. Но последнее противоречит требованиям увеличения твердости обода.

Таким образом, в результате проведенных исследований была разработана сталь для колес грузовых вагонов с значительной твердостью обода марки «Т».

Как показал опыт эксплуатации, «твердые» колеса обладают лучшими физико-механическими свойствами и стойкостью по сравнению с обычными колесами. По результатам анализа эксплуатации колес повышенного качества и твердости на сети железных дорог, проведенного ПКБ ЦВ ОАО «РЖД», установлено:

1) увеличение срока службы цельнокатаных колес не менее чем в 1,7–1,9 раза;

2) возрастание стойкости к образованию контактно-усталостных повреждений в ободе колеса более чем в 2 раза;

3) рост износостойкости гребня колеса более чем в 3 раза;

4) снижение расходов на обточку и текущий (отцепочный) ремонт подвижного состава не менее чем в 2 раза.

Сталь для колес пассажирских вагонов. Целесообразность использования стали марки 1 с пониженным содержанием углерода по ГОСТ 10791 при производстве колес для пассажирских вагонов обусловлена необходимостью обеспечения высокого запаса вязкости. При этом твердость таких колес значительно ниже твердости рельсов, что приводит к повышенному износу при эксплуатации и образованию контактно-усталостных дефектов. Возрастание твердости колес для пассажирских вагонов нужно было обеспечить при условии сохранения или роста запаса вязкости колесной стали. Основными механизмами увеличения твердости стали являются твердорастворное упрочнение, дисперсионное твердение и измельчение структуры. Последнее вызывает также бóльшие пластичность и вязкость стали. К элементам, упрочняющим твердый раствор, относятся углерод, кремний, хром и др. [3].

Исследования показали, что разработанный для пассажирских колес состав стали марки Л, представляющий модификацию стали марки 1 по ГОСТ 10791 (дополнительно легированной кремнием и ниобием), позволяет при соответствующей термической обработке реализовать более высокие механические свойства, чем обеспечивает сталь марки 1. По результатам пробеговых испытаний ресурс новых колес в 1,5–2 раза выше, чем у колес марки 1. Износостойкость поверхности катания и гребня больше, чем в 2 раза. На поверхности катания ободьев колес отсутствуют контактно-усталостные выщербины и повреждения элементов колес в виде трещин, расслоений, отколов. Колеса повышенного качества для пассажирских вагонов обладают высокой эксплуатационной стойкостью, надежностью и обеспечивают безопасность движения.

Современные способы повышения эксплуатационной стойкости железнодорожных колес и бандажей. В процессе эксплуатации подвижного состава в результате взаимодействия рельса и колеса происходит изменение профиля колеса, в основном вследствие износа рабочей поверхности гребня. Потому для придания требуемого профиля колеса подвергают обточке, в результате которой поверхностью обода становится слой металла с меньшей твердостью. Это связано с тем, что из-за дифференцированной закалки обода колеса твердость монотонно снижается от поверхности катания к центру обода колеса. Выход на поверхность слоев металла с меньшей твердостью негативно сказывается на эксплуатационном ресурсе.

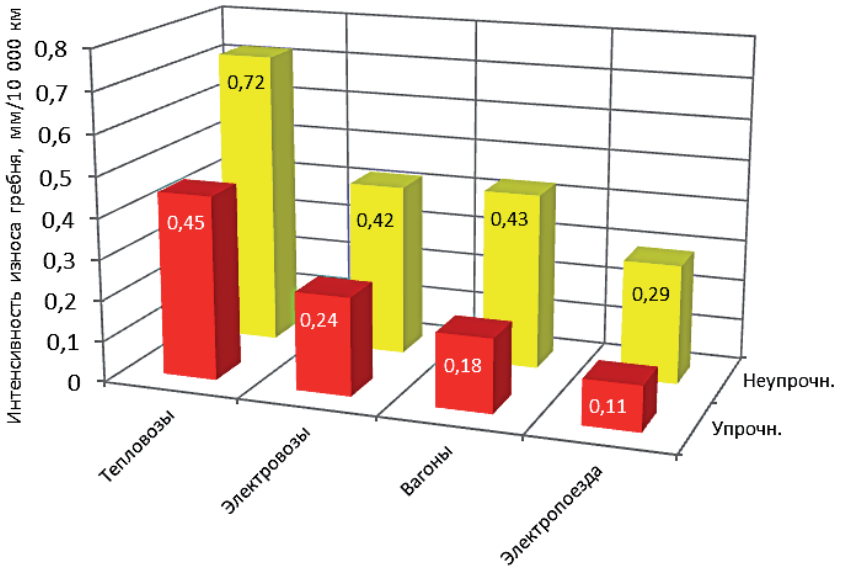
В связи с этим в АО «ВНИИЖТ» и ОИВТ РАН при участии ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина» разрабатывались технологии поверхностного упрочнения гребней колесных пар, наиболее эффективными из которых оказались плазменные способы [4–7]. Плазменное воздействие при поверхностном упрочнении сталей характеризуется высокими скоростями нагрева и охлаждения, малой длительностью пребывания металла при температурах выше критических и возможностью одновременной реализации химико-термической обработки. Важной особенностью получаемых структур является их высокая степень дисперсности.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют, что плазменная технология позволяет создать за один проход широкую полосу с однородным, твердым и износостойким упрочненным слоем. В упрочненной зоне колеса выявлены нитридные фазы, аустенит, фермообразный и пакетный мартенсит, троостомартенсит и троостосорбит.

Для понимания природы возникновения таких специфических структур проводили оценку содержания азота в аустените, образовавшемся после обработки, и исследование влияния деформации в упругой области на изменение фазового состава в поверхностном слое. Полученные результаты позволили сформулировать основные положения структурного механизма повышения уровня свойств упрочненной стали:

– при плазменной обработке поверхностный слой насыщается азотом и образуется широкий спектр структур, обеспечивающий высокий уровень твердости;

– плавная переходная зона обеспечивает прочное сцепление упрочненного слоя с ос-



Интенсивность износа гребней колесных пар подвижного состава Московской железной дороги

новным металлом и является одной из причин повышенного сопротивления разрушению;

– за счет фазового $\gamma \rightarrow \alpha$-превращения в слое высокоазотистого аустенита происходит релаксация напряжений, возникающих при эксплуатации.

Для оценки эффективности плазменного упрочнения помимо пробега колесных пар использовали коэффициент удельного износа гребня на 10 000 км пробега, характеризующий интенсивность износа [8, 9]. Интенсивность износа гребней колесных пар различных типов подвижного состава Московской железной дороги представлена на рисунке.

Таким образом, результаты статистической обработки данных об эксплуатации колесных пар различных типов подвижного состава железных дорог свидетельствуют о том, что плазменная обработка уменьшает интенсивность износа гребней упрочненных колесных пар по сравнению с неупрочненными в 2–3 раза.

Библиографический список

1. Шишов А. А. Технологические аспекты повышения надежности железнодорожных колес / А. А. Шишов, А. Н. Никулин, А. В. Сухов, Г. А. Филиппов // Сталь. – 2007. – № 9. – С. 84–86.

2. Тушинский Л. И. Структура перлита и конструктивная прочность стали / Л. И. Тушинский, А. А. Батаев, Л. Б. Тихомирова. – Новосибирск : Наука, Сиб. отд., 1993. – 300 с.

3. Счастливцев В. М. Структура термически обработанной стали / В. М. Счастливцев, Д. А. Мирзаев, И. Л. Яковлева. – М. : Металлургия, 1994. – 228 с.

4. Иванов П. П. Эффективный способ поверхностного упрочнения железнодорожных колес / П. П. Иванов, Э. Х. Исакаев, В. И. Изотов, Г. А. Филиппов, А. С. Тюфтяев // Сталь. – 2000. – № 1. – С. 63–66.

5. Исакаев Э. Х. Особенности структурообразования и формирования свойств при плазменной обработке углеродистой стали / Э. Х. Исакаев, М. В. Ильичев, А. С. Тюфтяев, Г. А. Филиппов // Материаловедение. – 2003. – № 2. – С. 52–55.

6. Ильичев М. В. Влияние технологических параметров плазменной обработки на формирование структуры и свойств стали типа 60 Г / М. В. Ильичев, О. В. Ливанова, А. С. Тюфтяев, Г. А. Филиппов // Металлург. – 2008. – № 10. – С. 59–62.

7. Гонтарук Е. И. Новая технология поверхностного плазменного упрочнения стальных изделий / Е. И. Гонтарук, М. В. Ильичев, Э. Х. Исакаев, А. С. Тюфтяев, Г. А. Филиппов // Сталь. – 2002. – № 6. – С. 78–81.

8. Антиповский С. В. Технология плазменного упрочнения гребней колесных пар / С. В. Антиповский, А. С. Тюфтяев // Сварочное производство. – 2009. – № 6. – С. 45–48.

9. Антиповский С. В. Плазменное упрочнение как способ увеличения ресурса колесных пар / С. В. Антиповский, Э. Х. Исакаев, В. Ю. Тараканов, А. С. Тюфтяев, А. Э. Яблонский // Локомотив. – 2009. – № 6. – С. 26–27.

References

1. Shishov A. A., Nikulin A. N., Sukhov A. V. & Filippov G. A. Tekhnologicheskie aspekty povysheniya nadezhnosti zheleznodorozhnykh koles [Technological aspects of increasing reliability of railway wheels]. *Steel*, 2007, no. 9, pp. 84–86. (In Russian)

2. Tushinsky L. I., Bataev A. A. & Tikhomirova L. B. *Struktura perlita i konstruktivnaya prochnost stali* [*Perlite structure and constructive steel strength*]. Novosibirsk, Science Publ., 1993, 300 p. (In Russian)

3. Schastlivtsev V. M. *Struktura termicheski obrabotannoi stali* [*Structure of thermically processed steel*]. Moscow, Metallurgy Publ., 1994, 228 p. (In Russian)

4. Ivanov P. P., Isakaev E. Kh., Izotov V. I., Filippov G. A. & Tyuftyaev A. S. Effektivnyi sposob poverkhnostnogo uprochneniya zheleznodorozhnykh koles [Effective technique of railway wheel surface hardening]. *Steel*, 2000, no. 1, pp. 63–66. (In Russian)

5. Isakaev E. Kh., Ilichev M. V., Tyuftyaev A. S. & Filippov G. A. Osobennosti strukturoobrazovaniya i formirovaniya svoist pri plazmennoi obrabotke uglerodistoi stali [Peculiarities of structuring and forming carbon steel properties under plasma processing]. *Material studies*, 2003, no. 2, pp. 52–55. (In Russian)

6. Ilichev M. V., Livanova O. V., Tyuftyaev A. S. & Filippov G. A. Vliyanie tekhnologicheskikh parametrov plazmennoi obrabotki na formirovanie structury i svoist stali tipa 60 Г [Impact of technological parameters of plasma processing on forming 60 G type steel structure and properties]. *Metallurgist*, 2008, no. 10, pp. 59–62. (In Russian)

7. Gontaruk E. I., Ilichev M. V., Isakaev E. Kh., Tyuftyaev A. S. & Filippov G. A. Novaya tekhnologiya poverkhnostnogo plazmennogo uprochneniya stalnykh izdelii [New technology of surface plasma hardening of steel products]. *Steel*, 2002, no. 6, pp. 8–81. (In Russian)

8. Antipovsky S. V. & Tyuftyaev A. S. Tekhnologiya plazmennogo uprochneniya grebnei kolesnykh par [Technology of plasma hardening wheel pair flanges]. *Welding production*, 2009, no. 6, pp. 45–48. (In Russian)

9. Antipovsky S. V., Isakaev E. Kh., Tarakanov V. Yu., Tyuftyaev A. S. & Yablonsky A. E. Plazmennoe uprochnenie kak sposob uvelicheniya resursa kolesnykh par [Plasma hardening as a technique of resource increasing of wheel pairs]. *Locomotive*, 2009, no. 6, pp. 26–27. (In Russian)

*ИЛЬИЧЕВ Максим Валерьевич – канд. техн. наук, imvpl@mail.ru (ОИВТ РАН); ГЕТМАНОВА Марина Евгеньевна – инженер-металлург, iqs12@yandex.ru (ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина»); ТЮФТЯЕВ Александр Семенович – доктор техн. наук, заведующий отделом, astpl@mail.ru (ОИВТ РАН); ФИЛИППОВ Георгий Анатольевич – доктор техн. наук, профессор, iqs12@yandex.ru (ФГУП «ЦНИИчермет им. И. П. Бардина»); ЮСУПОВ Дамир Ильдусович – канд. техн. наук, научный сотрудник, yusupovDI@ihed.ras.ru (ОИВТ РАН).

УДК 621.64

Е. К. Коровяковский, М. А. Хаджимухаметова

К ВОПРОСУ О ЦИРКУЛЯЦИИ ВОЗДУХА ВНУТРИ КОНТЕЙНЕРА ПРИ ОТКРЫТОМ ЛЮКЕ ПОД ОПРЕДЕЛЕННЫМ УГЛОМ ПРИ МОДИФИКАЦИИ КОНТЕЙНЕРОВ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ СКОРОПОРТЯЩИХСЯ ГРУЗОВ

Дата поступления: 31.10.2017
Решение о публикации: 15.11.2017

Аннотация

Цель: Исследовать вопрос циркуляции воздуха внутри контейнера за счет открытия люка под определенным углом. **Методы:** Для численной реализации течения потока воздуха внутри контейнера использована явная конечно-разностная схема Мак-Кормака. Стационарное решение было достигнуто методом установления. Для получения более точных результатов расчета в работе были применены современные модели турбулентности. К ним относятся прямое численное моделирование (Direct Numerical Simulation) и метод моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation). Однако они очень трудоемкие, и поэтому в решении поставленной задачи применены полуэмпирические методы. **Результаты:** Установлено, что циркуляцию воздуха внутри контейнера можно создать с помощью открытого люка контейнера, который фиксируется под определенным углом. Для расчета возникающего турбулентного потока предложена математическая модель. Полученные численные результаты гидродинамических уравнений показывают, что простым конструктивным изменением контейнера можно существенно улучшить внутри него циркуляцию воздуха. **Практическая значимость:** Данное явление дает неплохую перспективу для использования универсальных контейнеров при перевозке плодоовощной продукции, так как обеспечивает циркуляцию воздуха внутри контейнера и тем самым помогает существенно уменьшить порчу продукции за счет регулирования выделения тепла и влаги из самих продуктов.

Ключевые слова: Модель, модификация, универсальный контейнер, плодоовощная продукция, поток воздуха, система координат, система уравнений, циркуляция воздуха, холодная транспортная цепь.

Evgeny K. Korovyakovskiy, Cand. Eng. Sci., associate professor, head of department, prorector, logist@pgups.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University); ***Matluba A. Khadjimukhametova**, Cand. Eng. Sci., associate professor, matluba_78@mail.ru (Tashkent Institute of Railway Transport engineers) ON AIR CIRCULATION INSIDE CONTAINER WITH OPEN MANHOLE UNDER CERTAIN ANGLE IN MODIFYING CONTAINERS FOR PERISHABLE CARGO TRANSPORTATION

Summary

Objective: Investigate the issue of air circulation inside the container at the expense of manhole opening under a certain angle. **Methods:** For numerical realization of air stream flow inside the container explicit finite-difference MacCormack scheme was used. Stationary solution was achieved byarelaxation method. Modern turbulence models were applied for more accurate calculation results They include direct calculation simulation (Direct Numerical Simulation) and large eddy simulation method (Large Eddy Simulation). However, they very labour-intensive and therefore semi-empirical methods were applied in solving a set problem. **Results:** It is stated that air circulation inside the container can be created with the help of an open container manhole, which is fixed under a certain angle. For calculation

of emerging turbulent stream, a mathematical model is suggested. The obtained numerical results of hydrodynamic equations show that the air circulation inside the container can be essentially improved by trivial constructive change. **Practical importance:** The given phenomenon presents reasonably good perspective for using universal containers in transporting horticulture production as it provides air circulation inside the container and thus helps essentially decrease production spoilage at the expense of heat and moisture regulation from products themselves.

Keywords: Model, modification, universal container, horticulture production, air stream, frame of reference, system of equations, air circulation, cold transport chain.

В настоящее время рациональное размещение и оптимизация транспортировки плодоовощных продуктов для Республики Узбекистан и Российской Федерации имеют большое значение [1]. В Узбекистане созданы новые и реконструированы старые линии железных дорог, которые обеспечивают выход поставщиков Узбекистана на любые регионы мира [2]. Поэтому доставка плодоовощной продукции Узбекистана, имеющей большой спрос во всем мире, по железной дороге играет ключевую роль. Сейчас перевозка плодоовощной продукции осуществляется в основном по железной дороге в крытых вагонах. Однако крытые вагоны обладают широким спектром эксплуатации, и ощущается их нехватка для транспортировки плодоовощной продукции. Опираясь на опыт перевозок плодоовощной продукции в крытых вагонах, предлагается воспользоваться универсальными контейнерами, которые имеются в парке АО «Узбекистон темир йуллари». Однако универсальные контейнеры предназначены в основном для транспортировки непродовольственных товаров, и для перевозки скоропортящихся грузов их следует модифицировать. Одним из главных недостатков контейнеров является их недостаточная теплоизоляция, т. е. в солнечные дни они сильно нагреваются, а в холодные дни охлаждаются. Это отрицательно сказывается на качестве перевозимой продукции [3]. Кроме того, циркуляция воздуха внутри контейнера недостаточна для перевозки скоропортящихся грузов. Потому такие контейнеры для перевозки плодоовощной продукции применяются очень редко. Однако исследования, проведенные в последнее время, показали, что, применяя известные аэродинамические эффекты, можно существенно улучшить циркуляцию воздуха и тем самым понизить температуру воздуха внутри контейнера. Для этой цели следует модифицировать контейнер [4] и воспользоваться движением поезда, т. е. энергию относительного движения окружающего воздуха можно направить на циркуляцию воздуха внутри контейнера, что позволит уменьшить температуру и влажность. Следовательно, подвод дополнительной энергии не потребуется.

Разработка и внедрение программы экспорта плодоовощной продукции является одним из главных факторов развития для любой страны. Рекомендуется перевозить плодоовощную продукцию в рефрижераторных контейнерах, с возможностью регулирования температуры и влажности [5]. Такой способ перевозки приводит к удорожанию продукции и трудно осуществим в связи с тем, что парк большинства южных республик СНГ не располагает рефрижераторными контейнерами. Закупка рефрижераторных контейнеров требует больших денежных вложений. Применение контейнеров дает возможность доставлять продукцию с поля до потребителя, что намного улучшает качественные показатели продукта за счет снижения порчи при транспортировке. Однако существующие контейнеры внутри не обеспечивают циркуляцию воздуха. В результате в солнечные дни они быстро нагреваются, что приводит к порче продукции. Для этой цели можно использовать контейнеры с приспособлением для принудительной вентиляции. Но оснащение контейнеров такими вентиляторами тоже требует значительных капитальных

вложений и времени. К данной проблеме добавляется еще и проблема доставки электрической энергии к вентиляторам.

В работе [6] описаны способы модификации контейнеров для перевозки плодоовощных продуктов. Во-первых, рассмотрена обшивка контейнеров изнутри доступным и недорогим теплозащитным материалом в целях уменьшения перегрева воздуха внутри контейнера. Во-вторых, внедрена идея использовать поток воздуха, обтекающий контейнер, для создания циркуляции воздуха внутри контейнера. Для этой цели разработаны люки, вырезанные полоской по ширине на верхней и нижней частях контейнера. Они должны открываться на определенный угол, как показано на рис. 1. Идея данного простого приспособления заключается в том, что при движении контейнера происходит обтекание люков потоком воздуха. При таком движении воздуха на выходе из верхнего люка образуется разрежение воздуха, а на входе в нижний люк – избыточное давление. Следовательно, поток воздуха входит в контейнер через нижний люк и выходит через верхний.

На рис. 1 направление потока показано стрелками. Таким образом, предлагаемое приспособление играет роль вентилятора, способствующего циркуляции воздуха по всему объему контейнера. Циркуляция воздуха приводит к снижению температуры внутри контейнера. Особенно это нужно, как было сказано выше, в солнечные дни, когда за счет солнечной радиации температура внутри контейнера может существенно увеличиться. Однако для достижения описанного эффекта циркуляции воздуха внутри контейнера нужно изучать аэродинамику обтекания люка воздухом. В работе [6] для изучения процесса инжекции в верхнем люке использована однопараметрическая модель турбулентности Прандтля [7]. Данный аэродинамический эффект является сложным, так как он связан с турбулентностью потока. Как видно из рис. 1, поток воздуха имеет двумерный характер. Следовательно, в аэродинамических уравнениях удобно применять полярную систему координат. Данную систему уравнений невозможно решить аналитическим путем. Поэтому исследование проведено численным путем с помощью метода «установления», суть которого заключается в том, что стационарное решение есть решение нестационарной задачи при $t \to \infty$. Для этой цели в уравнении неразрывности введена так называемая «искусственная» сжимаемость потока и записаны нестационарные уравнения Навье–Стокса.

Таким образом, полученное решение при больших значениях времени и будет стационарным. Для численного решения системы в работе применена явная конечно-разностная схема Мак-Кормака [7]. Она является двухшаговой и имеет точность второго порядка. При решении данной задачи на твердых границах ставились условия прилипания, т. е. скорость потока на поверхностях контейнера и люка равна скорости контейнера, а на достаточно большом удалении от них равна нулю.

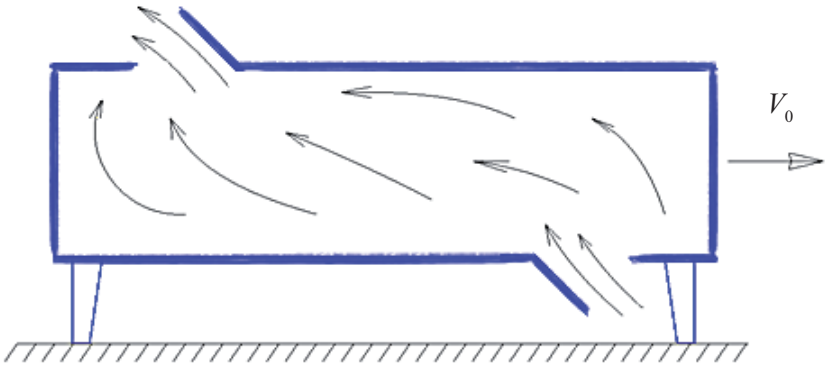


Рис. 1. Картина циркуляции воздуха внутри контейнера

На выходе из люка радиальная скорость потока приравнивалась скорости контейнера. Что касается давления, на бесконечности оно приравнивалось давлению окружающей среды. Давление внутри контейнера также было принято равным атмосферному.

На рис. 2 приведен результат численного решения системы для угла люка 45° (*а*) и 60° (*б*). На нем показана картина течения потока воздуха при движении люка слева направо. Видно, что открытый люк перед собой толкает, а за собой влечет поток воздуха, и возникает вихревой поток.

Эта модель дает хорошие результаты, например, для основного участка свободной струи, где решение имеет автомодельный характер. Но для поставленной задачи при использовании данной модели возможно получить только качественную картину. Для построения более точных результатов расчета необходимо использовать современные модели турбулентности. К таким методам относятся прямое численное моделирование (Direct Numerical Simulation (DNS)) и метод моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation (LES)). Но они очень трудоемкие. Поэтому при решении поставленной задачи аэродинамики применены полуэмпирические методы. В основе всех полуэмпирических моделей турбулентности лежит уравнение Рейнольдса [8, 9]. Однако в нем остаются неизвестными так называемые рейнольдовы напряжения, и полученная система уравнений является незамкнутой. Для ее замыкания предложено большое количество различных математических моделей, основанных на гипотезах Буссинеска, Прандтля, Кармана, Колмогорова и т. д. Проведя их анализ, можно утверждать, что современными и широко используемыми являются модели Спаларта и Аллмараса [10], модель Ментера [11, 12]. С помощью этих моделей получены численные решения для широкого спектра аэродинамических задач. Тем не менее проблему замыкания уравнений Рейнольдса нельзя считать завершенной, потому что во многих случаях требуется введение дополнительных, имеющих только приближенный характер, допущений. Особенно это относится при расчетах закрученных турбулентных потоков или течений при обтекании тел с большой кривизной. Последнее объясняется тем, что практически все существующие модели турбулентности основаны на теории переноса, где не учитываются факторы сил инерции. Потому при исследовании обтекания люка можно ожидать, что полученные результаты такими существующими моделями будут неадекватно описывать реальное течение. Таким образом, обтекание кромки люка относится к течениям с большой кривизной.

В последнее время появилась работа [13], в которой дана новая математическая модель турбулентности. Она основана не на замыкании уравнения Рейнольдса, а на динамике двух жидкостей. То есть идея работы заключается в том, что турбулентный поток представляется

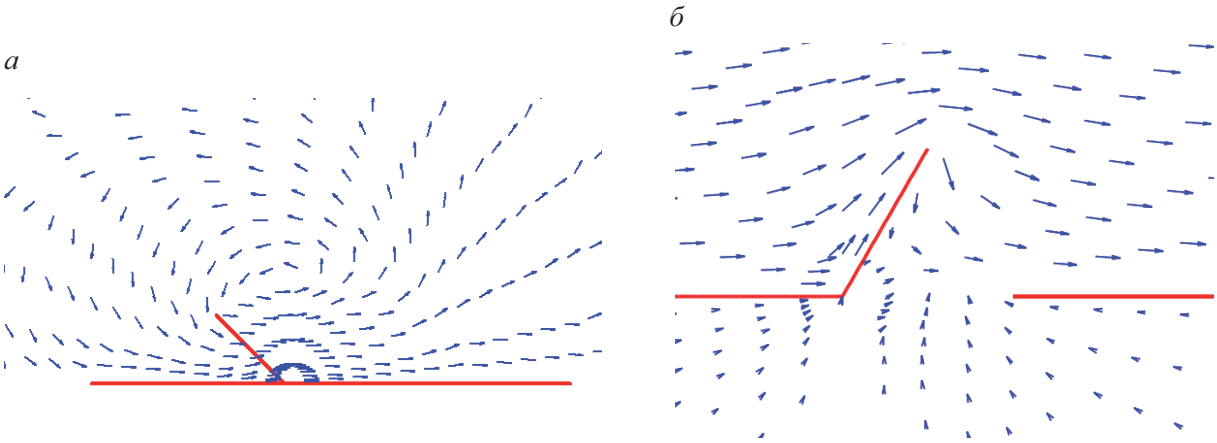


Рис. 2. Картина течения потока воздуха вокруг открытого люка для угла 45° (*а*) и 60° (*б*)

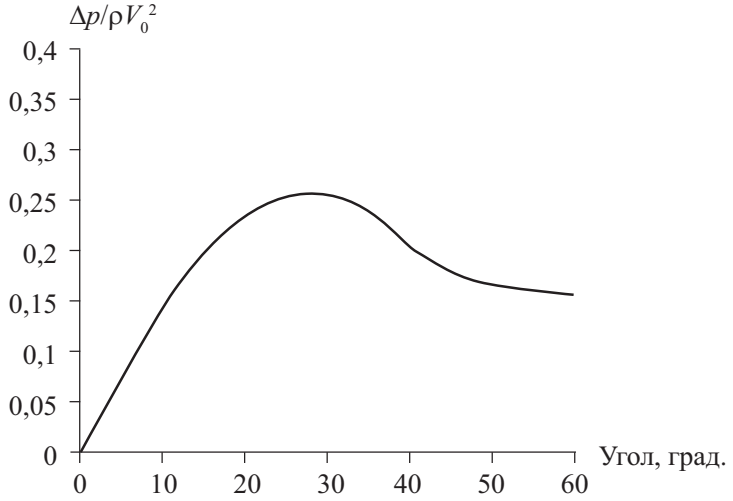


Рис. 3. Изменение давления разрежения в зависимости от угла люка

как движение двух жидкостей с различными скоростями, так называемых молей. Так как эта модель построена на основе динамики, она хорошо описывает вращающиеся потоки и была использована для исследования поставленной задачи, которая состоит из двух частей: первая – обтекание люка внешним потоком, вторая – течение потока внутри контейнера. Для описания первой задачи удобной является полярная система координат. Для решения второй – течения потока внутри контейнера, в которой воздух проходит между грузовыми местами, для математического моделирования примем закон Дарси.

Таким образом, стыкуя две задачи, возможно решить поставленную проблему.

Для численного изучения система уравнений гидродинамики приведена к безразмерному виду. Для этого все скорости отнесены к скорости движения контейнера (V_0), размеры – к ширине люка, а давление – к величине ρV_0^2. Безразмерный коэффициент принят равным $k = 0{,}05$. Численная реализация системы уравнений основана на явной конечно-разностной схеме Мак-Кормака [14]. Стационарное решение было достигнуто методом установления. Для решения уравнений использовался метод итераций верхней релаксации [15], который применялся на каждом временном шаге схемы Мак-Кормака.

На рис. 2, *б* приведен результат численного решения поставленной задачи для угла люка 60°. На нем показана картина течения потока воздуха при движении контейнера. Видно, что открытый люк за счет инжекции высасывает воздух из контейнера. Обратная картина возникает в нижнем люке. Здесь, наоборот, внешний воздух нагнетается внутри контейнера. Таким образом, внешний воздух входит через нижний люк и выходит через верхний.

Для исследования наиболее эффективной работы люка численным путем был произведен расчет разрежения потока при его различных углах наклона. На рис. 3 приведен график зависимости безразмерного значения разрежения давления от значений угла люка. Из него видно, что при открытии люка под углом от 0 до 26° по возрастающей увеличивается эффект инжекции потока. Однако при открытии люка под углом от 26 до 30° достигается максимальный эффект. Для максимального эффекта циркуляции воздуха внутри контейнера рекомендуется открытие люка контейнера под углом 30°.

Таким образом, установлено, что в результате небольших конструктивных решений можно организовать циркуляцию воздуха внутри контейнера. Данное решение позволит транспортировать скоропортящиеся сельскохозяйственные продукты в модифициро-

ванных контейнерах и увеличит экспортный потенциал Республики Узбекистан. Вместе с тем необходимо учитывать требования и принимать меры по сокращению стоянок поезда на станциях до минимума.

Библиографический список

1. Постановление Президента Республики Узбекистан от 15.09.2017 г. № ПП-3281 «О мерах по рациональному размещению сельскохозяйственных культур и прогнозных объемах производства сельскохозяйственной продукции в 2018 году».

2. Статистические данные АО «Узбекистон темир йуллари» за последние 5 лет. – URL : uzrailway.uz (дата обращения : 10.09.2017).

3. Дзюба И. С. Перевозка скоропортящихся грузов / И. С. Дзюба. – Гомель : БелГУТ, 1999. – 22 с.

4. Rahimov R. V. Development of improved technical means for transportation fruits and vegetables / R. V. Rahimov, Z. X. Rakhmatov, M. A. Xadjimuxametova // European Science Review. – Vienna. – 2016. – N 1–2. – P. 175–177.

5. Ибрагимов Н. Н. Совершенствование комплексной системы обеспечения сохранности свежих плодоовощей при транспортировке / Н. Н. Ибрагимов, У. Н. Ибрагимов, М. А. Хаджимухаметова // Труды XVI Междунар. науч.-практич. конференции молодых ученых, студентов и аспирантов «Анализ и прогнозирование систем управления в промышленности и на транспорте». – СПб. : ПГУПС, 2015. – С. 191–199.

6. Маликов З. М. Способы модификации простых контейнеров для перевозки скоропортящихся продуктов / З. М. Маликов, М. А. Хаджимухаметова // Проблемы механики. – 2017. – № 1. – С. 58.

7. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй / Г. Н. Абрамович. – М. : ЭКОЛИТ, 2011. – 720 с.

8. Гарбарук А. В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений : учеб. пособие / А. В. Гарбарук, М. Х. Стрелец, М. Л. Шур. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.

9. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Дрофа, 2003. – 840 с.

10. Spalart P. R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows / P. R. Spalart, S. R. Allmaras // AIAA. – 1992. – P. 439.

11. Menter F. R. Zonal two-equation *k*-ω turbulence models for aerodynamic flows / F. R. Menter // AIAA. – 1993. – P. 2906.

12. Menter F. R. TenYears of Industrial Experience with the SST Turbulence Model / F. R. Menter, M. Kuntz, R. Langtry // Turbulence, Heat and Mass Transfer 4 : Proceedings of the Fourth Intern. Symposium of Turbulence, Heat and Mass Transfer ; eds by K. Hanjalic, Y. Nagano, M. Tummers. – Antalia, Turkey, 2003. – 12–17 October. – P. 625–632.

13. Маликов З. М. Двухжидкостная математическая модель турбулентного потока / З. М. Маликов // Междунар. науч.-технич. конференция по проблемам «Прочность конструкций и сейсмодинамика зданий и сооружений». – Ташкент : Ин-т сейсмостойкости сооружений АН РУз, 2016. – С. 145–149.

14. Anderson D. Computational fluid mechanics and heat transfer : in 2 vol. / D. Anderson, J. Tannehill, R. Pletcher. – M. : Mir, 1990. – Vol. 1. – 774 p.

15. Patankar S. Numerical heat transfer and fluid flow / S. Patankar. – New York : Hemiphere Publishing Corporation, 1980. – 195 p.

References

1. *Postanovlenie prezidenta respubliki Uzbekistan ot 15.09.2017 g. no. ПП-3281 "O merakh po ratsionalnomu razmeshcheniyu selskokhozyaistvennoi produktsii v 2018 godu"* [*Resolution of Uzbekistan republic president of 15.09.2017 g. no. ПП-3281 "On measures for rational agricultural products stowage and prognostic volume of agricultural production in 2018"*] (In Russian)

2. Statisticheskie dannye AO "Uzbekiston temir iyullari" za poslednie 5 let [Statistical data of "Uzbekistan railways", Joint stock Company for the last five years]. URL: uzrailway.uz (accessed: 10.09.2017) (In Russian)

3. Dzyuba I. S. *Perevozka skoroportyashchikhsya gruzov* [*Transportation of perishable cargo*]. Gomel, BelGUT Publ., 1999, 22 p. (In Russian)

4. Rakhimov R. V., Rakhmatov Z. X. & Khadjimukhametova M. A. Development of improved technical means for transportation of fruits and vegetables. *European Science Review.* Vienna, 2016, no. 1–2, pp.175–177.

5. Ibragimov N. N., Ibragimov U. N. & Khadjimukhametova M. A. Sovershenstvovanie kompleksnoi sistemy obespecheniya sokhrannosti svezhikh plodoovoshchei pri transportirovke [Improving a complex system of safekeeping fresh fruits and vegetables in transportation]. *Proceedings of XVI International scientific-practical conference of young scientists, students and postgraduates "Analysis and prognosis of management systems in industry and transport"*. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2015, pp. 191–199. (In Russian)

6. Malikov Z. M. & Khadjimukhametova M. A. Sposoby modifikatsii prostykh konteinerov dlya perevozki skoroportyashchikhsya produktov [Modification techniques of simple containers for perishable products transportation]. *Problems of mechanics*, 2017, no. 1, 2017, p. 58 (In Russian)

7. Abramovich G. N. *Teoriya turbulentnykh strui* [*Theory of turbulent jets*]. Moscow, EKOLIT Publ., 2011, 720 p. (In Russian)

8. Garbaruk A. V., Strelets M. Kh. & Shur M. L. *Modelirovanie turbulentnosti v raschetakh slozhnykh techenii* [*Modelling turbulence in calculations of complicated currents*]. Saint Petersburg, Peter the Great Polytechnic University Publ., 2012, 88 p. (In Russian)

9. Loitsyansky L. G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [*Mechanics of fluid and gas*]. Moscow, Drofa Publ., 2003, 840 p. (In Russian)

10. Spalart P. R. & Allmaras S. R. *A one-equation turbulence model for aerodynamic flows.* USA, AIAA Publ., 1992, 439 p.

11. Menter F. R. *Zonal two-equation k-ω turbulence models for aerodynamic flows*. USA, AIAA Publ., 1993, 2906 p.

12. Menter F. R., Kuntz M. & Langtry R. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model. *Turbulence*, *Heat and Mass Transfer 4*. *Proceedings of the Fourth Intern. Symposium of Turbulence, Heat and Mass Transfer*. Eds by K. Hanjalic, Y. Nagano, M. Tummers. Antalia, Turkey, 2003, 12–17 October, pp. 625–632.

13. Malikov Z. M. Dvukhzhidkostnaya matematicheskaya model turbulentnogo potoka [Two-fluid mathematical model of turbulent flow]. *International scientific-technical conference in problems "Construction strength and seismodynamics of buildings and structures"*. Tashkent, Construction seismic resistance institute AS PYz Publ., 2016, pp. 145–149. (In Russian)

14. Anderson D., Tannehill J. & Pletcher R. *Computational fluid mechanics and heat transfer*. In 2 vol. Moscow, Mir Publ., 1990, vol. 1, 774 p.

15. Patankar S. *Numerical heat transfer and fluid flow.* New York, Hemiphere Publishing Corporation Publ., 1980, 195 p.

КОРОВЯКОВСКИЙ Евгений Константинович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, проректор, logist@pgups.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); *ХАДЖИМУХАМЕТОВА Матлуба Адиловна – канд. техн. наук, доцент, matluba_78@mail.ru (Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта).

УДК 629.4.015:625.1.03

С. В. Кротов, Д. П. Кононов

КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ РЕЛЬСОВОЙ И КОЛЕСНОЙ СТАЛЕЙ

Дата поступления: 05.10.2017
Решение о публикации: 21.11.2017

Аннотация

Цель: Определение количества циклов, при котором наступает контактно-усталостное разрушение поверхности железнодорожного колеса, что позволит избежать моделирования качения его по рельсу и испытаний малых образцов. **Методы:** Установление разрушающего числа циклов повторения напряжений во времени в зависимости от величины напряжений, характера напряженного состояния, параметров цикла и других условий контактирования колеса с рельсом в связи с необходимостью увеличения грузоподъемности грузовых вагонов; накопление экспериментальных данных, их систематизация и статистический анализ; эмпирические зависимости разрушающего числа циклов от удельного контактного давления; сравнение расчетных величин количества циклов с их опытными значениями. **Результаты:** Рассмотрены особенности методики определения параметров взаимодействия образцов из колесной и рельсовой сталей. Приведены данные основополагающих исследований контактно-усталостной долговечности стальных образцов, на основании которых выполнен статистический анализ. Построены эмпирические зависимости разрушающего числа циклов от удельного контактного давления, позволяющие избегать моделирования качения железнодорожного колеса по рельсу и испытаний малых образцов, так как эти испытания требуют больших затрат времени и значительного количества самих образцов. Учтены различия в методиках испытаний, описаны основные этапы решения. Подтвержден вывод о малом влиянии содержания углерода и структуры стали на ее контактно-усталостную долговечность. Определено влияние содержания углерода при малых давлениях. **Практическая значимость:** Полученные зависимости помогут в прогнозировании наступления отказа колесной пары, как наиболее ответственного элемента подвижного состава, когда появляются усталостные выщербины.

Ключевые слова: Контактно-усталостная долговечность, удельное давление, разрушающее число циклов, напряженное состояние.

Sergei V. Krotov, Cand. Eng. Sci., associate professor, svk-19587@yandex.ru (Rostov State Transport University); ***Dmitry P. Kononov**, Cand. Eng. Sci., associate professor, d_kononov@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) CONTACT FATIGUE DURABILITY OF TRACK AND WHEEL STEEL

Summary

Objective: Definition of cycle quantity under which contact fatigue damage of railway wheel surface sets in that allows to avoid modelling its rolling on a rail and testing small specimens. **Methods:** Establishing damaging cycle number of strain repetition over time depending on intensity of stress, character of stress condition, cycle parameters and the other conditions of wheel contacting with a rail in connection with necessity of increasing freight car carrying load; accumulation of experimental data, their systemization and statistical analysis; empirical dependence of damaging cycle number on specific contact pressure; comparison of predicted values of cycle quantity with their experimental values. **Results:** Procedure peculiarities of defining parameters of interaction between wheel and rail steel specimens are considered. Basic investigation data of contact fatigue durability of steel specimens on whose base statistical analysis is

performed, are given. Empirical dependence of damaging cycle number on specific contact pressure allowing to avoid modelling railway wheel rolling on a rail and testing small specimens because this kind of testing is very much time consuming and demands considerable quantity of specimens themselves is built. Differences in testing procedures are taken into consideration, main solution stages are described. The conclusion about little influence of carbon content and steel structure on its contact fatigue durability is proved. The influence of carbon content under small pressure is determined. **Practical importance:** The dependences obtained will help predict the beginning of wheel pair failure as the most responsible element of rolling stock when fatigue dents appear.

Keywords: Contact-fatigue durability, specific pressure, damaging cycle number, stress condition.

Введение

Установление разрушающего числа N циклов повторения напряжений во времени в зависимости от напряжений, характера напряженного состояния, параметров цикла и других условий контактирования колеса с рельсом является весьма актуальным, особенно в связи с необходимостью увеличения грузоподъемности грузовых вагонов [1–9]. Зависимость $N = \varphi(\sigma_{экв})$, где $\sigma_{экв}$ – эквивалентное напряжение, на данной стадии развития теории контактно-усталостного разрушения не может быть решена теоретически. Приходится прибегать к моделированию качения колеса по рельсу, включая и испытания малых образцов. Эти испытания требуют больших затрат времени и значительного количества самих образцов. Потому накопление экспериментальных данных, их систематизация и тщательный анализ позволят получить эмпирическую и аналитическую зависимости $N = \varphi(\sigma_{экв})$ и перенести их в практику расчета колес грузовых вагонов на контактно-усталостную долговечность.

Анализ экспериментальных исследований по контактной усталости образцов колесной стали и вагонных колес

Одними из первых в нашей стране были испытания на контактную выносливость, выполненные в 1956 г. [10]. Испытывались дисковые образцы из колесной стали диаметром $d = 80$ мм и рельсовой стали диаметром $d = 100$ мм толщиной $t = 22$ мм. Целью таких испытаний была сравнительная оценка влияния на величину разрушающего цикла нагружений N содержания углерода и структуры в колесной стали при различных видах термообработки материала колесной стали. В результате испытаний было установлено, что сопротивляемость стали контактно-усталостным выкрашиваниям несколько возрастает с повышением содержания углерода (до 0,70 %) и твердости (до НВ = 285). Более высокую контактно-усталостную долговечность имеют образцы с мелкопластинчатой структурой перлитной составляющей по сравнению с зернистой структурой. Однако следует отметить, что при высоких удельных давлениях P_0, превышающих 80 кг/мм^2, число циклов разрушения N очень мало зависит от содержания углерода (в пределах 0,53–0,70 %), а также от твердости стали (при НВ = 265–285) по Бринеллю.

Экспериментальные данные по числу циклов разрушения N [10], полученные только при двух уровнях давлений P_0, не позволят построить кривые $N - P_0$ и, следовательно, дать их точную, а не приблизительную аналитическую аппроксимацию. Авторы [10] считают, что наличие сил трения в контакте снижает число циклов разрушения N на величину порядка 30 %.

Также большой объем работ по моделированию контакта колеса и рельса был выполнен на кафедре «Технология металлов» ПГУПС [11–14].

В сборнике [15], выполненного под руководством Т. В. Ларина (ВНИИЖТ), приведены

ТАБЛИЦА 1. Числа циклов до разрушения образцов

Нагрузка, P, кг	Удельное давление, P_0, кг/мм^2 (МПа)	Разрушающее число циклов $N \cdot 10^{-6}$			
		норм.	з.о.н.	з.пр.н.	Среднее для норм. и з.о.н.
50	51,2 (502)	18,50/19,26 (18,88)	15,54/17,26 (16,40)	4,07/13,16 (13,16)	17,64
100	72,4 (710)	6,82/5,08 (5,95)	5,21/8,64 (6,92)	2,42/5,19 (5,19)	6,46
150	88,7 (870)	2,16/3,43 (2,80)	2,84/2,46 (2,65)	2,2/2,24 (2,24)	2,70

результаты сравнительных испытаний натурных образцов, вырезанных у самой поверхности (на глубине 15 мм) обода колеса вагона и из середины обода. Колеса получили разные виды термообработки: нормализацию (норм.), закалку с отдельного нагрева (з. о. н.), закалку с прокатного нагрева (з. пр. н.). Образцы имели форму дисков: испытуемый с $d = 40$ мм и $t = 10$ мм, нажимной (контртело) с $d = 50$ мм и $t = 6$ мм. В зону контакта капельно подавалась смазка (0,75 керосина и 0,25 машинного масла). За окончание испытаний принималось распространение типичных по размерам выщербин по всей поверхности качения.

Следует отметить значительный разброс опытных данных по числу N для всех структур стали и напряжений. Наименьшую величину N имеют образцы из колес, закаленных с прокатного нагрева, особенно образцы, вырезанные у поверхности обода. Это связано не только с крупнозернистой структурой, но, возможно, и с наличием микротрещин в поверхностном слое обода. За средние значения N в табл. 1 для этого случая взяты числа циклов до разрушения образцов из середины обода.

Установление эмпирических зависимостей между удельным давлением и числом разрушающих циклов нагружений

Используем осредненные опытные данные [15], указанные в последнем столбце табл. 1, для получения эмпирической зависимости между наибольшим удельным давлением на полоске контакта P_0 и числом циклов N, при котором начинается усталостное выкрашивание по всей поверхности качения образцов. С этой целью была построена кривая зависимости N от P_0 (рисунок).

Согласно ГОСТ 25.502–79, на методы испытаний на контактную усталость образцов такие кривые предлагается строить или в двойных логарифмических, или в полулогарифмических координатах. В соответствии с этим кривые контактно-усталостной долговечности могут быть аппроксимированы эмпирическими формулами вида

$$N = C \cdot P_0^{-m}$$

либо

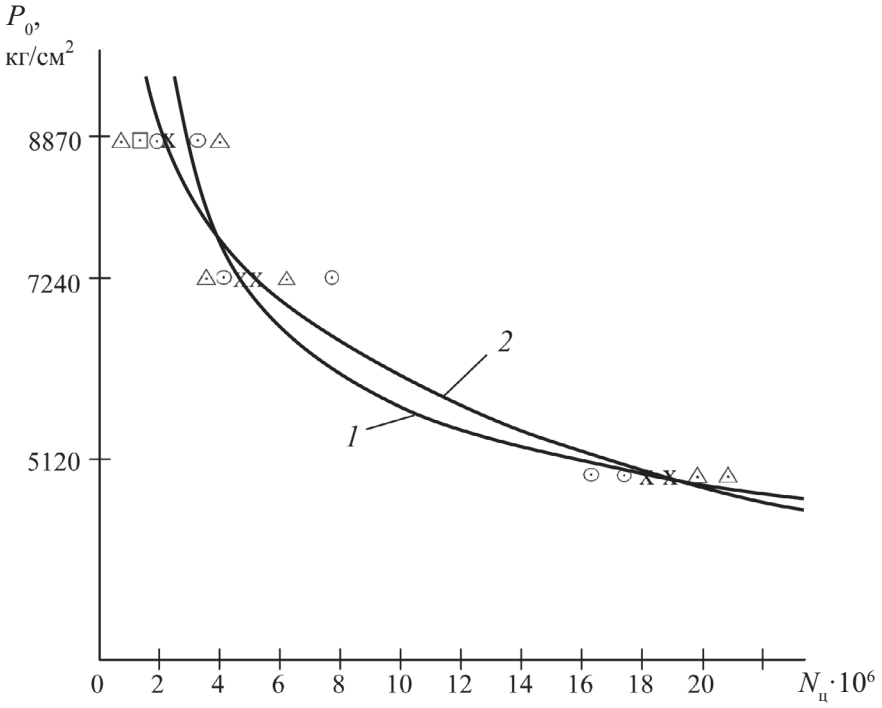
$$N = 10^{a - bP_0}.$$

Для определения параметров циклов нагружений C, m, a, b использован метод средних. В итоге получены следующие эмпирические формулы:

$$N = 1{,}3 \cdot 10^{13} \cdot P_0^{-3{,}41}, \quad (1)$$

$$N = 10^{8{,}375 - 0{,}02185 P_0}. \quad (2)$$

Здесь выражение (1) – это аппроксимирующая кривая *1* на рисунке, а выражение (2) – кривая *2*.



Зависимость разрушающего числа циклов от удельного давления:
1 и *2* – аппроксимирующие кривые

Приведем вычисленные по ним значения N при испытуемых предельных давлениях P_0:

P_0, кг/мм^2	51,2	72,4	88,7
$N_{оп} \cdot 10^6$	17,64	6,46	2,70
$N \cdot 10^6$ по (1)	19,30	5,91	2,96
Отклонение от $N_{оп}$, %	–9,40	–8,50	–9,60
$N \cdot 10^{-6}$ по (2)	18,03	6,21	2,74
Отклонение от $N_{оп}$, %	–2,21	3,87	–1,30
$N \cdot 10^6$ по (3)	4,17	2,02	1,15

Сравнение расчетных величин N с их опытными значениями показывает, что эмпирическая формула (2) с меньшей погрешностью (3,87 % против 9,60 % при вычислении по (1)) и точнее по кривизне аппроксимирует опытную кривую.

В последней строке $N \cdot 10^6$ (см. выше) приведены величины N, вычисленные по полученной нами эмпирической формуле

$$N = 10^{7,381-0,014873P_0}, \qquad (3)$$

аппроксимирующей опытные данные работы [10]. Разница в величинах N в 2–4 раза в сравнении с $N_{оп}$ работы [15] объясняется, во-первых, разбросом опытных данных, обусловленных статистической природой усталостной прочности; во-вторых, тем обстоятельством, что в опытах работы [15] за критерий для определения величины N принималось образование множества выкрашиваний на дорожке качения, в то время как авторы работы [10] за критерий принимали одиночную выщербину. В экспериментах Г. П. Сажиной [16] со стальными дисковыми образцами (сталь 45, НВ = 300) при P_0 = 89 кг/мм^2 было доказано, что число циклов $N_к$, необходимое для образования интенсивных разрушений значительной части поверхности качения ($N_к = 2 \cdot 10^6$), превышает в 2,5 раза число циклов $N_н = 0,85 \cdot 10^6$, при котором возникает одиночное выкрашивание. С учетом этого обстоятельства различие в величинах N работ [10] и [15] становится уже не столь существенным.

Эмпирические формулы (1), (2) получены нами на опытных данных конкретного, частного случая соприкасания сжимаемых тел по полоске контакта. Первые их сомножители не зависят от удельного давления P_0 и

определяются физико-механическими свойствами стали. Вторые сомножители отражают влияние характера напряженного состояния испытуемых образцов в зоне контакта, соответствующего конкретным условиям проведения эксперимента, и только ради простоты вычислений выражены через P_0.

Переход к эмпирическим зависимостям разрушающих циклов нагружений

Чтобы сделать формулы (1) и (2) пригодными для вычисления разрушающего числа циклов нагружений N при других условиях соприкасания тел, надо удельное давление P_0 обязательно выразить через эквивалентные напряжения $\sigma_{экв}$. Дело в том, что в условиях сложного (объемного или плоского) напряженного состояния и при отсутствии сил трения на площадке контакта P_0 является одним из главных напряжений, например $\sigma_3 = \left|\sigma_z^{max}\right|$.

Теперь уже считается доказанным, что начало возникновения микротрещин, переходящих по мере многократного повторения циклов нагружения в макротрещины, приводящие к усталостному выкрашиванию, обусловлено пластическими деформациями металла по плоскостям сдвига в тонком поверхностном слое. Переход же материала в предельное состояние текучести определяется величиной эквивалентного напряжения $\sigma_{экв}$. Наиболее просто $\sigma_{экв}$ выражается через главные напряжения $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ по гипотезе наибольших касательных напряжений. Величиной $\sigma_{экв} = \sigma_1 - \sigma_3$ и будем оценивать степень опасности напряженного состояния в точках зоны контакта тел.

Наиболее напряженными в зоне линейного контакта будут:

1) центральная точка, для которой при плоской деформации (соприкасание цилиндрических тел одинаковой длины) $\sigma_{экв} = 0{,}4\ P_0$, а при плоском напряженном состоянии (соприкасание тонких дисков равной толщины) $\sigma_{экв} = 1 \cdot P_0$.

2) точка на малой глубине $z = 0{,}5b$, удаленная от середины полоски контакта на $y = 0{,}87b$ (b – полуширина полоски контакта); здесь $\sigma_{экв} = 0{,}518\ P_0$.

Как уже указывалось, в опытах [15] использовались диски разной толщины и их соприкасание имело место не по всей ширине (t = = 10 мм), а лишь ее части (l = 6 мм). Такая контактная задача занимает промежуточное положение между плоской деформацией и плоским напряженным состоянием. На этом основании принимаем для центральной точки $\sigma_{экв} \approx 0{,}7\ P_0$, для поверхностной точки сохраняем $\sigma_{экв} = 0{,}518\ P_0$. Таким образом, $\sigma_{экв} \approx$ $\approx (0{,}52–0{,}7)P_0$. В тех случаях, когда качение сопровождается трением, различие в величинах $\sigma_{экв}$ первой и второй точек практически исчезает.

Следовательно, в условиях опытов [2] между P_0 и $\sigma_{экв}$ имело место соотношение

$$P_0 \approx \frac{\sigma_{экв}}{0{,}52 - 0{,}7}.$$

Подставляя это значение P_0 в формулу (2), представим ее в виде, пригодном не только для частного случая опытов [2], но и для соприкасания тел с любой формой контактного пятна, в том числе и эллиптического:

$$N = 10^{8{,}375} \cdot 10^{-(0{,}0312-0{,}0422)\sigma_{экв}}. \qquad (4)$$

О закономерности соотношений числа циклов разрушающих нагружений в зависимости от повышения нагрузки на ось и колесо

Воспользуемся формулой (4) для установления связи между нагрузкой P на колесо вагона и числом циклов N до возникновения контактно-усталостного выкрашивания поверхности катания. Соотношение между P и N будет меняться в зависимости от изменения величины $\sigma_{экв}$. Для получения интересующей нас зависимости рассмотрим частный случай чистого (без скольжения) качения (в плоско-

ТАБЛИЦА 2. Значения числа циклов разрушающих нагружений

Параметр	Значение			
Нагрузка, P, т	10	16	20	25
$N \cdot 10^6$	9,66	5,61	4,21	3,08
$\frac{N_i}{N_{i+1}} = \eta_N$	1,72	1,33	1,37	
$\frac{P_i + 1}{P_i} = \eta_P$	1,60	1,25	1,25	
η_N / η_P	1,075	1,064	1,096	

сти круга катания) колеса диаметром 950 мм по рельсу, головка которого очерчена радиусом 300 мм. В этом случае контурный эллипс пятна контакта характеризуется таким соотношением полуосей:

$$\beta = \frac{b}{a} \approx 0,7365.$$

При этом эквивалентное напряжение на конце большой оси ($\sigma_{экв} = 0,278\ P_0$) будет больше, чем в центре ($\sigma_{экв} = 0,23\ P_0$), а максимальное удельное давление связано с нагрузкой на колесо зависимостью $P_0 = \left[5,5 \cdot P^{1/3}\right]$ кг/мм^2. При этих данных формула (4) принимает вид

$$N = 10^{8,375} \cdot 10^{-0,06452 P^{1/3}}. \qquad (5)$$

Результаты вычислений по формуле (5) для четырех значений нагрузок на колесо приведены в табл. 2.

Представим данные табл. 2 в следующем виде:

$$\frac{N_i}{N_j} = (1,064 \div 1,096)\frac{P_j}{P_i}. \qquad (6)$$

Заключение

Из формулы (6) можно сделать вывод, что число циклов, при котором наступает контактно-усталостное разрушение поверхности колеса, практически обратно пропорционально нагрузке на колесо.

Однако следует иметь в виду, что эти данные получены при чистом качении, без скольжения. Влияние сил трения внесет коррективы в величину коэффициента η = 1,064–1,096 и будет рассмотрено в дальнейшем.

Библиографический список

1. Воробьев А. А. Влияние термообработки на свойства колесной стали при ремонте / А. А. Воробьев, Д. А. Жуков, А. А. Соболев // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2014. – № 19. – С. 36–38.

2. Иванов И. А. Математическое моделирование фрактально-кинетических процессов усталостного разрушения цельнокатаных колес / И. А. Иванов, Д. П. Кононов, Н. Ю. Шадрина // Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты : материалы XI Междунар. науч.-технич. конференции. – 2016. – С. 112–117.

3. Жуков Д. А. Влияние термоциклической обработки на структуру колесной стали в процессе ремонта / Д. А. Жуков, И. А. Иванов, Д. П. Кононов, А. А. Соболев // Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты : материалы XI Междунар. науч.-технич. конференции. – 2016. – С. 53–55.

4. Губенко С. И. Влияние неметаллических включений в стали на коррозионную стойкость и усталостную прочность железнодорожных колес /

С. И. Губенко, И. А. Иванов, Д. П. Кононов // Наука и техника транспорта. – 2016. – № 4. – С. 17–26.

5. Жуков Д. А. Параметры качества поверхностного слоя обода цельнокатаного колеса / Д. А. Жуков, И. А. Иванов // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2016. – № 23. – С. 3–8.

6. Богданов А. Ф. Улучшение свойств металла обода колесных пар тягового подвижного состава / А. Ф. Богданов, А. М. Будюкин, И. А. Иванов, Д. А. Жуков, С. В. Урушев // Бюл. результатов науч. исследований. – СПб. : ПГУПС, 2014. – № 1 (10). – С. 22–30.

7. Губенко С. И. Особенности износа поверхности катания цельнокатаных колес / С. И. Губенко, И. А. Иванов, А. А. Соболев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2013. – Вып. 1 (34). – С. 73–84.

8. Кононов Д. П. Повышение безопасности движения железнодорожного транспорта за счет увеличения усталостной прочности цельнокатаных колес / Д. П. Кононов, Н. Ю. Шадрина // Бюл. результатов науч. исследований. – СПб. : ПГУПС, 2014. – № 1 (10). – С. 6–10.

9. Кононов Д. П. Повышение безопасности движения железнодорожного подвижного состава за счет увеличения безотказности цельнокатаных колес/ Д. П. Кононов // Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты : тез. докл. VIII Междунар. науч.-технич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2013. – С. 130–132.

10. Кислик В. А. Выбор стали для вагонных колесных пар / В. А. Кислик, А. И. Кармазин // Железнодорожный транспорт. – 1956. – № 8. – С. 33–37.

11. Воробьев А. А. Математическое моделирование параметров контакта колеса с рельсом для различных условий эксплуатации вагонов / А. А. Воробьев // Вестн. Ин-та проблем естественных монополий. – М. : Техника железных дорог, 2016. – № 1 (33). – С. 34–41.

12. Кушнер В. С. Влияние структуры и механических характеристик колесных сталей на изнашивание и режимы восстановления профиля колесных пар : монография / В. С. Кушнер, А. А. Крутько, А. А. Воробьев, С. И. Губенко, И. А. Иванов, Д. Е. Керенцев ; под ред. И. А. Иванова, В. С. Кушнера. – Омск : ОмГТУ, 2015. – 224 с.

13. Орлова А. М. Определение параметров контакта колеса с рельсом для различных условий эксплуатации полувагона / А. М. Орлова, А. А. Воробьев, А. В. Саидова, Д. Е. Керенцев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2015. – Вып. 2 (43). – С. 74–84.

14. Будюкин А. М. Процессы изнашивания поверхности контакта колеса и рельса / А. М. Будюкин, А. А. Воробьев, И. А. Жучков // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте подвижного состава РЖД. – СПб. : ПГУПС, 2016. – С. 13–16.

15. Ларин Т. В. Цельнокатаные железнодорожные колеса / Т. В. Ларин, В. П. Девяткин, В. Н. Кривошеев, И. В. Наумов, В. И. Чалых // Труды ЦНИИ МПС. – Вып. 124. – М. : Трансжелдориздат, 1956. – 187 с.

16. Сажина Г. П. Испытание на контактную долговечность / Г. П. Сажина // Контактная прочность машиностроительных материалов. – М. : Наука, 1964. – С. 58–67.

References

1. Vorobev A. A., Zhukov D. A. & Sobolev A. A. Vliyanie termoobrabotki na svojstva kolesnoj stali pri remonte [Impact of thermal processing on wheel steel properties in repair]. *New materials and technologies in machine building*, 2014, no. 19, pp. 36–38. (In Russian)

2. Ivanov I. A., Kononov D. P. & Shadrina N. Yu. Matematicheskoe modelirovanie fraktalno-kineticheskikh protsessov ustalostnogo razrusheniya tselnokatanykh koles [Mathematical modelling fractal-kinetic processes of fatigue damaging of solid-rolled wheels]. *Rolling stock of the XXIth century: ideas, requirements, projects. Materials of the XIth International scientific-technical conference*, 2016, pp. 112–117. (In Russian)

3. Zhukov D. A., Ivanov I. A., Kononov D. P. & Sobolev A. A. Vliyanie termotsiklicheskoj obrabotki na strukturu kolesnoj stali v protsesse remonta [Impact of thermal processing on wheel steel structure in repair]. *Rolling stock of the XXIth century: ideas, requirements, projects. Materials of the XIth International scientific-technical conference,* 2016, pp. 53–55. (In Russian)

4. Gubenko S. I., Ivanov I. A. & Kononov D. P. Vliyanie nemetallicheskikh vklyuchenij v stali na korro-

zionnuyu stojkost i ustalostnuyu prochnost zheleznodorozhnykh koles [Impact of non-metal inclusions into steel on corrosion stability and fatigue durability of railway wheels]. *Science and Engineering of Transport,* 2016, no. 4, pp. 17–26. (In Russian)

5. Zhukov D.A. & Ivanov I.A. Parametry kachestva poverkhnostnogo sloya oboda tselnokatanogo kolesa [Parameters of surface layer quality of solid-rolled wheel rim]. *New materials and technologies in machine building*, 2016, no. 23, pp. 3–8. (In Russian)

6. Bogdanov A.F., Budyukin A.M., Ivanov I.A., Zhukov D.A. & Urushev S.V. Uluchshenie svojstv metalla oboda kolesnyh par tyagovogo podvizhnogo sostava [Improving metal properties of wheel pair rim of drag-out rolling stock]. *Bulletin of scientific investigation results,* 2014, no. 1 (10), pp. 22–30. (In Russian)

7. Gubenko S.I., Ivanov I.A. & Sobolev A.A. Osobennosti iznosa poverkhnosti kataniya tselnokatanykh koles [Wear-out peculiarities of volution surface of solid-rolled wheels]. *Proceedings of Saint Petersburg Transport University*, 2013, no. 1 (34), pp. 73–84. (In Russian)

8. Kononov D.P. & Shadrina N. Yu. Povyshenie bezopasnosti dvizheniya zheleznodorozhnogo transporta za schet uvelicheniya ustalostnoy prochnosti tselnokatanykh koles [Improving the traffic safety of rail transport at the expense of increasing fatigue strength of solid-rolled wheels]. *Bulletin of scientific investigation results*, 2014, no. 1 (10), pp. 6–10. (In Russian)

9. Kononov D.P. Povyshenie bezopasnosti dvizheniya zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava za schet uvelicheniya bezotkaznosti tselnokatanykh koles [Improving the traffic safety of railway rolling stock at the expense of increasing reliability of solid-rolled wheels]. *Rolling stock of the XXIth century: ideas, requirements, projects. Book of abstracts of the VIIIth International scientific-technical conference*, 2013, pp. 130–132. (In Russian)

10. Kislik V.A. & Karmazin A.I. Vybor stali dlya vagonnykh kolesnykh par [Selection of steel for railway car wheelset]. *Railway transport*, 1956, no. 8, pp. 33–37. (In Russian)

11. Vorobev A.A. Matematicheskoe modelirovanie parametrov kontakta kolesa s relsom dlya razlichnykh uslovii ekspluatatsii vagonov [Mathematical modelling of parameters of wheel contact with rail for different car operating conditions]. *Bulletin of the Institute of of natural monopolies problems: Railways equipment,* 2016, no. 1 (33), pp. 34–41. (In Russian)

12. Kushner V.S., Krutko A.A., Vorobev A.A., Gubenko S.I., Ivanov I.A. & Kerentsev D.E. *Vliyanie struktury i mekhanicheskikh kharakteristik kolesnykh stalei na iznashivanie i rezhimy vosstanovleniya profilya kolesnykh par* [*Effect of structure and mechanical properties of wheel steel on wear-tear and recovery modes of wheelset profile*]. Ed. by I.A. Ivanov, V.S. Kushner. Omsk, OmGTU Publ., 2015, 224 p. (In Russian)

13. Orlova A.M., Vorobev A.A., Saidova A.V. & Kerentsev D.E. Opredelenie parametrov kontakta kolesa s relsom dlya razlichnykh uslovij ekspluatatsii poluvagona [Determination of parameters of wheel contact with a rail for various operating conditions of gondola car]. *Proceedings of Saint Petersburg Transport University*, 2015, no. 2 (43), pp. 74–84. (In Russian)

14. Budyukin A.M., Vorobev A.A. & Zhuchkov I.A. Protsessy iznashivaniya poverkhnosti kontakta kolesa i relsa [Wear-out processes of wheel contact surface and rail]. *Progressivnye tekhnologii, primenyaemye pri remonte podvizhnogo sostava RZhD* [*Progressive technologies used in the repair of rolling stock of Russian Railways*], 2016, pp. 13–16. (In Russian)

15. Larin T.V., Devyatkin V.P., Krivosheev V.N., Naumov I.V. & Chalykh V.I. Tselnokatanye zheleznodorozhnye kolesa [Solid-rolled railway wheels]. *Proceedings of CSNII MPS*, 1956, issue 124, 187 p. (In Russian)

16. Sazhina G.P. Ispytanie na kontaktnuyu dolgovechnost [Testing for contact durability]. *Collection. Contact strength of machine building materials*. Moscow, Science Publ., 1964, pp. 58–67. (In Russian)

КРОТОВ Сергей Викторович – канд. техн. наук, доцент, svk-19587@yandex.ru (Ростовский государственный университет путей сообщения); *КОНОНОВ Дмитрий Павлович – канд. техн. наук, доцент, d_kononov@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 625.1

М. М. Мирахмедов, С. К. Досметов

ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕЖДУНАРОДНЫХ СТАНДАРТОВ ФИДИК В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ИНВЕСТИЦИОННО–СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЕКТАХ

Дата поступления: 25.06.17
Решение о публикации: 21.11.17

Аннотация

Цель: Рассмотрение вопросов применения международных стандартов ФИДИК в железнодорожных инвестиционно-строительных проектах с учетом перспектив расширения объемов долевого участия иностранных инвестиций в реализации крупных железнодорожных проектов Узбекистана. **Методы:** Использован эвристический метод экспертной оценки для анализа в условиях неопределенности ситуации в железнодорожном строительстве и разработки решений при отсутствии количественной оценки критериев. **Результаты:** Получено ранжирование проблем внедрения стандартов ФИДИК, позволяющее определить перечень первоочередных задач по расширению масштабов долевого участия иностранных инвестиций, подрядчиков и поставщиков, рассмотрено повышение международного опыта реализации железнодорожных инвестиционно-строительных проектов в Узбекистане и за рубежом силами узбекских специалистов в содружестве с иностранными коллегами. **Практическая значимость:** Вопросы применения международных стандартов ФИДИК актуальны на практике оформления международных контрактов по строительству. Эти вопросы диктуются требованиями международных финансовых институтов и арбитражных инстанций, влияют на степень доверия иностранных партнеров к железнодорожной отрасли Узбекистана при заключении инвестиционно-строительных контрактов.

Ключевые слова: Железнодорожное строительство, инвестиционно-строительные проекты, международные стандарты ФИДИК, проблемы внедрения, консалтинг.

Makhamadzhon M. Mirakhmedov, D. Eng. Sci., professor, mirakhmedovm@mail.ru; *** Sultan K. Dosmetov**, Cand. Eng. Sci., professor, sultan.dosmetov2015@yandex.ru (Tashkent Institute of Railway Transport engineers) APPLICATION ISSUES Of FIDIC INTERNATIONAL STANDARDS IN RAILWAY INVESTMENT-CONSTRUCTION PROJECTS

Summary

Objective: Review of FIDIC international standards application in railway investment-construction projects taking into account the prospects for expanding the volume of equity participation of foreign investments in major rail projects of Uzbekistan. **Methods:** Heuristic method of expert evaluation for analysis under situation uncertainty in railway construction and decision development in the absence of quantitative criteria assessment is used. **Results:** Ranking of FIDIC standards implementation problems allowing to indicate a list of priorities for increasing equity participation of foreign investments, contractors and suppliers was obtained, improving international experience of realizing railway investment-construction projects in Uzbekistan and abroad by Uzbek specialists in collaboration with foreign colleagues was considered. **Practical importanse:** Application of international FIDIC standards are relevant in practice of forming international construction contracts. These issues are dictated by requirements of international financial institutions and arbitration courts. They influence on confidence of foreign partners to railway industry of Uzbekistan at conclusion of investment-construction contracts.

Keywords: Railway construction, investment-construction projects, FIDIC international standards, implementation, consulting.

Железнодорожная отрасль Узбекистана продолжает свое весомое участие в широкомасштабных экономических преобразованиях и реформах в республике, продолжает свою активную деятельность по реализации новых инвестиционно-строительных проектов, по модернизации и техническому перевооружению объектов инфраструктуры отрасли. За годы независимости в республике построены новые скоростные и высокоскоростные железнодорожные линии, завершена электрификация основных магистральных линий. Эта работа продолжается и сегодня.

Расширение объемов долевого участия иностранных инвестиций в реализации крупных железнодорожных проектов, рост экспортного потенциала ряда отраслей и надежности бизнес-среды в республике для местных и зарубежных предпринимателей, государственные гарантии для иностранных инвесторов и местных предпринимателей с выходом на мировые рынки – это далеко не полный перечень причин, по которым сегодня значительно вырос масштаб внедрения в республике в целом и в железнодорожной отрасли в частности стандартов и процедур Международной Федерации инженеров-консультантов ФИДИК (FIDIC – Federation Internationale des Ingenieurs Conseils). ФИДИК образована в 1913 г., штаб-квартира всемирной федерации расположена в г. Женева (Швейцария). ФИДИК объединяет национальные ассоциации более 80 стран, представляет интересы свыше 40 тыс. фирм и более миллиона профессиональных консультантов. Общая ежегодная стоимость услуг консультантов ФИДИК составляет около 300 млрд долл. Стратегической целью деятельности ФИДИК является представление международного сообщества организаций, обеспечивающих единые проектные, технологические, управленческие и интеллектуальные услуги в сфере строительства. Соблюдение стандартов и процедур ФИДИК, получивших за более 100-летний период всеобщее международное признание, требуется всем субъектам международных финансовых институтов (МФИ), в том числе Азиатскому Банку Развития (АБР), Всемирному Банку, Европейскому Банку реконструкции и развития (ЕБРР), Японскому Агенству международного сотрудничества (JICA) и другим фондам, сотрудничающим с Республикой Узбекистан (РУз). Для оценки масштабов и особенностей внедрения стандартов ФИДИК в инвестиционно-строительные внутренние и зарубежные проекты АО «Узбекистон темир йуллари» (АО УТЙ) рассмотрим следующие завершенные и строящиеся объекты:

1) строительство новой железнодорожной линии Тошгузар–Кумкурган, 2005–2008;

2) электрификация железнодорожной линии Тукимачи–Ангрен, 2005–2008;

3) строительство железнодорожной линии Хайратон–Мазари-Шариф, 2010–2011;

4) электрификация железнодорожной линии Ташкент–Самарканд, 2011–2013;

5) электрификация железнодорожной линии Мароканд–Карши, 2012–2015;

6) электрификация железнодорожной линии Карши–Термез, 2012–2017;

7) строительство новой железнодорожной линии Ангрен–Пап, 2014–2016;

8) электрификация железнодорожной линии Самарканд–Бухара, 2015–2017;

9) строительство новой железнодорожной линии Бухара–Мискен, 2016–2018;

10) электрификация железнодорожной линии Пап–Наманган – Андижан, 2017–2019.

В перечисленных объектах (см. номера объектов) участвуют иностранные подрядчики и поставщики: 1 – строительство и монтаж оборудования пяти металлических мостов, Япония; 3 – строительство зарубежного объекта «под ключ» с эксплуатацией, Узбекистан; 6 – монтаж СЦБ, связи и системы SCADA, США; 6 – монтаж оборудования тяговых подстанций, Китай; 7 – строительство и монтаж оборудования тоннеля, Китай. На многих объектах участвовали поставщики из России: 2, 4, 5 – оборудование для СЦБ и связи; 3, 7, 9 – рельсы и стрелочные переводы. В части модернизации и поставок современных высокоскоростных и большегрузных локомотивов для нужд АО УТЙ участвуют

компании из Испании и Китая. Более подробная информация о некоторых перечисленных выше инвестиционно-строительных объектах АО УТЙ и присоединении новых линий к железнодорожным транспортным коридорам Организации сотрудничества железных дорог (ОСЖД) приведена в журналах «Бюллетень ОСЖД» [1, 2].

При реализации уже завершенных, ныне строящихся и планируемых инвестиционно-строительных проектов в железнодорожной отрасли целесообразность внедрения стандартов ФИДИК объясняется расширением объемов долевого участия иностранных инвестиций, подрядчиков и поставщиков на наших объектах, необходимостью приобретения международного опыта реализации железнодорожных проектов в Узбекистане и за рубежом силами узбекских специалистов в содружестве с иностранными коллегами. Важность оформления международных подрядных контрактов в полном соответствии со стандартами ФИДИК диктуется также и требованиями международных финансовых институтов и арбитражных инстанций. При возникновении взаимных претензий сторон контракта международные арбитражные суды не принимают исково-претензионные дела к рассмотрению, если данный контракт не составлен на основе стандартов ФИДИК.

Изложенное не значит, что все договоры и контракты подряда надо оформлять по стандартам ФИДИК. Внутренние договорные подрядные отношения можно оформлять в соответствии с Постановлением № 395 [3] (Приложение 3. Типовой договор подряда на строительство объектов «под ключ»). Проведенное нами в работе [4] сравнение Типового договора и Краткой формы контракта ФИДИК [5] показало почти полное соответствие пунктов в этих документах (кроме пунктов по рассмотрению споров). Можно быть уверенным, что все контракты по перечисленным выше десяти объектам полностью соответствуют стандартам ФИДИК и по следующим примерам. Контракт между Министерстовм общественных работ (МОР) Афганистана и АО УТЙ был подвергнут экспертизе и установлено его полное соответствие требованиям Японской Ассоциации инженеров-консультантов, а последняя, как известно, является полноправным членом ФИДИК. В проектах прямо или косвенно участвуют финансовые средства от АБР, на объектах 1, 2, 5 и 6 используются долгосрочные кредиты и займы JICA и Кувейтского фонда Арабского Экономического Развития, на объекте 7 присутствует иностранный подрядчик (Китай). На последних трех объектах электрификации присутствуют зарубежные поставщики.

Прекрасным зарубежным опытом, «пробным камнем» или «пилотным объектом» успешного применения стандартов ФИДИК для железнодорожных строителей АО УТЙ стал объект «Строительство железнодорожной линии Хайратон–Мазари-Шариф» [1]. Первая афганская железнодорожная линия протяженностью 75 км была успешно построена узбекскими специалистами в период с января 2010 г. по март 2011 г. На строительство объекта АБР было выделено 165 млн долл., заказчиком было назначено МОР Афганистана, подрядчиком – АО УТЙ, проектной организацией – ОАО «Боштранслойиха» (бывший проектный институт Ташгипротранс). В период строительства объекта между заказчиком, подрядчиком, проектировщиком и консалтинговой компанией возникли около 60 спорных вопросов, которые были успешно решены при грамотном использовании стандартов ФИДИК, без вмешательства международных арбитражных инстанций. С 2011 г. по настоящее время узбекские специалисты продолжают помогать соседней стране и в технической эксплуатации данного объекта.

На всех стадиях реализации проектов важную миссию выполняли консалтинговые компании. Осуществляя независимый технический надзор за ходом реализации проектов, международные эксперты и консультанты согласно стандартам ФИДИК обеспечивали соблюдение своих контрактных обязательств всеми участниками. Они объективно и тщательно проверяют перечень работ, их объемы

и трудоемкость, затраты времени машин и механизмов, соответствие проектным решениям и стоимостным показателям, сроки и качество работ, сертификаты поставщиков конструкций и материалов, ход финансирования, соблюдение требований экологии и охраны окружающей среды, безопасность труда и персонала, степень рисков, прибыль, эффективность, срок окупаемости и др. [6]. Так, например, на объекте 1 путем использования разработанных учеными Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта (ТашИИТ) сетевых графиков компанией JTC (Япония) было достигнуто своевременное финансирование и соблюдение сроков строительства. Эксперты консалтинговой компании SYSTRA (Франция) обеспечили успешную реализацию проектов в установленные сроки на объектах электрификации участков Тукимачи–Ангрен и Мароканд–Карши путем сбалансирования рисков заказчика, подрядчика и обеспечения высокого качества работ. При строительстве новой железнодорожной линии Ангрен–Пап консалтинговой компанией DBI (Германия) достигнуты своевременность и высокое качество строительства тоннеля протяженностью 19,2 км силами зарубежной подрядной организации China Railway Tunnel Group (Китай).

Как видно из рассмотренных примеров, перечисленные выше критерии с определенными и точными значениями позволяют консалтинговым компаниям достичь экономии основных ресурсов и оптимизации показателей при управлении проектами. А в случае неопределенности и неточности значений критериев оптимизации применяются качественные и количественные методы исследований, в частности экспертный опрос. На основе собственных знаний и производственного опыта эксперты интуитивно-логическими приемами дают ответы на поставленные вопросы. Организаторы экспертизы оценивают и обобщают ответы экспертов, затем выводят коллективную оценку с учетом уровня экспертов, их компетентности и влияния каждого эксперта на конечную оценку. По изложенной в работе [7] методике нами были оценены проблемы реализации стандартов ФИДИК в железнодорожном строительстве с целью установления научно-обоснованной шкалы приоритетов, т. е. важности проблем внедрения международных стандартов ФИДИК в железнодорожных инвестиционно-строительных проектах с учетом перспектив расширения, во-первых, объемов долевого участия иностранных инвестиций в реализации крупных железнодорожных проектов Узбекистана и, во-вторых, масштабов интеграции узбекских железнодорожников-строителей в международную строительную практику.

На основе изучения опыта железнодорожного строительства в Узбекистане за последние 15–20 лет была составлена классификация 30 предполагаемых проблем внедрения стандартов ФИДИК. Проблемы условно разделены на 6 групп: *пространственные* – региональные (страновые) и отраслевые (ведомственные), а также на *функциональные* – правовые (юридические), организационные, проектно-технологические, информационно-технические. В основу данной классификации положена концепция интенсификации внедрения стандартов ФИДИК в железнодорожную инвестиционно-строительную практику. Суть концепции сводится к изменению характера применения стандартов ФИДИК в диапазоне от их узкого участия только в международных контрактах до их массового использования во всех международных и местных подрядных договорах и контрактах, независимо от «страновой» принадлежности сторон контрактов.

На первом этапе в плане организации экспертизы нами была определена модель (алгоритм) экспертного опроса (рис. 1). Экспертам предлагается выбрать самые важные из тридцати (предложенных нами или возможно самими экспертами) проблем для последующего их ранжирования в зависимости от их «весов» в полной реализации стандартов ФИДИК при управлении всеми подрядными контрактами. Задача сводится к ранжированию проблем внедрения стандартов ФИДИК в зависимости от их «весов» в обеспечении полноценного использования в подрядной практике.

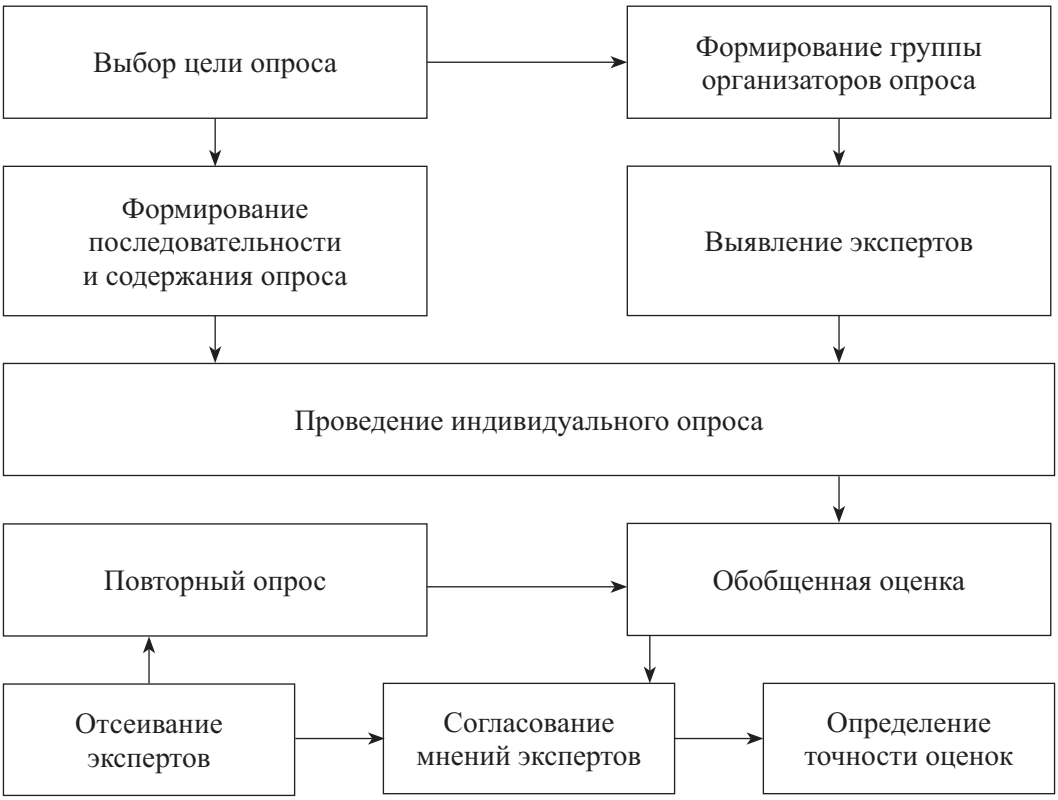


Рис. 1. Модель экспертного опроса

Ввиду ощутимых различий в опыте и информированности экспертов их ранжирование выполняли по группам (ученые, руководители, производственники, исследователи и т. д.). Методом предпочтительности по величине нормированных оценок установили ранги экспертов. Необходимое (минимальное) число экспертов определено выборкой из генеральной совокупности, т. е. при минимальной потребности в 25 нами были привлечены 49 экспертов различных рангов. С учетом заданной точности оценки получен доверительный интервал математического ожидания рангов изучаемых проблем.

Таким образом, была разработана система ранжирования проблем внедрения стандартов ФИДИК в инвестиционно-строительных проектах АО УТЙ (в таблице приведены только самые важные первые 6 проблем).

Для последующего решения задач интенсификации [8, 9] внедрения стандартов ФИДИК в зависимости от различного сочетания звеньев инвестиционно-строительной цепочки «объемы–инвестиции–планы–факт» нами предлагается двухлучевая схема (рис. 2), включающая основной и дополнительный направления решений.

По основному направлению определяются инвестиции *И* (источники – кредиты и займы МФИ, правительственные фонды, бюджетные отчисления, собственные средства ведомств, привлеченные средства и др.) для завершения предполагаемых объемов внедрения ФИДИК *О*, исходя из установившейся тенденции роста или при ее отсутствии – из экспертной оценки величины углового коэффициента, характеризующего ежегодное увеличение объемов реализации проектов по ФИДИК. По дополнительному направлению, исходя из предполагаемого объема внедрения *О*, изыскиваются ресурсы *И*, составляется комплексный план и производится *Ф*. Основное направление использует стандартные методы оценки тренда на базе прошлого опыта построением кумулятивных кривых и вычислением углового коэффициента $\varphi \in F$, причем $F = \varphi_{max}$:

Ранжирование проблем внедрения стандартов ФИДИК в проектах АО УТЙ

Приоритет	Наименование проблемы внедрения	Группа проблем
1	Несоответствие формулировок (стандартов и законодательства страны)	Региональные (страновые)
2	Недостаточный международный опыт внедрения	Отраслевые (ведомственные)
3	Отсутствие правительственных решений (указаний)	Правовые (юридические)
4	Отсутствие контактов и связей с ФИДИК	Организационные
5	Разногласия в интерпретации норм	Проектно-технологические
6	Недостаток информации о ФИДИК	Информационно-технические

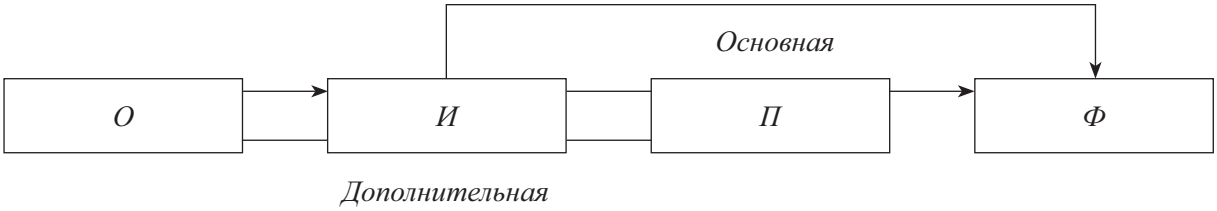


Рис. 2. Двухлучевая схема направлений решения проблем внедрения ФИДИК: *О* – предполагаемый объем внедрения стандартов ФИДИК в проектах АО УТЙ, млн долл./количество проектов с близкой или одинаковой стоимостью; *И* – предполагаемые инвестиции на реализацию проектов по ФИДИК, млн долл./количество проектов; *П* – планирование проектов по ФИДИК, млн долл./количество проектов; *Ф* – фактический объем внедрения ФИДИК в проектах, млн долл./количество проектов

$$v_i = v_{i-1} \cdot \varphi. \qquad (1)$$

В (1) v_i, v_{i-1} – объем внедрения ФИДИК соответственно в предыдущем (i–l) и планируемом (i) годах; φ – угловой коэффициент, который определяется с учетом прошлого опыта роста объемов внедрения ФИДИК (с применением Mat Cad).

При отсутствии положительного тренда предлагается проводить экспертный опрос специалистов о требуемом увеличении объемов внедрения ФИДИК. Прогнозную величину углового коэффициента получают как среднеарифметическую из оценок

$$\varphi^{-} = \sum_{i=1}^{N}(n_i \cdot \varphi_i)/N.$$

Оценка надежности осуществляется по близости нормальной гистограммы плотности распределения мнений экспертов. Тогда справедливо следующее:

$$t = (\varphi^{-}/\sigma_{\varphi}) \le t_t.$$

Здесь t_t – табличное значение критерия Стьюдента.

В дополнительном направлении на основе анализа деятельности группы реализации проектов (ГРП) определяют перечень значимых проектов, оценивают размер реальных инвестиций и составляют комплексный план внедрения ФИДИК (Пв). Затем оценивают требуемый объем внедрения (O_2). Зная начальный объем внедрения, выполненный в предшествующем году (O_2), производят расчет параметров по модели:

– при директивном темпе (φ_{σ}) внедрения объем проектов, намечаемый к выполнению в

планируемом году, нами предложено определить по формуле

$$O_0' = O_2 / (T_1 (1 + (T_1 + 1) \varphi_\sigma)). \qquad (2)$$

В (2) T_1 – директивный срок внедрения ФИДИК;

– в условиях имеющегося задела (O_1) и заданном сроке внедрения ФИДИК угловой коэффициент имеет значение, определяемое по формуле

$$\Phi = [(O_2(T_1 + 1)) / O_1 \cdot T_1];$$

– если темп задан прогнозом (φ^-) срок окончания программы объемом внедрения (O_2) равен

$$T_1' = \frac{\sqrt{(1+\varphi) + 4\varphi \frac{O_2}{O_0}} + (\varphi + 1)}{2\varphi}.$$

Мониторингово-инвестиционная программа составляется так, что в объем внедрения O_o включаются приоритетные проекты с учетом значимости их проблем. Для формирования мониторингово-инвестиционной программы Φ нами разработана следующая модель (см. (3)–(15)). Информация об альтернативных вариантах инвестирования (i)Φ с учетом приоритетов (k), формирующих множество $\{x_{ijk} \subset X\}$, содержится в плане Φ как результат идентификации строительно-инвестируемых параметров проектов и вариантов инвестиций внедрения $\{x_i\} \cap \{y_j\} = \{x_{ijk}\}$. Выбор и назначение специального варианта инвестирования подчиняется правилу последовательного отбора. Прежде всего формируется подмножество $\{x_{ijk} \subset X\}$ с определяющим приоритетом (k = l, 2, ..., z), поскольку для выделенного проекта предусмотрен определенный вариант инвестирования (x_{ij}, где i = 1, 2, ..., n и j = 1, 2, ..., m). Реализуемое проектами количество способов инвестирования должно совпадать с суммой его значений по срокам:

$$X_j = \sum_{i=1}^{T} X_{jt}, \qquad (3)$$

где t – индекс сроков.

На реализацию вариантов инвестирования накладываются ограничения:

– на количество вариантов инвестирования

$$0 \le X_{\min} \le X_j \le X_{j\max}; \qquad (4)$$

– на сроки

$$0 \le x_{jt\min} \le x_{jt} \le x_{jt\max} \qquad (5)$$

при цикле реализации j-го варианта инвестирования $L_j \ge 1$, где L – продолжительность цикла. Сумма s-го варианта инвестиции для реализации j-го варианта инвестирования

$$A_{sj} = \sum_{l=1}^{Li} a_{sjl}, \qquad (6)$$

здесь a_{sji} – сумма инвестиции (s) на реализацию части j-го варианта инвестирования в l-й срок.

На наличие инвестиций предполагается выполнение такого соотношения:

$$B_s = \sum_{i=1}^{T} B_{st}. \qquad (7)$$

Связь между суммой инвестиции на единицу мощности реализуемого проекта и их наличием в целом и по срокам устанавливается следующими соотношениями:

$$\sum_{j=1}^{n} A_{sj} \cdot X_j \le B_s, \qquad (8)$$

$$\sum_{j=1}^{n} \sum_{r=1}^{Li=1} a_{sj}(1 + \tau) \cdot X_j(t + \tau) \le B_{st}, \qquad (9)$$

где n – количество вариантов инвестирования, подлежащих использованию при реализации внедрения ФИДИК.

Если необходимо ввести ограничение на наличие инвестиций для обеспечения задела на начало года (B_{so}), то справедливо соотношение

$$\sum_{j=1}^{n} \sum_{q=1}^{Lj=1} \sum_{r=1}^{Lj=1} a_{sj}(1 + \tau) \times$$

$$\times X_j(\tau - q + 1) \le B_{so}. \qquad (10)$$

Технико-экономические показатели программы и вариантов инвестирования, предназначаемых к реализации, связывают соотношения

$$D = \sum_{j=1}^{n} D_j X_j, \qquad (11)$$

$$D = \sum_{j=1}^{n} D_{jtoo} X_{jt}. \qquad (12)$$

При этом ограничения на них следующие:

$$0 \le D_{\min} \le D \le D_{\max}, \qquad (13)$$

$$0 \le D_{t\min} \le D \le D_{t\max}. \qquad (14)$$

На основании изложенного выше задача оптимизации формулируется таким образом:

$$D^{p=po} = \sum_{j=1}^{n} D^{p=po} x_{jt} \to \min, \qquad (15)$$

при одновременном выполнении условий (3), (7), (10) и (15).

Разработка мониторингово-инвестиционной программы предполагает решение на предконтрактной стадии проблем финансирования. Для этой цели нами использован математический метод оптимизации, в частности транспортная задача линейного программирования

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} f(x_{ij}) \to \min. \qquad (16)$$

В (16) ij – соответственно инвесторы и местные заказчики по типовым договорам и международным контрактам, x_{ij} – процентные ставки по инвестициям.

В модель введены ограничения на дополнительные расходы, связанные с оформлением договоров или контрактов:

$$f(x_{ij}) = \{0, \text{ если } x_{ij} = 0,$$
$$c_{ij} \cdot x_{ij} + d_{ij}, \text{ если } x_{ij} > 0\},$$

где c_{ij} – представительские расходы; d_{ij} – оформление договоров и согласование.

Переменные (x_{ij}) меняются непрерывно, но целевая функция имеет разрыв в нуле, если хотя бы одно значение $d_{ij} > 0$. Подобное условие отличает задачу от традиционной постановки.

Потребность в инвестициях на реализацию проекта (консультационные услуги) определяли, исходя из опыта применения стандартов ФИДИК и плана внедрения ФИДИК:

$$Q = \sum_{i=1}^{n} (B_i \cdot l_i) \cdot q. \qquad (17)$$

В (17) B_i – расходы на консалтинговые услуги, долл./чел.-мес.; l_i – длительность оказания консалтинговых услуг, мес.; q – нормативная численность консультантов, чел.

Для формирования годовой программы внедрения стандартов ФИДИК применен метод математической оптимизации, в частности динамического программирования. Исходя из концепции интенсификации, естественно выбрать в качестве критерия предполагаемый объем внедрения стандартов. Требование максимизации предполагаемых объемов внедрения стандартов может привести к включению в план внедрения проектов с минимальными рисками в ходе составления контрактов либо максимальное количество контрактов. Поэтому как ограничение при оптимизации *Ф* по объему включаемые в годовую программу проекты должны быть равнозначными по категории и назначению. Это утверждение естественным образом приводит к рассмотрению как критерия отдачу (окупаемость) проекта. Кроме того, наличие ограничений на инвестиции приводит в некоторых случаях к частичной реализации контрактов. В этом случае уменьшение стоимости услуг консультантов производится только по срокам. Эти правила и процедуры определяют дискретный характер внедрения стандартов ФИДИК.

В качестве инструмента решения оптимизационной задачи разработки годовой мониторингово-инвестиционной программы приняты функциональные диаграммы ФИДИК

специального вида из Красной, Серебряной и Золотой Книг ФИДИК [10–12].

Таким образом, полученный на инвестиционно-строительных объектах АО УТЙ бесценный опыт внедрения международных стандартов и процедур ФИДИК и математическое обоснование мониторингово-инвестиционной программы интенсификации дальнейшего внедрения ФИДИК позволяют:

– совершенствовать управление железнодорожными инвестиционно-строительными проектами с учетом современных требований;

– повысить международный уровень реализации железнодорожных инвестиционно-строительных проектов в Узбекистане и за рубежом силами узбекских специалистов с расширением долевого участия иностранных инвесторов, подрядчиков и поставщиков;

– выходить на международный подрядный рынок с соблюдением всех установленных критериев и требований международных финансовых институтов;

– продолжать исследования проблем внедрения международных стандартов ФИДИК в инвестиционно-строительную практику в целом и в железнодорожное строительство в частности, с целью дальнейшего расширения интеграции деятельности местных строительных организаций в международный рынок подряда.

Библиографический список

1. Бюллетень ОСЖД. Технико-эконом. информ. журн. – Варшава, 2016. – № 4–5. – С. 46–49.

2. Бюллетень ОСЖД. Технико-эконом. информ. журн. – Варшава, 2016. – № 6. – С. 22–29.

3. Постановление Кабинета Министров РУз № 395 от 12.09.2003 г. О мерах по совершенствованию механизма хозяйственных отношений в капитальном строительстве. – Ташкент : Собрание законодательства РУз, 2003.

4. Мирахмедов М.М. Организация строительства в рыночных условиях (порядок разработки, проведения экспертизы и утверждения документации инвестиционных проектов, заключение и исполнение инвестиционных договоров по международным правилам) / М.М. Мирахмедов, С.К. Досметов и др. – Ташкент : ТашИИТ, 2013. – 150 с.

5. Краткая форма контракта ФИДИК. – Лондон : European Construction Ventures, 1999. – 34 с.

6. Управление инвестиционно-строительными проектами: международный подход / под ред. И.И. Мазура, В.Д. Шапиро. – М. : Аввалон, 2004. – 592 с.

7. Орлов А.И. Теория принятия решений / А.И. Орлов. – М. : Изд-во «Март», 2004. – 656 с.

8. Омаров А.Д. Комплексная система подготовки производства мелиорации подвижных песков в полосе и за полосой отвода железных дорог / А.Д. Омаров, Р.С. Закиров, М.М. Мирахмедов. – Алматы : КазАТК, 2003. – 158 с.

9. Мирахмедов М.М. Основы методологии комплексной системы организации пескозакрепления : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / М.М. Мирахмедов. – Ташкент : ТашИИТ, 2002. – 47 с.

10. Conditions of Contract for Construction for Buildings and Engineering Works Designed by the Employer. – Switzerland, Geneva : FIDIC, 1999. – 73 p. (Red Book).

11. Conditions of Contract for EPC (Engineering, Procurement, Construction) / Turnkey Projects. – Switzerland, Geneva : FIDIC, 1999. – 105 p. (Silver Book).

12. Conditions of Contract for Design, Build and Operate Projects. – Switzerland, Geneva : FIDIC, 2008. – 138 p. (Gold Book).

References

1. *Byulleten OSZhD. Tekhniko-ekonomicheskiy informatsionnyi zhurnal* [*Bulletin OSZhD. Techno-economic information journal*]. Warsaw, 2016, no. 4–5, pp. 46–49. (In Russian)

2. *Byulleten OSZhD. Tekhniko-ekonomicheskiy informatsionnyi zhurnal* [*Bulletin OSZhD. Techno-economic information journal*]. Warsaw, 2016, no. 6, pp. 22–29. (In Russian)

3. *Postanovlenie Kabineta Ministrov RUz no. 395 ot 12.09.2003. O merakh po sovershenstvovaniyu mekhanizma khozyaystvennykh otnosheniy v kapitalnom stroi-*

telstve [*Resolution of Uzbekistan Republic Cabinet of Ministers N 395 of 12.09.2003. On measures to improve economic relations in capital construction*]. Tashkent, Collection of laws of Uzbekistan Republic Publ., 2003. (In Russian)

4. Mirakhmedov M. M., Dosmetov S. K. et al. *Organizatsiya stroitelstva v rynochnykh usloviyakh (poryadok razrabotki, provedeniya ekspertizy i utverzhdeniya dokumentatsii investitsionnykh proektov, zaklyuchenie i ispolnenie investitsionnykh dogovorov po mezhdunarodnym pravilam)* [*Organization of construction in market conditions* (*the order of development, examination and approval of investment projects documentation, conclusion and performing investment contract by international rules*)]. Tashkent, TashIIT Publ., 2013, 150 p. (In Russian)

5. *Kratkaya forma kontrakta FIDIK* [*The short form of the FIDIC contract*]. London, European Construction Ventures Publ., 1999, 34 p. (In Russian)

6. *Upravlenie investitsionno-stroitelnymi proektami: mezhdunarodnyi podkhod* [*Administration of investment-construction projects: international approach*]. Ed. by I. I. Mazur, V. D. Shapiro. Moscow, Avvalon Publ., 2004, 592 p. (In Russian)

7. Orlov A. I. *Teoriya prinyatiya resheniy* [*Theory of decision making*]. Moscow, March Publ., 2004, 656 p. (In Russian)

8. Omarov A. D., Zakirov R. S. & Mirakhmedov M. M. *Kompleksnaya sistema podgotovki proizvodstva melioratsii podvizhnykh peskov v polose i za polosoy otvoda zheleznykh dorog* [*Integrated system of production preparation for moving sands melioration in and out of the band of railways*]. Almaty, KazATK Publ., 2003, 158 p. (In Russian)

9. Mirakhmedov M. M. *Osnovy metodologii kompleksnoy sistemy organizatsii peskozakrepleniya* [*Methodology basis of integrated system of sand fixing organization*]. Thesis of D. Eng. Sci. Tashkent, TashIIT Publ., 2002, 47 p. (In Russian)

10. *Conditions of Contract for construction for buildings and engineering works designed by the Employer.* Switzerland, Geneva, FIDIC, 1999, 73 p. (Red Book)

11. *Conditions of Contract for EPC* (*Engineering, Procurement, Construction*). Turnkey Projects. Switzerland, Geneva, FIDIC, 1999, 105 p. (Silver Book)

12. *Conditions of Contract for Design, Build and Operate Projects.* Switzerland, Geneva, FIDIC, 2008, 138 p. (Gold Book)

МИРАХМЕДОВ Махамаджон Мирахмедович – доктор техн. наук, профессор, mirakhmedovm@mail.ru; *ДОСМЕТОВ Султан Камалович – канд. техн. наук, доцент, sultan.dosmetov2015@yandex.ru (Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта).

УДК 629.4.027.3

А. М. Орлова, Е. А. Рудакова, А. В. Гусев

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕССОРНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ С УЧЕТОМ НЕОБХОДИМОСТИ СНИЖЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПУТЬ

Дата поступления: 29.12.2017
Решение о публикации: 23.01. 2018

Аннотация

Цель: Установление параметров и характеристик рессорного подвешивания тележки грузового вагона для увеличения осевой нагрузки до 27 тс. Проведение комплекса испытаний вагона на тележках с новым рессорным подвешиванием с установлением показателей динамических качеств и воздействия на путь. **Методы:** Использование результатов динамического моделирования, ходовых и по воздействию на путь испытаний вагона на тележках с повышенной осевой нагрузкой. **Результаты:** Увеличенный расчетный статический прогиб до 70 мм в новом рессорном подвешивании с кусочно-линейной вертикальной силовой характеристикой позволил обеспечить низкую величину коэффициента вертикальной динамики и отсутствие превышений показателей воздействия на путь их допускаемых значений. **Практическая значимость:** Разработанная концепция снижения воздействия на путь вагонов с увеличенной осевой нагрузкой до 27 тс путем совершенствования рессорного подвешивания была реализована в тележке модели 18-6863 производства АО «Тихвинский вагоностроительный завод».

Ключевые слова: Повышение осевой нагрузки, воздействие на путь, напряжения на основной площадке земляного полотна, динамическая погонная нагрузка, рессорное подвешивание, коэффициент вертикальной динамики, коэффициент запаса устойчивости и конструктивного запаса прогиба пружин, расчетный статический прогиб подвешивания.

Anna M. Orlova, D. Eng. Sci., professor, aorlova@uniwagon.com (PJSC “Scientific-production Corporation “United wagon company””); **Ekaterina A. Rudakova**, Cand. Eng. Sci., leading scientific worker, erudakova@tt-center.ru; *** Artem V. Gusev**, Junior scientific worker, agusev@tt-center.ru (The all-Union scientific-research center of transport technologies) IMPROVING FREIGHT CAR SPRING SUSPENSION TAKING INTO ACCOUNT NECESSITY FOR REDUCING IMPACT ON TRACK

Summary

Objective: Setting parameters and characteristics of freight car bogie spring suspension for increasing axial load up to 27. Performing a set of tests for a car on bogies with new spring suspension establishing indicators of dynamic qualities and effects on the track. **Methods:** Using the results of dynamic modelling of running as well as of their impact on the track tests of a car on a bogie with high axial load. **Results:** Increased calculated static deflection up to 70 mm in new spring suspension with piecewise-linear vertical force characteristic allowed providing low value of vertical dynamics factor and absence of impact indicator excess on the track of their permissible values. **Practical importance:** Developed concept of reducing impact on the track of cars with increased axial load up to 27 TS by improving spring suspension was implemented in the bogie of 18-6863 model produced by “JSC “Tikhvinsky rail carriage building””.

Keywords: Increase of axial load, impact on the track, stress at the main ground of road-bed, dynamic linear load, spring suspension, coefficient of vertical dynamics, coefficient of stability margin and constructive spring deflection margin, calculated static suspension margin.

Введение

В соответствии с планами по организации тяжеловесного движения и увеличения пропускной способности на участках сети ОАО «РЖД», а также внедрения вагонов нового поколения с улучшенными технико-экономическими параметрами необходим поиск новых подходов к проектированию тележек и грузовых вагонов в целом. В условиях конкурентного развития вагоностроения повышение осевой нагрузки – одно из перспективных направлений совершенствования грузовых тележек. Типовая конструкция пути ОАО «РЖД», согласно нормам содержания, допускает возможность эксплуатации тяжеловесных вагонов (осевая нагрузка свыше 25 тс), но необходимо обеспечить непревышение показателей воздействия подвижного состава на путь в соответствии с действующей в РФ нормативной документацией [1]. Необходимо отметить, что в ряде работ на основании сравнения тележек 18-100 и 18-9855 (25 тс/ось) обоснована возможность и эффективность повышения осевой нагрузки, а также выдвинуто предположение о влиянии параметров тележки и характеристик подвешивания в большей степени на воздействие на путь, чем увеличенной осевой нагрузки [2, 3].

Результаты ходовых динамических и по воздействию на путь испытаний основных типов вагонов (полувагоны, цистерны, платформы, крытые вагоны и вагоны-хопперы) на тележках 18-9855 (25 тс/ось) подтвердили уменьшение воздействия на путь вагонов с увеличенной осевой нагрузкой в сравнении с тележкой 18-100 (23,5 тс/ось) [4]. Это удалось достигнуть путем снижения динамической составляющей вертикальной силы за счет применения нелинейного рессорного подвешивания с улучшенными характеристиками. Данные выводы позволили принять тележку 18-9855 за основу для дальнейших исследований в направлении совершенствования ее конструкции и создания тележки с повышенной осевой нагрузкой до 27 тс.

Исследование влияния характеристик подвешивания тележки на показатели воздействия на путь

К основным критериям воздействия подвижного состава на железнодорожный путь, по которым вводятся дополнительные ограничения скоростей движения вагона, относятся: напряжения на основной площадке земляного полотна и динамическая погонная нагрузка, которые зависят от коэффициента вертикальной динамики полного (далее – $K_д^{полн}$) и обусловленного колебаниями подпрыгивания и галопирования (далее – $K_д^{пг}$).

Для обеспечения особенно низких показателей динамического воздействия на путь за счет кардинального улучшения динамических показателей вагонов при использовании новых конструктивных схем тележек необходимо проанализировать влияние характеристик тележки (рессорного подвешивания) на воздействие на путь.

В процессе установления рациональных параметров подвешивания были получены зависимости $K_д^{полн}$ и $K_д^{пг}$ от разности прогибов под порожним и груженым вагонами, коэффициента относительного трения (φ) (рис. 1), из которых следует, что при увеличении разности прогибов и уменьшении μ наблюдается понижение коэффициентов вертикальной динамики.

Ранее (см. [5]) было установлено, что для обеспечения непревышения допускаемого значения динамической погонной нагрузки на путь (168 кН/м) расчетный статический прогиб груженого вагона должен составлять

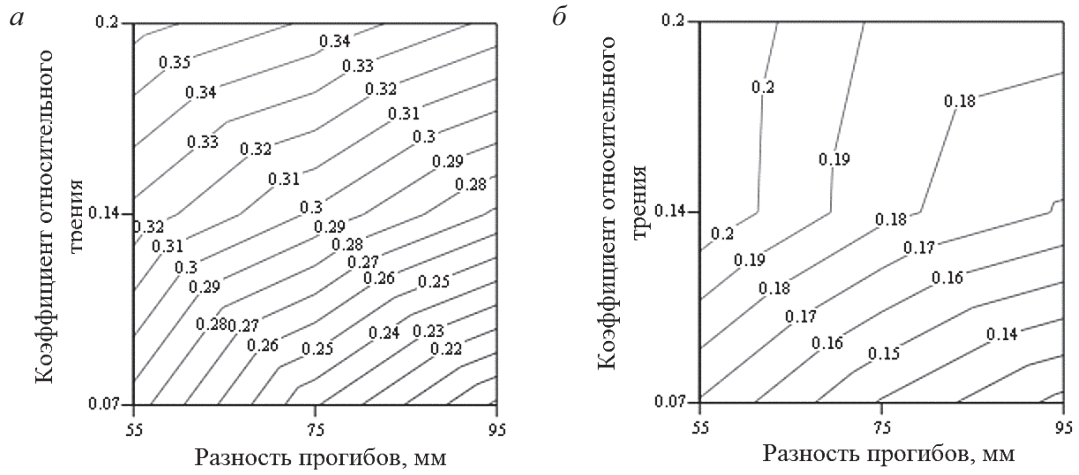


Рис. 1. Максимальный коэффициент вертикальной динамики:
а – полный; *б* – обусловленный колебаниями подпрыгивания и галопирования

не менее 60 мм, а для обеспечения непревышения допускаемых напряжений на основной площадке земляного полотна (0,08 МПа) – не менее 70 мм, разность прогибов под порожним и груженым вагонами – 70 мм, коэффициент относительного трения подвешивания – не более 0,13.

Установление параметров и характеристик рессорного подвешивания для тележки с повышенной осевой нагрузкой

Общеизвестно, что применение в центральной ступени подвешивания рессорного комплекта с билинейной или кусочно-линейной вертикальной силовой характеристикой, состоящей более чем из двух участков, и клиновыми гасителями колебаний дает возможность улучшить динамические качества и безопасность движения порожнего вагона, поскольку в этом случае не только уменьшается жесткость подвешивания в порожнем режиме, но и увеличивается относительное трение, создаваемое фрикционными гасителями колебаний [6].

При проектировании рессорного подвешивания тележки с повышенной осевой нагрузкой была выбрана схема расположения пружин в рессорном комплекте, включающая семь двухрядных пружин, расположенных под надрессорной балкой, с билинейной силовой характеристикой и две двухрядные подклиновые пружины с линейной силовой характеристикой, при этом высота последних больше, чем наружных, размещенных под надрессорной балкой [7, 8]. Такая кусочно-линейная вертикальная силовая характеристика наряду с указанными выше положительными качествами нелинейного подвешивания позволяет дополнительно обеспечить существенный запас на износ фрикционного клина в эксплуатации (занижение клина до 19 мм).

Таким образом, применение в тележках с осевой нагрузкой 27 тс рессорного подвешивания с кусочно-линейной силовой характеристикой и описанной выше схемой расположения пружин обеспечило необходимый расчетный статический прогиб груженого вагона, разность прогибов под порожним и груженым вагонами и коэффициент относительного трения подвешивания. Проведенные исследования [9, 10] подтвердили возможность конструктивной реализации рессорного подвешивания с требуемыми характеристиками, удовлетворяющего всем требованиям к статической и усталостной прочности [11, 12].

Вертикальная силовая характеристика рессорного комплекта тележки с осевой нагрузкой 27 тс приведена на рис. 2, а основные параметры подвешивания в сравнении с тележкой 18-9855 (25 тс) представлены в таблице.

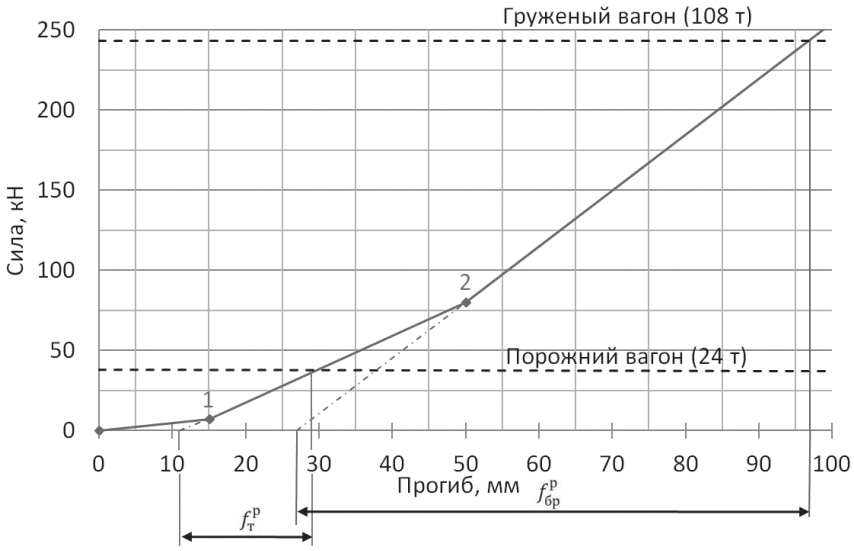


Рис. 2. Вертикальная силовая характеристика рессорного комплекта тележки с осевой нагрузкой 27 тс ($f_т^р$, $f_{бр}^р$ – расчетный статический прогиб порожнего и груженого вагона соответственно)

Основные параметры рессорного подвешивания

Показатель	Порожний (24 т)		Груженый (108 т)	
	18-9855	Тел.^{27тс}*	18-9855	Тел.^{27тс}
Полный прогиб подвешивания, мм	42	29	90	97
Расчетный статический прогиб подвешивания, мм	32	18	51	70
Коэффициент относительного трения	0,35	0,22	0,12	0,11
Разность прогибов под груженым и порожним вагонами, мм	–		48	68

* Тележка с осевой нагрузкой 27 тс.

По результатам динамического моделирования было установлено, что универсальный полувагон на тележках с осевой нагрузкой 27 тс с указанными параметрами подвешивания при порожнем и груженом режимах загрузки удовлетворяет требованиям ГОСТ 33211–2014 [13] по показателям динамических качеств и ГОСТ Р 55050–2012 [1] по показателям воздействия на путь при движении со скоростями вплоть до конструкционной (100 км/ч).

Установление показателей динамических качеств и воздействия на путь на основании комплекса испытаний вагона на тележках с осевой нагрузкой 27 тс

Разработанная концепция снижения воздействия на путь вагонов с увеличенной осевой нагрузкой до 27 тс была реализована в тележке модели 18-6863 производства АО «Тихвинский вагоностроительный завод» («ТВСЗ») (рис. 3).

Ходовые и по воздействию на путь испытания полувагона модели 12-9548-01 на таких тележках, проведенные в ноябре 2016 г. в условиях испытательного полигона ст. Майкоп–ст. Белореченская Северо-Кавказской железной дороги, подтвердили существенные запасы коэффициента вертикальной динамики, рамных и боковых сил относительно допу-

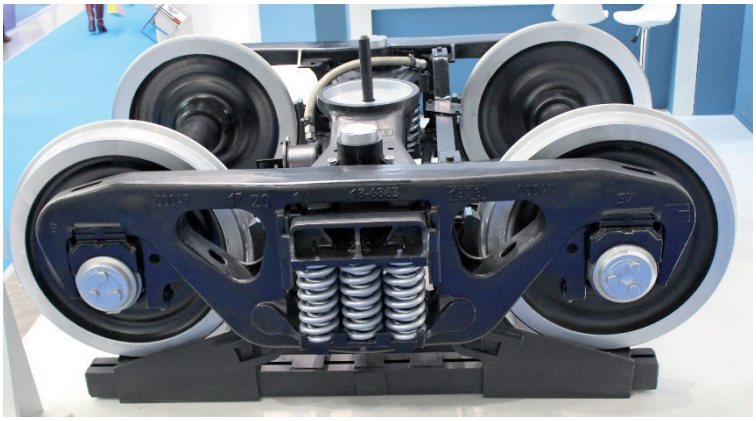


Рис. 3. Тележка модели 18-6863 с осевой нагрузкой 27 тс

стимых значений и показали положительные результаты по оценочным критериям воздействия на путь.

Гистограммы экстремальных значений показателей ходовых качеств полувагона модели 12-9548-01 в груженом режиме на тележках 18-6863 по результатам испытаний приведены на рис. 4, минимальных значений коэффициента устойчивости от вползания гребня колеса на рельс для порожнего вагона – на рис. 5.

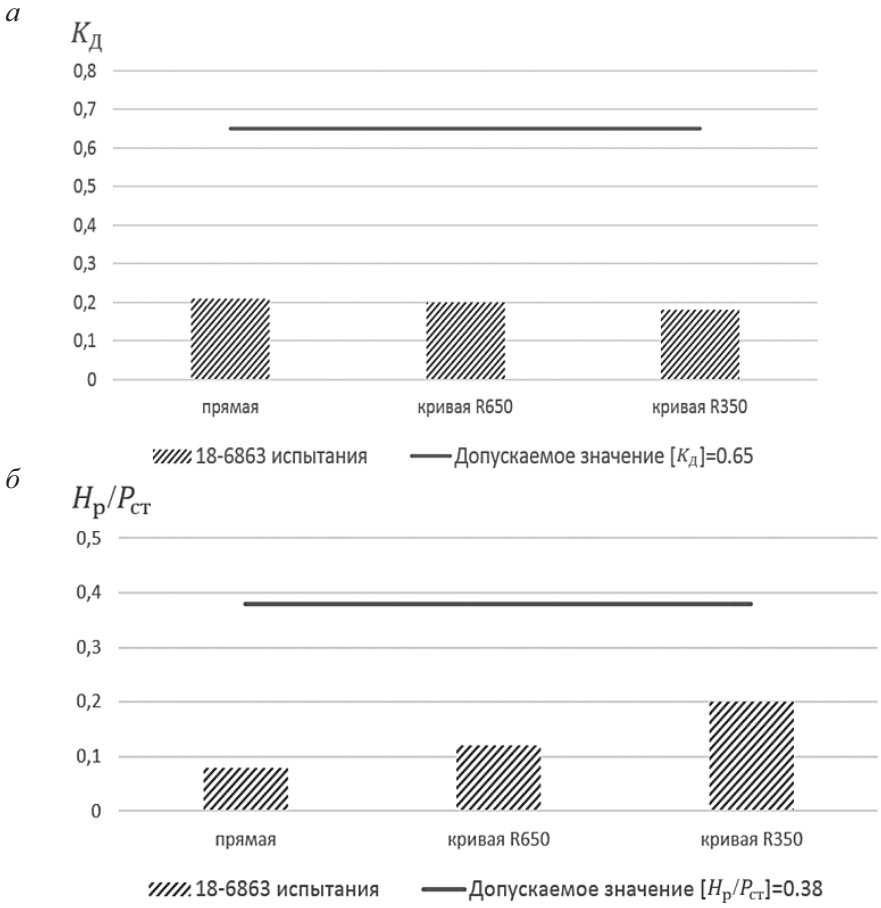


Рис. 4. Экстремальные значения показателей динамических качеств:
а – коэффициент вертикальной динамики обрессоренных частей вагона; *б* – отношение рамной силы к вертикальной статической нагрузке колесной пары на рельсы

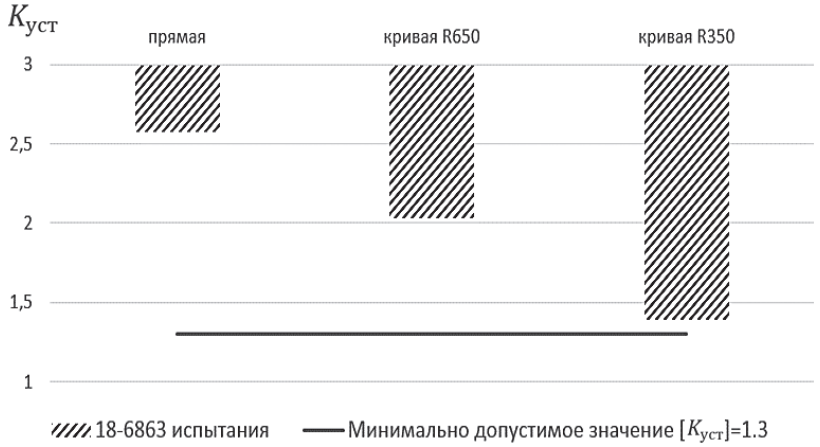


Рис. 5. Минимальные значения коэффициента устойчивости от вползания гребня колеса на рельс

Испытания по воздействию на путь полувагона модели 12-9548-01 на тележках 18-6863 показали отсутствие превышения всех показателей по ГОСТ Р 55050–2012 их допускаемых значений при скоростях движения вплоть до конструкционной 100 км/ч по железнодорожному пути с типовой конструкцией верхнего строения с рельсами типа Р65 и эпюрой укладки шпал не менее 1840 шт. на 1 км.

Для подтверждения достоверности теоретических исследований были сопоставлены результаты испытаний и динамического моделирования для полувагона на различных участках пути (рис. 6, 7).

Следует отметить, что значения динамической погонной нагрузки, полученные по результатам испытаний и динамического моделирования, близки (расхождение составляет не более 3 %). Величины напряжений на основной площадке земляного полотна, полученные при моделировании, больше экспериментальных в среднем на 20 %, что может быть связано с отличиями жесткости пути испытательного полигона от расчетных значений по ЦПТ-52/14 [14].

Заключение

В основу проектирования нового рессорного подвешивания для тележки с осевой нагрузкой 27 тс была заложена концепция уменьшения воздействия на путь за счет снижения коэффициента вертикальной динамики, которую удалось реализовать увеличением расчетного статического прогиба груженого вагона до 70 мм.

На стадии расчета параметров подвешивания были разработаны методики определения коэффициента запаса устойчивости и конструктивного запаса прогиба пружин с применением современных методов (метод конечных элементов, динамическое моделирование), которые позволили уточнить допускаемые значения указанных коэффициентов и подтвердить возможность конструктивной реализации рессорного подвешивания с увеличенной высотой пружин.

Проведенные исследования и расчеты по совершенствованию рессорного подвешивания для повышения осевой нагрузки легли в основу тележки модели 18-6863 с осевой нагрузкой 27 тс производства АО «ТВСЗ».

Результаты комплекса ходовых и по воздействию на путь испытаний полувагона 12-9548-01 на новых тележках подтвердили более низкий коэффициент вертикальной динамики обрессоренных частей вагона и показали отсутствие превышения показателей динамических качеств и воздействия на путь их допускаемых значений в соответствии с ГОСТ 33211–2014 и ГОСТ Р 55050–2012. На

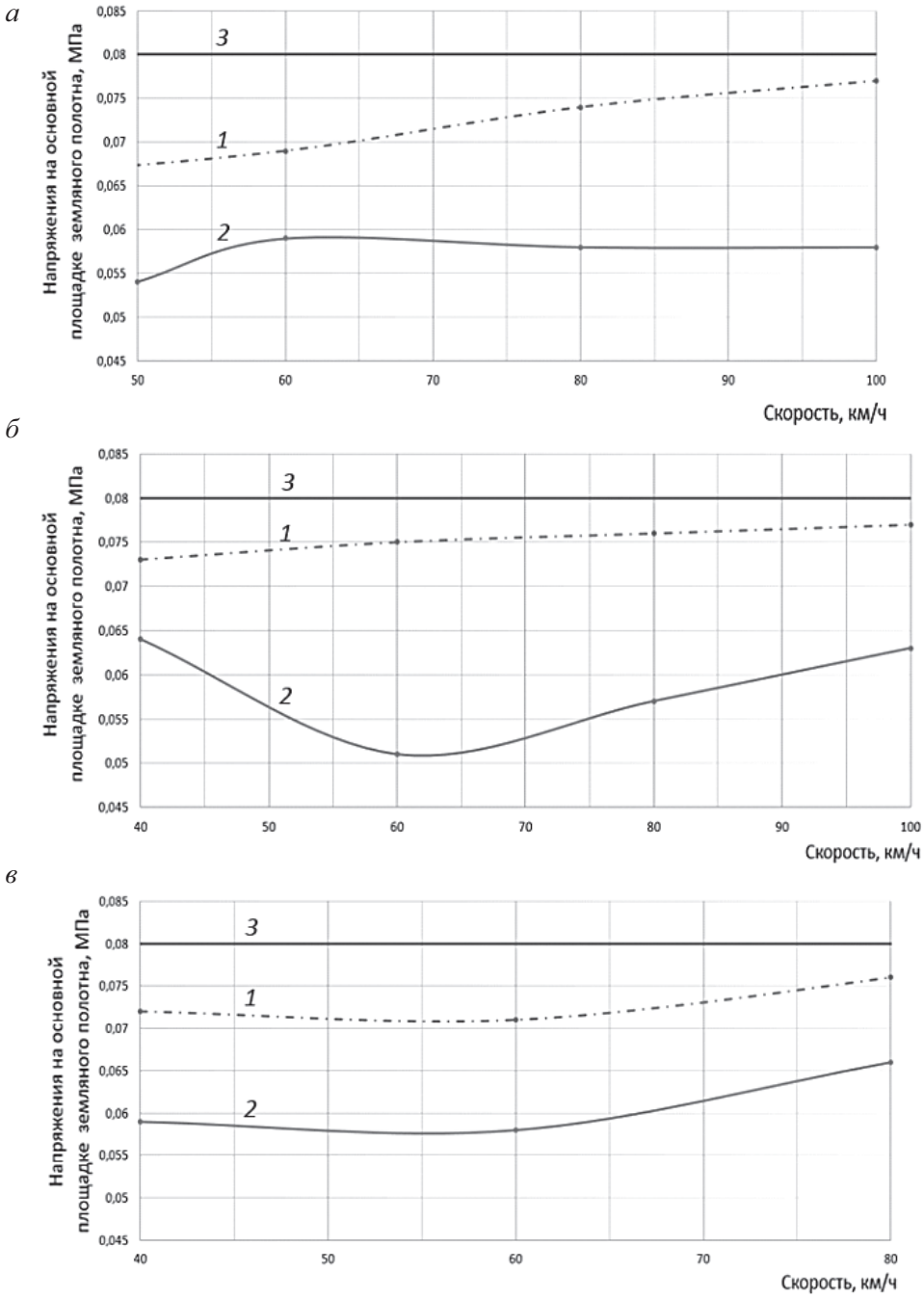


Рис. 6. Напряжения на основной площадке земляного полотна: на прямом участке (*а*); в кривой радиусом 650 м (*б*); в кривой радиусом 350 м (*в*). *1* – результаты динамического моделирования тележки 18-6863; *2* – результаты испытаний тележки 18-6863; *3* – допускаемое значение напряжений $[\sigma_h] = 0{,}08$ МПа

основании положительных результатов испытаний можно заключить, что на путь в большей степени оказывают влияние параметры тележки и характеристика рессорного подвешивания, чем увеличение осевой нагрузки с 23,5 до 27 тс.

Установленные скорости движения полувагона модели 12-9548-01 получились не ниже допустимых, приведенных в Распоряжении ОАО «РЖД» № 2240р [15], что позволяет считать тележку 18-6863 перспективной для осуществления тяжеловесного движения.

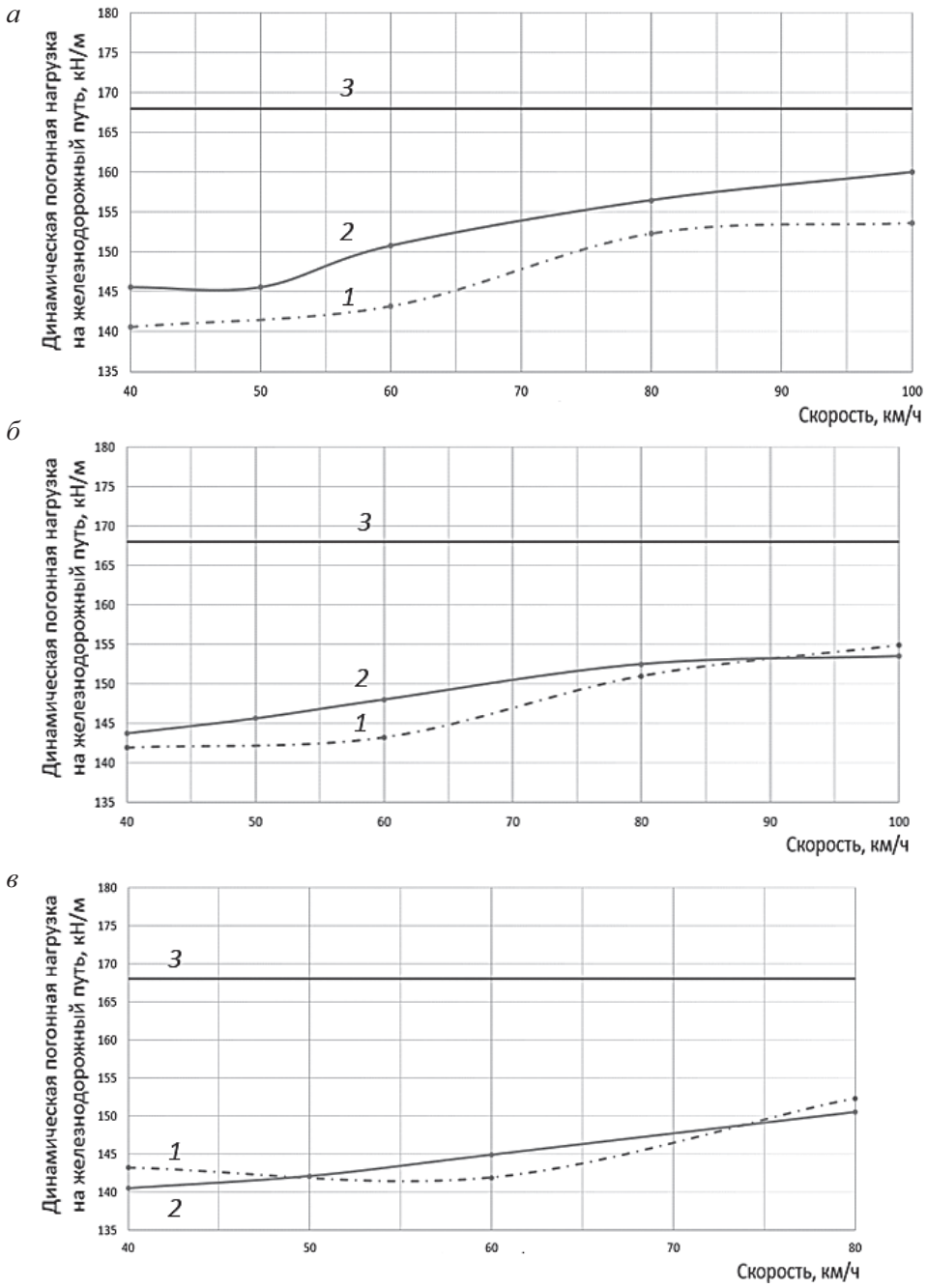


Рис. 7. Динамическая погонная нагрузка на железнодорожный путь:
на прямом участке (*а*); в кривой радиусом 650 м (*б*); в кривой радиусом 350 м (*в*).
1 – результаты динамического моделирования тележки 18-6863; *2* – результаты испытаний тележки 18-6863; *3* – допускаемое значение напряжений [*q*] =168 кН/м

Библиографический список

1. ГОСТ Р 55050–2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. – М. : ВНИИЖТ, 2012.

2. Бороненко Ю. П. Вагоны с увеличенными нагрузками от колес на рельсы – резерв повышения провозной и пропускной способности железных дорог / Ю. П. Бороненко // Транспорт Российской Федерации. – 2008. – № 5 (18). – С. 52–55.

3. Бороненко Ю. П. Тележки с повышенной осевой нагрузкой / Ю. П. Бороненко, А. М. Орлова, Е. А. Рудакова // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 10. – С. 50–53.

4. Бороненко Ю. П. Оценка возможности и эффективности повышения осевых нагрузок грузовых вагонов / Ю. П. Бороненко, А. В. Третьяков, М. В. Зимакова // Техника железных дорог. – 2017. – № 1. – С. 32–37.

5. Orlova A. M. Advancements in three-piece freight bogies for increasing axle load up to 27 t / A. M. Orlova, A. V. Saidova, E. A. Rudakova, A. V. Gusev // Vehicles Systems Dynamics, Taylor&Francis Online. – 2015. – P. 1043–1050.

6. Белоусов А. В. Применение рессорного подвешивания с билинейной характеристикой для улучшения динамических качеств грузовых вагонов : дис. … канд. техн. наук : 05.22.07 / А. В. Белоусов. – М. : ВНИИЖТ, 2001. – 156 с.

7. Рессорное подвешивание тележки грузового железнодорожного вагона : Патент № 160055 Рос. Федерация : МПК[51] B61F 5/00. – Заявл. 18.08.2015 ; опубл. 27.02.2016. – Бюл. № 6 / Е. А. Рудакова, А. В. Гусев.

8. Рессорное подвешивание тележки грузового вагона : Патент № 158618 Рос. Федерация : МПК[51] B61F 5/06. – Заявл. 23.06.2015 ; опубл. 20.01.2016. – Бюл. № 2 / Р. А. Савушкин, К. В. Кякк, А. М. Орлова, Е. А. Рудакова, А. Н. Комарова.

9. Орлова А. М. Анализ методов расчета винтовых цилиндрических пружин на устойчивость при сжатии / А. М. Орлова, Е. А. Рудакова, А. В. Гусев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2015. – Вып. 4. – С. 108–116.

10. Орлова А. М. Обоснование назначения минимально допустимого значения коэффициента конструктивного запаса прогиба рессорного подвешивания тележек грузовых вагонов / А. М. Орлова, Е. А. Рудакова, А. В. Гусев // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2017. – Т. 14. – Вып. 1. – С. 73–87.

11. ГОСТ 1452–2011. Пружины цилиндрические винтовые тележек и ударно-тяговых приборов подвижного состава железных дорог. – М. : ВНИКТИ ; ВНИИЖТ, 2011.

12. ГОСТ 32208–2013. Пружины рессорного подвешивания железнодорожного подвижного состава. Метод испытаний на циклическую долговечность. – М. : ВНИИНМАШ, 2013.

13. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – М. : ВНИИЖТ, 2014.

14. ЦПТ-52/14. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности. – Утв. МПС РФ 16.06.2000 г. – М., 2000.

15. Нормы допускаемых скоростей движения подвижного состава по железнодорожным путям колеи 1520 (1524) мм. – Распоряжение ОАО «РЖД» № 2240 р от 08.11.2016 г. – М. : ОАО «РЖД», 2016.

References

1. *GOST R 55050–2012. Zheleznodorozhniy podvizhnoi sostav. Normy dopustimogo vozdeystviya na zheleznodorozhnyy put i metody ispytani* [*State Standard Specification. Railway rolling stock. Standards of acceptable impact on railway track and test methods*]. Moscow, VSRZhTI Publ., 2012. (In Russian)

2. Boronenko Yu. P. Vagony s uvelichennymi nagruzkami ot koles na relsy – rezerv povysheniya provoznoi i propusknoi sposobnosti zheleznykh dorog [Cars with increased load from wheels on rails – increase reserve of carrying and delivery capacity of railways]. *Transport of the Russian Federation*, 2008, no. 5 (18), pp. 52–55. (In Russian)

3. Boronenko Yu. P., Orlova A. M. & Rudakova E. A. Telezhki s povyshennoi osevoi nagruzkoi [Bogies with high axial load]. *Railway transport*, 2008, no. 10, pp. 50–53. (In Russian)

4. Boronenko Yu. P., Tretyakov A. V. & Zimakova M. V. Otsenka vozmozhnosti i effektivnosti povysheniya osevykh nagruzok gruzovykh vagonov [Assessment of feasibility and efficiency of increasing axial load of freight cars]. *Railway equipment*, 2017, no. 1, pp. 32–37. (In Russian)

5. Orlova A. M., Saidova A. V., Rudakova E. A. & Gusev A. V. Advancements in three-piece freight bogies for increasing axle load up to 27 t. *Vehicles Systems Dynamics, Taylor&Francis Online*, 2015, pp. 1043–1050.

6. Belousov A. V. *Primenenie ressornogo podveshivaniya s bilineinoi kharakteristikoyi dlya uluchsheniya*

dinamicheskikh kachestv gruzovykh vagonov [*Application of spring suspension with bilinear characteristic for improving dynamic qualities of freight cars*]. Thesis, Cand. Eng. Sci. Moscow, VSRZhTI Publ., 2001, 156 p. (In Russian)

7. Rudakova E. A. & Gusev A. V. *Ressornoe podveshivanie telezhki gruzovogo zheleznodorozhnogo vagona*. Patent no. 160055 Rossiyskoy Federatsii: MPK[51] B61F 5/00; zayavl. 18.08.2015; opubl. 27.02.2016 [*Spring suspension of freight railway car bogie*. Patent N 160055 Russian Federation: IPC[51] B61F 5/00; Appl. 18.08.2015; Publ. 27.02.2016]. *Bulletin*, no. 6. (In Russian)

8. Savushkin R.A., Kyakk K.V., Orlova A.M., Rudakova E.A. & Komarova A.N. *Ressornoe podveshivanie telezhki gruzovogo vagona*. Patent no. 158618 Rossiyskoi Federatsii: MPK[51] B61F 5/06; zayavl. 23.06.2015; opubl. 20.01.2016 [*Spring suspension of freight car bogie*. Patent N 158618 Russian Federation. IPC[51] B61F 5/06; Appl. 23.06.2015; Publ. 20.01.2016]. *Bulletin*, no. 2. (In Russian)

9. Orlova A. M., Rudakova E. A. & Gusev A. V. Analiz metodov rascheta vintovykh tsilindricheskikh pruzhin na ustoychivost pri szhatii [Analysis of methods for calculating spiral cylindrical springs on stability under compression]. *Proceedings of Saint Petersburg transport University*, 2015, issue 4, pp. 108–116. (In Russian)

10. Orlova A. M., Rudakova E. A. & Gusev A. V. Obosnovanie naznacheniya minimalno dopustimogo znacheniya koeffitsienta konstruktivnogo zapasa progiba ressornogo podveshivaniya telezhek gruzovykh vagonov [Reasoning for assignment of permissible minimum value coefficient of constructive spring suspension deflection reserve of freight cars bogies]. *Proceedings of Saint Petersburg transport University*, 2017, vol. 14, issue 1, pp. 73–87. (In Russian)

11. *GOST 1452–2011. Pruzhiny tsilindricheskie vintovye telezhek i udarno-tyagovykh priborov podvizhnogo sostava zheleznykh dorog* [*State Standard Specification 1452–2011. Spiral cylindrical springs of bogies and draw-and-buffer gears of railway rolling stock*]. Moscow, VNIKTI Publ., 2011. (In Russian)

12. *SSS* [*State Standard Specification*] *32208–2013. Pruzhiny ressornogo podveshivaniya zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Metod ispytaniy na tsiklicheskuyu dolgovechnost'* [*Springs of spring suspension of railway rolling stock. Test method for cyclic durability*]. Moscow, VNIINMASH Publ., 2013. (In Russian)

13. *SSS* [*State Standard Specification*] *33211–2014. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [*Freight cars. Requirements for durability and dynamic qualities*]. Moscow, VSRZhTI Publ., 2014. (In Russian)

14. *ZhPT-52/14. Metodika otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put po usloviyam obespecheniya ego nadezhnosti.* Utv. MPS RF 16.06.2000 [*Methods of evaluating impact of rolling stock on track according to the conditions to ensuring its reliability*. Asserted by MCL RF 16.06.2000]. Moscow, 2000. (In Russian)

15. *Normy dopuskaemykh skorostey dvizheniya podvizhnogo sostava po zheleznodorozhnym putyam kolei 1520* (*1524*) *mm*. Rasporyazhenie OAO "RZHD" no. 2240r ot 08.11.2016 [*Permitted speeds standards of rolling stock on railway lines of 1520* (*1524 mm*) *track*. JSC RZhD, order N 2240 r of 08.11.2016]. Moscow, JSC RZhD Publ., 2016. (In Russian)

ОРЛОВА Анна Михайловна – доктор техн. наук, профессор, aorlova@uniwagon.com (ПАО «Научно-производственная корпорация "Объединенная Вагонная Компания"»); РУДАКОВА Екатерина Александровна – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, erudakova@tt-center.ru; *ГУСЕВ Артем Владимирович – младший научный сотрудник, agusev@tt-center.ru (ООО «Всесоюзный научно-исследовательский центр транспортных технологий»).

УДК 625.173.2:625.171.001.24

С. В. Петуховский

РАСЧЕТ КРИВИЗНЫ РЕЛЬСОВОЙ НИТИ ПО СТРЕЛАМ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ХОРДЫ

Дата поступления: 30.10.2017
Решение о публикации: 05.12.2017

Аннотация

Цель: Получение достоверных данных о геометрии железнодорожного пути при его измерении системой с несимметричной измерительной хордой. Совершенствование методов расчета положения пути для повышения качества выправочных работ при проведении различного вида ремонтов пути. **Методы:** Для расчета кривизны рельсовой нити используется аппарат операционного исчисления и теория рядов. **Результаты:** Предложена новая зависимость для расчета кривизны рельсовой нити на основании измерения стрел изгиба пути системой с несимметричной измерительной хордой. Данная зависимость носит обобщенный характер и включает в себя ранее полученные частные решения для симметричной и несимметричной измерительных хорд. Введение в расчетную формулу элемента фазового координатного смещения позволяет повысить точность определения коэффициентов ряда и снизить погрешность преобразования. **Практическая значимость:** Получены достоверные данные о геометрии пути при его измерении системой с несимметричной измерительной хордой. Разработанный метод может быть реализован в микропроцессорной системе выправки пути, что повысит качество выправочных работ рихтовочными машинами. С помощью установленной зависимости возможно осуществлять преобразование стрел, измеренных несимметричной измерительной хордой, в стрелы с симметричной базой измерения. Результаты работы также могут быть использованы для расчета неровностей пути и проведения статистического анализа расстройств геометрии на основе данных его измерения вагонами-путеизмерителями и другими диагностическими средствами. Повышение качества работы выправочных машин даст возможность снизить затраты на содержание и ремонт железнодорожного пути, а также обеспечит более высокую плавность движения поездов.

Ключевые слова: Кривизна рельсовой нити, стрела изгиба, несимметричная измерительная хорда, выправка пути, хордовые средства измерения, рихтовка пути.

Sergej V. Petukhovsky, Cand. Eng. Sci., associate professor, researchman@mail.ru (National research Moscow State building University) CALCULATION OF TRACK RAIL CURVATURE ON AN ARROW OF ASYMMETRIC MEASURING CHORD

Summary

Objective: Obtaining reliable data of railway track geometry with its measurement by the system of asymmetric measuring chord. Improvement of methods calculating track position for increasing alignment works quality in performing various types of track repairs. **Methods:** To calculate track rail curvature operational calculus and theory of series are used. **Results:** New dependence for calculation of track rail curvature based on track bend arrows measurement by the system with asymmetric measuring chord is suggested. This dependence is generic in nature and includes previously obtained partial solutions for symmetric and asymmetric measuring chords. Introduction a phase coordinate displacement element to a calculated formula allows increasing accuracy of determining coefficient series and reducing transformation error. **Practical importance:** Reliable data of track geometry with its measurement by the system of asymmetric measuring chord are obtained. The developed method can be realised in

a microprocessed system of track alignment that will increase alignment work quality by planishers. With the help of established dependence it is possible to realise transformation of arrows measured by asymmetric measuring chord into those with symmetric measurement base. The results of the work can also be used for calculation of track roughness and performing statistical analysis of geometry disorders on the base of data of its measurement by track gauges and the other diagnostic devices. Improving the quality of alignment machines work will provide an opportunity to reduce the costs of railway track maintenance and repair as well as provide greater smoothness of train movement.

Keywords: Curvature of track rail, bend arrow, asymmetrical measuring chord, track alignment, chord measurement means, track lining.

Хордовые средства контроля являются основным средством измерения геометрии пути, а также инструментом контроля рабочего процесса выправки при устранении выявленных расстройств рихтовочными машинами [1]. В настоящее время все контрольно-измерительные системы машин оборудованы несимметричными измерительными хордами, что усложняет расчет кривизны рельсовой нити и неровностей пути. Таким образом, вопрос совершенствования существующих методов расчета параметров плана и профиля пути по данным его измерения несимметричными хордовыми средствами не теряет свою актуальность.

Расчетная схема трехточечной измерительной системы приведена на рис. 1.

В общем случае стрела неровности пути определяется по формуле линейного преобразования [2–4]

$$f(x) = f_{н}(x) - f_{п}(x) = \\ = \frac{a}{a+b}Y(x+b) + \frac{b}{a+b}Y(x-a) - Y(x), \qquad (1)$$

где f – стрела изгиба несимметричной измерительной хорды; $f_{н}$ – натурная стрела; $f_{п}$ – проектная стрела; Y – величина неровности; x – координата по длине пути; a – длина заднего плеча измерительной хорды; b – длина переднего плеча измерительной хорды.

Анализ фазо-частотной характеристики зависимости (1) показал, что между стрелой f и неровностью пути Y присутствует фазовое смещение по координате пути [5–7], которое зависит как от геометрических параметров измерительной системы, так и от частоты неровности. Для случая, когда период неровности стремится к бесконечности, величина фазового координатного смещения устремляется

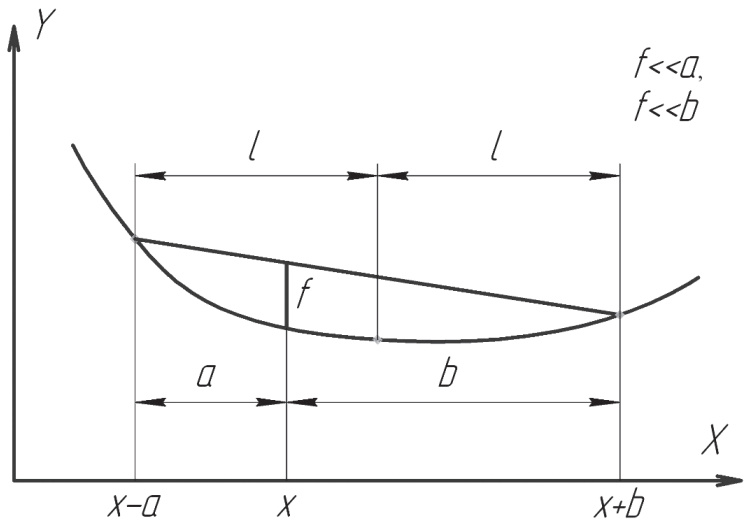


Рис. 1. Расчетная схема трехточечной измерительной системы

к значению $(b - a)/3$. На рис. 2 представлены графики кривизны k и стрел f при прохождении несимметричной трехточечной измерительной системы из прямой через переходную кривую ($L_п = 20$ м) в круговую кривую. Геометрический смысл вышеописанного фазового смещения дополнительно проиллюстрирован на рис. 3. Весовая функция h с входом в виде дельта-функции кривизны k и выходом по стреле f представляет собой треугольную функцию на интервале $[-b; +a]$. Центр масс треугольника смещен относительно его вершины на величину $(b - a)/3$. Максимальное значение весовой функции составляет $h_{max} = h(0) = ab/(a + b)$, а ее площадь равна $ab/2$.

Для учета вышеописанных закономерностей введем в выражение (1) величину τ фазового продольного координатного смещения. Тогда формулу (1) представим в виде

$$f(x-\tau) = \frac{a}{a+b}Y(x+b-\tau) + \\ + \frac{b}{a+b}Y(x-a-\tau) - Y(x-\tau), \qquad (2)$$

здесь τ – фазовое продольное координатное смещение

$$\tau = (b-a)d;$$

d – безразмерный коэффициент фазового продольного координатного смещения (частный случай $d = 1/3$).

Преобразуя выражение (2) по Лапласу [8], получим

$$f(p)e^{-\tau p} = \\ = \begin{bmatrix} \frac{a}{a+b}e^{(b-\tau)p} + \\ + \frac{b}{a+b}e^{(-a-\tau)p} - e^{-\tau p} \end{bmatrix} Y(p), \qquad (3)$$

где p – оператор дифференцирования; $e^{-\tau p}$ – оператор фазового запаздывания.

Введем дополнительные параметры измерительной системы:

$$l = \frac{a+b}{2}, \qquad (4)$$

$$\delta = \frac{\tau}{2l} \qquad (5)$$

(l – длина полухорды измерительной системы; δ – приведенный параметр фазового координатного смещения).

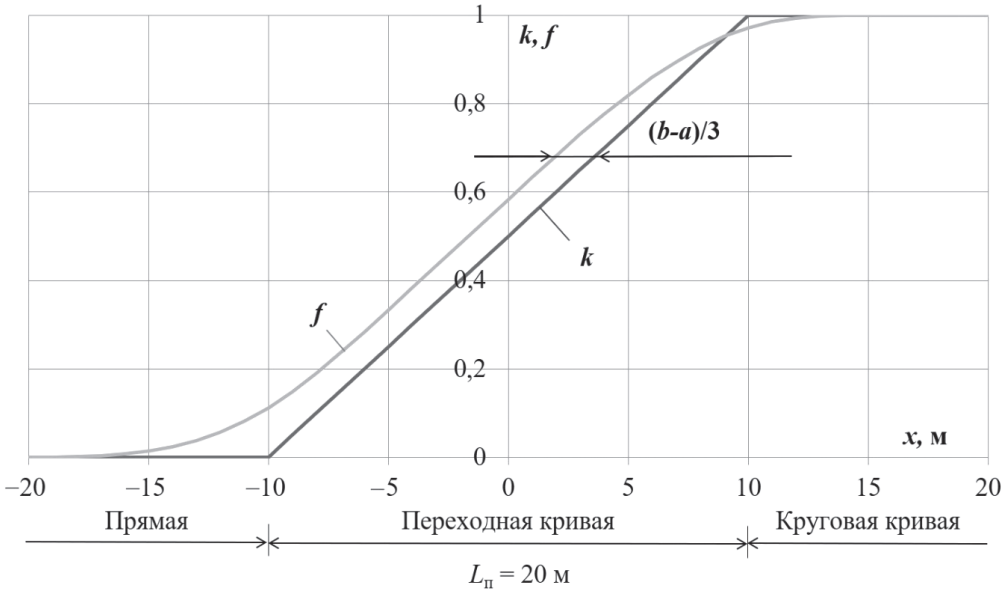


Рис. 2. График кривизны и график стрел (хорда машины ВПР-02 М: $a = 5{,}0$ м, $b = 10{,}6$ м, величины нормированные)

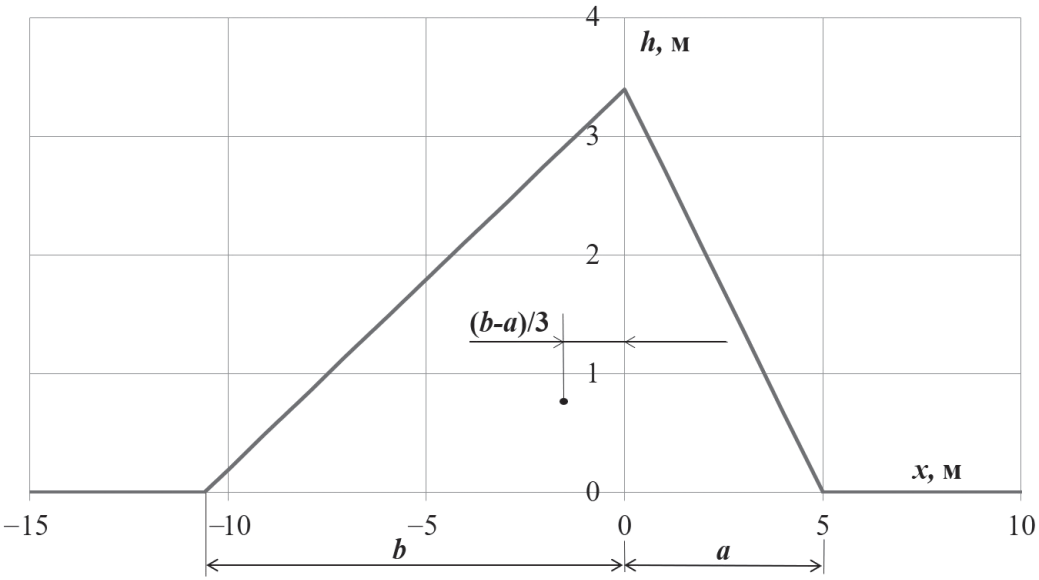


Рис. 3. График весовой функции с входом по кривизне и выходом по стреле (хорда машины ВПР-02 М: a = 5,0 м, b = 10,6 м)

Подставив выражения (4), (5) в (3), запишем передаточную функцию измерительной системы с входом по неровности и выходом по стреле несимметричной измерительной хорды:

$$W_Y^f(p) = \\ = e^{\tau p}\left[\begin{array}{l} = \frac{1}{2}\left(1-\frac{\delta}{d}\right)e^{\left(\frac{\delta}{d}-2\delta+1\right)lp} + \\ + \frac{1}{2}\left(1+\frac{\delta}{d}\right)e^{\left(\frac{\delta}{d}-2\delta-1\right)lp} - e^{-2\delta lp} \end{array}\right]. \quad (6)$$

Передаточная функция с входом по кривизне и выходом по стреле связана с выражением (6) соотношением

$$W_k^f(p) = \frac{f(p)}{k(p)} = \frac{1}{p^2}W_Y^f(p). \quad (7)$$

Подставим формулу (6) в (7) и воспользуемся разложением показательной функции в степенной ряд [9]:

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \ldots \ .$$

Объединив члены ряда в группы по степеням p, находим

$$W_k^f(p) = l^2 e^{\tau p}\varphi(\delta, l, p), \quad (8)$$

$$\varphi(\delta, l, p) = q_0 + q_1 lp + \\ + q_2 l^2 p^2 + q_3 l^3 p^3 + q_4 l^4 p^4 + \ldots, \quad (9)$$

$$q_i = \frac{\frac{1}{2}\left(1-\frac{\delta}{d}\right)\left(\frac{\delta}{d}-2\delta+1\right)^{i+2} + \\ + \frac{1}{2}\left(1+\frac{\delta}{d}\right)\left(\frac{\delta}{d}-2\delta-1\right)^{i+2} - (-2\delta)^{i+2}}{(i+2)!},$$

$$i = 0, 1, 2, 3, \ldots \quad (10)$$

Практический интерес представляет передаточная функция с входом по стреле и выходом по кривизне, позволяющая восстанавливать положение пути по данным его измерения системой с несимметричной измерительной хордой. Такая передаточная функция связана с выражением (8) обратным соотношением

$$W_f^k(p)=\frac{k(p)}{f(p)}=\left[W_k^f(p)\right]^{-1}= \\ =\left[l^2e^{\tau p}\varphi(\delta,l,p)\right]^{-1}=\frac{e^{-\tau p}}{l^2}\mu(\delta,l,p), \quad (11)$$

$$\mu(\delta,l,p)=\varphi(\delta,l,p)^{-1}. \quad (12)$$

Раскладывая выражение (12) в ряд Маклорена [10] относительно длины l полухорды измерительной системы, получим зависимость

$$\mu(\delta,l,p)=\mu(\delta,0,p)+ \\ +l\left.\frac{\partial\mu(\delta,l,p)}{\partial l}\right|_{l=0}+\frac{l^2}{2!}\left.\frac{\partial^2\mu(\delta,l,p)}{\partial l^2}\right|_{l=0}+ \\ +\frac{l^3}{3!}\left.\frac{\partial^3\mu(\delta,l,p)}{\partial l^3}\right|_{l=0}+ \\ +\frac{l^4}{4!}\left.\frac{\partial^4\mu(\delta,l,p)}{\partial l^4}\right|_{l=0}+\dots . \quad (13)$$

Подставив (13) в (11), запишем формулу для расчета кривизны в операторной форме

$$k(p)e^{\tau p}= \\ =\left[\begin{array}{l}\frac{1}{l^2}\mu(\delta,0,p)+\frac{1}{l}\left.\frac{\partial\mu(\delta,l,p)}{\partial l}\right|_{l=0}+ \\ +\frac{1}{2!}\left.\frac{\partial^2\mu(\delta,l,p)}{\partial l^2}\right|_{l=0}+ \\ +\frac{l}{3!}\left.\frac{\partial^3\mu(\delta,l,p)}{\partial l^3}\right|_{l=0}+ \\ +\frac{l^2}{4!}\left.\frac{\partial^4\mu(\delta,l,p)}{\partial l^4}\right|_{l=0}+\dots\end{array}\right]f(p). \quad (14)$$

Используя зависимости (9), (10), (12), определим для (14) коэффициенты ряда

$$\mu(\delta,0,p)=\frac{1}{q_0},$$

$$\left.\frac{\partial\mu(\delta,l,p)}{\partial l}\right|_{l=0}=-\frac{q_1}{q_0^2}p,$$

$$\left.\frac{\partial^2\mu(\delta,l,p)}{\partial l^2}\right|_{l=0}=2!\frac{(q_1^2-q_2q_0)}{q_0^3}p^2, \quad (15)$$

$$\left.\frac{\partial^3\mu(\delta,l,p)}{\partial l^3}\right|_{l=0}=3!\frac{2q_0q_1q_2-q_1^3-q_3q_0^2}{q_0^4}p^3,$$

$$\left.\frac{\partial^4\mu(\delta,l,p)}{\partial l^4}\right|_{l=0}= \\ =4!\frac{q_1^4-3q_2q_1^2q_0+q_2^2q_0^2+2q_3q_1q_0^2-q_4q_0^3}{q_0^5}p^4.$$

После восстановления оригинала из операторной формы записи выражений (14) и (15), получим формулу для расчета кривизны пути

$$k(x+\tau)=m_0f(x)+m_1\frac{df(x)}{dx}+ \\ +m_2\frac{d^2f(x)}{dx^2}+m_3\frac{d^3f(x)}{dx^3}+m_4\frac{d^4f(x)}{dx^4}+\dots,$$

$$m_0=\frac{1}{q_0l^2},$$

$$m_1=-\frac{q_1}{q_0^2l}, \quad (16)$$

$$m_2=\frac{(q_1^2-q_2q_0)}{q_0^3},$$

$$m_3=\frac{2q_0q_1q_2-q_1^3-q_3q_0^2}{q_0^4}l,$$

$$m_4=\frac{q_1^4-3q_2q_1^2q_0+q_2^2q_0^2+2q_3q_1q_0^2-q_4q_0^3}{q_0^5}l^2.$$

Дальнейшее преобразование коэффициента m_0 ряда (16) приводит к соотношению

$$m_0=\frac{1}{q_0l^2}=\frac{2}{ab}.$$

Коэффициенты ряда при различных значениях d
(хорда машины ВПР-02М: a = 5,0 м, b = 10,6 м)

Коэффициенты ряда										Метод [13], 2002 г.
d	–0,2	–0,1	0	0,1	0,2	0,3	1/3	0,4	0,5	0
τ, м	–1,12	–0,56	0	0,56	1,12	1,68	1,87	2,24	2,80	0
m_0	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
m_1	–0,113	–0,092	–0,070	–0,049	–0,028	–0,007	0	0,014	0,035	–0,061
m_2	–0,031	–0,088	–0,134	–0,167	–0,189	–0,199	–0,200	–0,197	–0,183	–0,138
m_3	0,358	0,324	0,261	0,176	0,076	–0,033	–0,070	–0,145	–0,252	0,249
m_4	0,078	0,271	0,436	0,559	0,631	0,643	0,633	0,593	0,482	0,442

Для частного случая (d = 1/3) коэффициенты ряда (16) примут вид

$$m_0 = \frac{1}{q_0 l^2},$$

$$m_1 = 0,$$

$$m_2 = -\frac{q_2}{q_0^2},$$

$$m_3 = -\frac{q_3}{q_0^2} l,$$

$$m_4 = \frac{q_2^2 - q_4 q_0}{q_0^3} l^2,$$

$$\tau = (b - a)/3.$$

Пример расчета коэффициентов ряда (16) при различных значениях d для геометрии хорды измерительной системы машины ВПР-02М (a = 5,0 м, b = 10,6 м) [11] представлен в таблице.

Анализ данных таблицы показывает, что предложенная зависимость (16) для расчета кривизны пути носит обобщенный характер и включает в себя ранее полученные частные решения для симметричной [12] и несимметричной [13] измерительных хорд. Введение в расчетную формулу элемента фазового координатного смещения позволило повысить точность определения коэффициентов ряда и снизить погрешность преобразования по сравнению с результатами исследований [13–15].

В результате проведенного исследования получена новая обобщенная формула для расчета кривизны рельсовой нити на основании измерения стрел изгиба пути системой с несимметричной измерительной хордой. Введение в формулу элемента фазового координатного смещения дает возможность повысить точность определения коэффициентов ряда и понизить погрешность преобразования.

Библиографический список

1. Попович М. В. Путевые машины / М. В. Попович, В. М. Бугаенко, А. В. Атаманюк, Л. В. Башкатова, А. А. Бураков, Б. Г. Волковойнов, М. А. Володин, Ю. А. Гамоля, В. А. Дубровин, Г. В. Завгородний, В. Ф. Ковальский, С. Л. Скрипка, С. А. Самохин, Р. Д. Сухих, С. Г. Штараев. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2009. – 820 с.

2. Попович М. В. Выправка железнодорожного пути системами сглаживающего типа : учеб. пособие / М. В. Попович, А. В. Белов, В. Л. Уралов. – Л. : ЛИИЖТ, 1978. – 48 с.

3. Попович М. В. Механизированная выправка пути : учеб. пособие : в 3 ч. / М. В. Попович, Б. Г. Волковойнов, А. В. Белов, А. М. Попович. – СПб. : ПГУПС, 2000. – 126 с.

4. Атаманюк А. В. Путевые машины для выправки железнодорожного пути, уплотнения и стабилизации балластного слоя. Технологические системы : учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / А. В. Атаманюк, В. Б. Бредюк, В. М. Бугаенко, М. А. Великотный, Б. Г. Волковойнов, К. Б. Ершова, М. А. Логинов, А. Г. Малышев, М. О. Никончук, С. В. Петуховский, М. В. Попович. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2008. – 285 с.

5. Коломиец В. П. Эталонные средства контроля геометрии колеи и их сертификация / В. П. Коломиец, В. А. Широков, А. И. Абраменков // Путь и путевое хозяйство. – 2004. – № 8. – С. 10–15.

6. Коломиец В. П. Влияние статического параллакса стрел изгиба на выправку пути / В. П. Коломиец, В. И. Корольков // Путь и путевое хозяйство. – 2008. – № 1. – С. 13–15.

7. Коломиец В. П. Еще раз о машинной выправке пути / В. П. Коломиец // Путь и путевое хозяйство. – 2009. – № 9. – С. 8–12.

8. Араманович И. Г., Лунц Г. Л., Эльсгольц Л. Э. Функции комплексного переменного. Операционное исчисление. Теория устойчивости / И. Г. Араманович, Г. Л. Лунц, Л. Э. Эльсгольц. – М. : Наука, 1965. – 392 с.

9. Двайт Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы / Г. Б. Двайт ; пер. с англ. Н. В. Леви ; под ред. К. А. Семендяева. – М. : Наука, 1977. – 228 с.

10. Корн Г. А. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. А. Корн, Т. М. Корн ; пер. с англ. И. Г. Арамановича. – М. : Наука, 1974. – 832 с.

11. Машина выправочно-подбивочно-рихтовочная ВПР-02: Техническое описание 1023.00.00.000 ТО и Инструкция по эксплуатации 1023.00.00.000 ИЭ / Министерство путей сообщения РФ ; Центральное конструкторское бюро тяжелых путевых машин. – М. : Транспорт, 1995. – 415 с.

12. Коган А. Я. К вопросу об оценке положения пути в плане методом хорд / А. Я. Коган // Надежность и эффективность работы железнодорожного пути в условиях Сибири : межвуз. сб. науч. трудов. – Новосибирск : НИИЖТ, 1980. – С. 46–48.

13. Коган А. Я. К вопросу о расчете положения пути в плане по стрелам несимметричной измерительной хорды / А. Я. Коган, С. В. Петуховский // Вестн. ВНИИЖТ. – 2002. – № 1. – С. 26–28.

14. Шутов А. П. Автоматизация измерений кривизны пути и проектирование выправки плана по непрерывной информации о его состоянии / А. П. Шутов // Вопросы проектирования и строительства железных дорог в условиях Сибири и Дальнего Востока : межвуз. сб. науч. трудов. – Новосибирск : НИИЖТ, 1983. – С. 98–103.

15. Шутов А. П. Автоматизация измерений кривизны пути для целей его содержания и оптимизация параметров плана линии / А. П. Шутов // Вопросы проектирования, строительства и реконструкции железных дорог Сибири : межвуз. сб. науч. трудов. – Новосибирск : НИИЖТ, 1984. – С. 74–78.

References

1. Popovich M. V., Bugaenko V. M., Atamanyuk A. V., Bashkatova L. V., Burakov A. A., Volkovoinov B. G., Volodin M. A., Gamolya YU. A., Dubrovin V. A., Zavgorodny G. V., Kovalsky V. F., Skripka S. L., Samokhin S. A., Sukhikh R. D. & Shtaraev S. G. *Putevye mashiny* [*Track machines*]. Moscow, Educational-methodical center on education in rail transport Publ., 2009, 820 p. (In Russian)

2. Popovich M. V., Belov A. V. & Uralov V. L. *Vypravka zheleznodorozhnogo puti sistemami sglazhivayushchego tipa* [*Alignment of railway track by smoothing type systems*]. Leningrad, LIIZhTI Publ., 1978, 48 p. (In Russian)

3. Popovich M. V., Volkovoinov B. G., Belov A. V. & Popovich A. M. *Mekhanizirovannaya vypravka puti:* v 3 ch. [*Mechanized track alignment*: in 3 pt]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2000, 126 p. (In Russian)

4. Atamanyuk A. V., Bredyuk V. B., Bugaenko V. M., Velikotnyi M. A., Volkovoinov B. G., Ershova K. B., Loginov M. A., Malyshev A. G., Nikonchuk M. O., Petukhovsky S. V. & Popovich M. V. *Putevye mashiny dlya vypravki zheleznodorozhnogo puti, uplotneniya i stabilizatsii ballastnogo sloya. Tekhnologicheskie*

sistemy [*Track machines for railway track alignment, packing and stabilizing ballast layer. Technological systems*]. Moscow, Educational-methodical center on education in rail transport Publ., 2008, 285 p. (In Russian)

5. Kolomiets V. P., Shirokov V. A. & Abramenkov A. I. Etalonnye sredstva kontrolya geometrii kolei i ikh sertifikatsiya [Standard means of track geometry checking and their certification]. *Track and track equipment*, 2004, no. 8, pp. 10–15. (In Russian)

6. Kolomiets V. P. & Korolkov V. I. Vliyanie staticheskogo parallaksa strel izgiba na vypravku puti [Effect of static bend arrows parallax on track alignment]. *Track and track equipment*, 2008, no. 1, pp. 13–15. (In Russian)

7. Kolomiets V. P. Eshche raz o mashinnoi vypravke puti [Once again about machine track alignment]. *Track and track equipment*, 2009, no. 9, pp. 8–12. (In Russian)

8. Aramanovich I. G., Lunts G. L. & Elsgolts L. E. *Funktsii kompleksnogo peremennogo. Operatsionnoe ischislenie. Teoriya ustoychivosti* [*Functions of complex variable. Operational calculus. Stability theory*]. Moscow, Science Publ., 1965, 392 p. (In Russian)

9. Dvyat G. B. Tablitsy integralov i drugie matematicheskie formuly [Tables of integrals and other mathematical formulas]. Tr. from English by N. V. Levi. Ed. by K. A. Semendjaev. Moscow, Science Publ., 1977, 228 p. (In Russian)

10. Korn G. A. & Korn T. M. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [*Mathematics handbook for scientists and engineers*]. Tr. from English by I. G. Aramanovich. Moscow, Science Publ., 1974, 832 p. (In Russian)

11. *Mashina vypravochno-podbivochno rikhtovochnaya VPR-02. Tekhnicheskoe opisanie 1023.00.00.000 TO i Instruktsiya po ekspluatatsii 1023.00.00.000 IE* [*LPM-02 liner-tamper planisher. Technical description 1023.00.00.000 TD and Operating instruction 1023.00.00.000 OE*]. Ministry of railway transport, Russian Federation; Central design bureau of heavy track machines. Moscow, Transport Publ., 1995, 415 p. (In Russian)

12. Kogan A. Ya. K voprosu ob otsenke polozheniya puti v plane metodom khord. Nadezhnost i effektivnost raboty zheleznodorozhnogo puti v usloviyakh Sibiri [On issue of evaluating tracks in terms of chords method. Reliability and efficiency of railway track in the conditions of Siberia]. *Intercollegiate collection of scientific papers.* Novosibirsk, NIIZhTI Publ., 1980, pp. 46–48. (In Russian)

13. Kogan A. Ya. & Petukhovsky S. V. K voprosu o raschete polozheniya puti v plane po strelam nesimmetrichnoy izmeritelnoy khordy [On issue of calculating track position in terms of arrows of asymmetric measuring chords]. Bulletin of VNIIZhTI, 2002, no. 1, pp. 26–28. (In Russian)

14. Shutov A. P. Avtomatizatsiya izmereniy krivizny puti i proektirovanie vypravki plana po nepreryvnoy informatsii o ego sostoyanii [Automation of track curvature measurement and design of plan adapting on continuous information of its state]. *Issues of railways design and construction in the conditions of Siberia and Far East: Intercollegiate collection of scientific papers.* Novosibirsk, NIIZhTI Publ., 1983, pp. 98–103. (In Russian)

15. Shutov A. P. Avtomatizatsiya izmereniy krivizny puti dlya tselei ego soderzhaniya i optimizatsiya parametrov plana linii [Automation of track curvature measurement for the purpose of its maintenance and optimization of line plan parameters]. *Issues of Siberia railways design, building and reconstruction. Intercollegiate collection of scientific papers.* Novosibirsk, NIIZhTI Publ., 1984, pp. 74–78. (In Russian)

ПЕТУХОВСКИЙ Сергей Вячеславович – канд. техн. наук, доцент, researchman@mail.ru (Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет).

УДК 656.212.5

В. А. Тепикин, А. Г. Котенко, И. А. Ролле

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБОВ РАСФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВОВ С ВАГОНАМИ, ЗАПРЕЩЕННЫМИ К РОСПУСКУ

Дата поступления: 08.11.2017
Решение о публикации: 21.11.2017

Аннотация

Цель: Повышение перерабатывающей способности сортировочных горок методом совершенствования технологических приемов роспуска составов с вагонами, запрещенными к роспуску (вагоны ЗСГ). **Методы:** Произведены теоретический анализ и обобщение научной литературы, периодических журналов и материалов сети Internet в области технологии роспуска составов с опасными грузами. По результатам анализа опыта работы сортировочных горок при расформировании исследовалась возможность расширения технологических приемов роспуска составов с вагонами ЗСГ. Для обоснования эффективности новых способов расформирования составов использовались критерии: время, затрачиваемое на производство маневровой работы; количество привлекаемых локомотивов. Также применялись методы теории маневровой работы для описания новых способов. **Результаты:** В дополнение к существующим способам работы с вагонами ЗСГ получены еще четыре. Сформулированы условия выбора способа производства маневровой работы для каждого случая, с учетом длины и количества отцепов, а также положение в составе. Представлены схемы производства маневровой работы для каждого из предлагаемых способов. Предложены аналитические зависимости для оценки времени на производство маневровой работы с вагонами ЗСГ. **Практическая значимость:** Применение новых технологических способов расформирования составов с вагонами ЗСГ позволит повысить перерабатывающую способность сортировочных горок, сохранить заданные темпы роспуска составов и не превышать заданный параметр времени простоя в парке прибытия.

Ключевые слова: Вагоны, запрещенные к роспуску, вагоны, имеющие ограничения по роспуску, перерабатывающая способность сортировочной горки, способы производства маневровой работы, способы работы с вагонами, запрещенными к роспуску.

*** Vladimir A. Tepikin**, postgraduate student, mr.tepikin@mail.ru; **Alexey G. Kotenko**, D. Eng. Sci., professor, head of department, kotenko@pgups.ru; **Igor A. Rolle**, Cand. Eng. Sci., associate professor, igor.rollet@inbox.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) IMPROVING TECHNIQUES OF BREAKING-UP TRAINS OF CARS UNAUTHORIZED FOR SPLITTING OUT

Summary

Objective: Increasing processing capability of hump yards by the method of improving technological techniques of splitting out trains of cars unauthorized for splitting out (further, ZhSG cars). **Methods:** Theoretical analysis and generalization of scientific literature, periodical journals and materials from Internet in the field of technology of splitting out trains with dangerous cargo are performed. According to the analysis of hump yard working experience in train breaking-up the possibility of expanding technological methods of splitting out SGI trains with cars was investigated. The criteria: time spent on producing shunting work; the number of hired locomotives were used to substantiate the effectiveness of new techniques of train breaking-up. Methods of shunting work theory have also been used to describe the new ways. **Results:** In addition to the existing methods of work with SGI four more techniques were

obtained. Conditions of selecting a technique for shunting work production for each case taking into account setout length and quantity as well as position in a train were formulated. Schemes of shunting work production for each of suggested techniques are presented. Analytical dependence for evaluation of time on shunting production with SGI cars were suggested. **Practical importance:** Application of new technological ways of train breaking-up with SGI cars allows increasing processing capability of hump yards, saving specified rates of trains splitting out and not exceeding specified idle time option at the arrival park.

Keywords: Cars unauthorized for splitting out, cars having restrictions for splitting out, processing capability of a hump yard, techniques of producing shunting work, techniques of working with cars unauthorized for splitting out.

Введение

На большинстве сортировочных горок российских железных дорог отсутствуют технические возможности для безопасного автоматизированного роспуска составов с вагонами, запрещенными к роспуску (вагоны ЗСГ). Поэтому в настоящее время расформирование таких составов осуществляется преимущественно способами осаживания и съема со стороны подгорочного парка.

Применение этих способов, как правило, влечет за собой увеличение продолжительности расформирования составов и, как следствие, снижение перерабатывающей способности сортировочных горок, задержки сверх нормативного времени простоя составов в парке прибытия, а в отдельных случаях – прекращение приема поездов на станцию.

Решение этой проблемы может осуществиться двумя способами:

– путем внедрения современных автоматизированных сортировочных систем, обеспечивающих безопасность роспуска составов с опасными грузами;

– путем совершенствования технологических приемов расформирования составов с вагонами ЗСГ.

В связи с тем, что первый путь требует остановки сортировочных горок и связан с большими капиталовложениями, способ совершенствования технологических приемов расформирования составов остается актуальным.

Современное состояние проблемы роспуска вагонов, имеющих ограничения

Соблюдение условий безопасного роспуска вагонов ЗСГ возможно при достаточно жестких ограничениях. Сортировочные горки должны иметь современное техническое оснащение и строго заданные планы и профили путей подгорочного парка [1, 2].

При строительстве современных сортировочных горок добиваются либо полного, либо частичного снятия ограничений по роспуску вагонов. Так, например, построенная на станции Лужская (Ленинградская обл.) современная горочная система полностью обеспечивает условия безопасного роспуска вагонов с опасными грузами на специализированные сортировочные пути, оборудованные точечными домкратовидными замедлителями и подтягивателями [3].

В условиях эксплуатации горок, как правило, необходимы периодическая выправка профилей путей сортировочного парка до расчетных и постоянное совершенствование автоматизации. К последним из таких отечественных разработок относится комплексная система автоматизированного управления сортировочным процессом (КСАУ СП), прошедшая тестовые испытания с использованием вагонов-имитаторов на сортировочной горке станции Орехово-Зуево. В настоящее время КСАУ СП внедрена на 19 сортировочных горках различной мощности. Таким об-

Рис. 1. Характеристика сортировочных горок

разом, на сети российских железных дорог только порядка 10 % сортировочных горок (рис. 1) оборудованы современными комплексами, которые позволяют распускать вагоны с опасными грузами, что, как считают специалисты, явно недостаточно [4].

Одним из известных предложений, направленных на преодоление названных недостатков, является способ с отстановкой вагонов ЗСГ в горочный тупик при его наличии. Но существуют ограничения как по вместимости горочного тупика, так и по возможности его постройки; такой способ работы с вагонами ЗСГ на сортировочных горках встречается крайне редко [5].

В связи с этим на большинстве эксплуатируемых горок роспуск вагонов ЗСГ производят следующими способами:

1) «осаживание» в подгорочный парк надвигаемым локомотивом;

2) «съем» локомотивом со стороны подгорочного парка.

Существенным недостатком первого способа является то, что он возможен, если полезная длина пути надвига равна или больше длины маневрового состава при локомотиве. Если такое условие не соблюдается, то использование данного способа невозможно и применяют способ «съема».

Способ «съема» со стороны подгорочного парка имеет смысл использовать, когда длина маневрового состава, подлежащая роспуску, больше полезной длины пути надвига. Его недостатком является увеличение интервала между роспуском составов, что связано также с необходимостью осаживания состава и соединения его с вагонами, стоящими на сортировочном пути, после накопления прикрытия в установленном размере. Кроме того, «съем» с привлечением второго локомотива приводит к большей продолжительности нахождения локомотива в сортировочном парке в ожидании как роспуска состава, так и начала расстановки отцепов по путям сортировочного парка. Это вызывает увеличение технологического горочного интервала, который зависит от количества работающих на станции локомотивов и технического оснащения сортировочной горки. Таким образом, устойчивым направлением по увеличению перерабатывающей способности на сортировочных горках при работе с вагонами ЗСГ, очевидно, будет большее количество способов производства маневров.

Постановка задачи исследования

Параметрическое описание перерабатывающей способности сортировочной горки производится по формуле [6]

$$U_{\text{пер}}^{\text{г}} = \frac{T}{t_{\text{г}}} m,$$

где T – суточный ресурс времени работы горки, мин; m – среднее количество вагонов в составе, ваг.; $t_г$ – величина горочного интервала, мин.

Из формулы видно, что перерабатывающая способность сортировочной горки обратно пропорциональна времени горочного интервала.

Величина горочного интервала рассчитывается следующим образом [6]:

$$t_г = \frac{T_ц}{N_р},$$

здесь $T_ц$ – горочный цикл, мин; $N_р$ – число расформированных при роспуске составов с горки за один цикл.

Горочный цикл включает заезд, надвиг, роспуск, осаживание и окончание формирования. Осаживание вагонов осуществляется после роспуска 2, 3 или 4 составов. В горочный цикл входит последовательность операций от момента окончания осаживания до момента окончания следующего осаживания [6].

Из рис. 2 следует, что время на операции по заезду, надвигу, осаживанию и окончание формирования не оказывает значимого влияния на горочный цикл. Как следствие, горочный цикл напрямую зависит от времени роспуска составов:

$$T_ц = f(T_{рос}).$$

Технологическое время роспуска состава с горки (в мин) определяется по формуле [7]

$$T_{рос} = t_{рос} + t'_{рос},$$

в которой $t_{рос}$ – время на роспуск состава без учета дополнительного времени на маневры с вагонами ЗСГ, мин; $t'_{рос}$ – время на маневры с вагонами ЗСГ, мин.

Время роспуска (в мин) рассчитывается следующим образом [7]:

$$t_{рос} = \frac{a l_в n_с}{\nu_{рос}},$$

где $l_в$ – условная длина вагона (15 м); $n_с$ – количество вагонов в составе, ваг.; $\nu_{рос}$ – средняя расчетная скорость роспуска состава, км/ч; a – коэффициент перевода км/ч в м/мин, равный 0,06.

Таким образом, в целях совершенствования технологических приемов расформирования на сортировочных горках составов с вагонами ЗСГ необходимо сформулировать условия выбора способа, учитывая длину и количество отцепов, а также положение в составе, разработать схемы для каждого способа производства маневровой работы, установить режимы движения при маневрах и типы полурейсов. С учетом схем маневровых передвижений и типов полурейсов предложить аналитическое выражение оценки времени, требуемое на роспуск составов с вагонами ЗСГ.

Условия выбора способа производства маневровой работы с вагонами ЗСГ на сортировочной горке

1. Способ «Съем локомотивом парка формирования» используется при следующем условии: если длина отцепа ЗСГ равна длине спускной части горки: $L_{втп\text{-}нтп} < n_{зсг} \cdot l_в$ (рис. 3) и есть возможность привлечения локомотива парка формирования. Тогда голова отцепа ЗСГ осаживается в подгорочный парк и локомотив парка формирования резервом или с вагонами соединяется с группой ЗСГ, затем после отцепки ее оттягивает на путь подгорочного парка.

2. Способ «Осаживание вторым горочным локомотивом» используется при условии, если отцеп ЗСГ позволяет занять замедлители верхней и средней тормозных позиций: $L_{втп\text{-}стп} \leq$ $\leq n_{зсг} \cdot l_в$ (см. рис. 3), то группа ЗСГ надвигается на спускную часть и зажимается замедлителями верхней и средней тормозных позиций, затем отцепляется и после этого оставшаяся часть надвигаемого состава вытягивается на горб горки. С соседнего пути надвига со стороны горки заезжает второй горочный локомотив резервом, прицепляется к

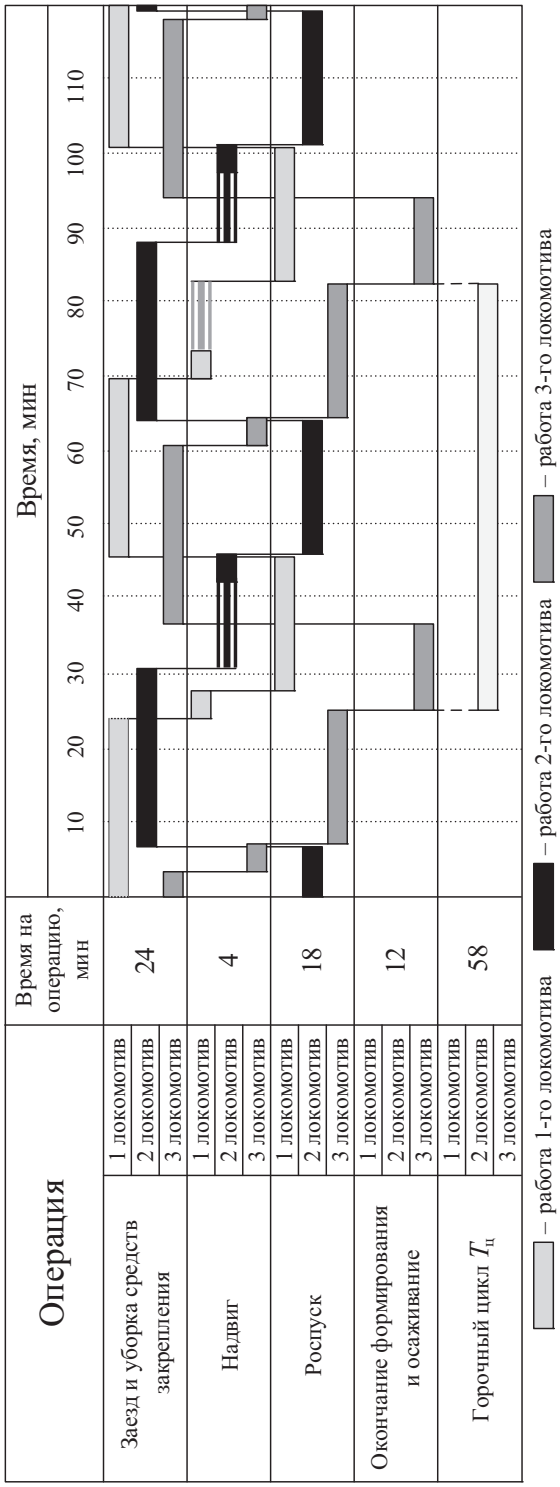


Рис. 2. График расформирования состава на двухпутной горке при трех локомотивах без вагонов ЗСГ

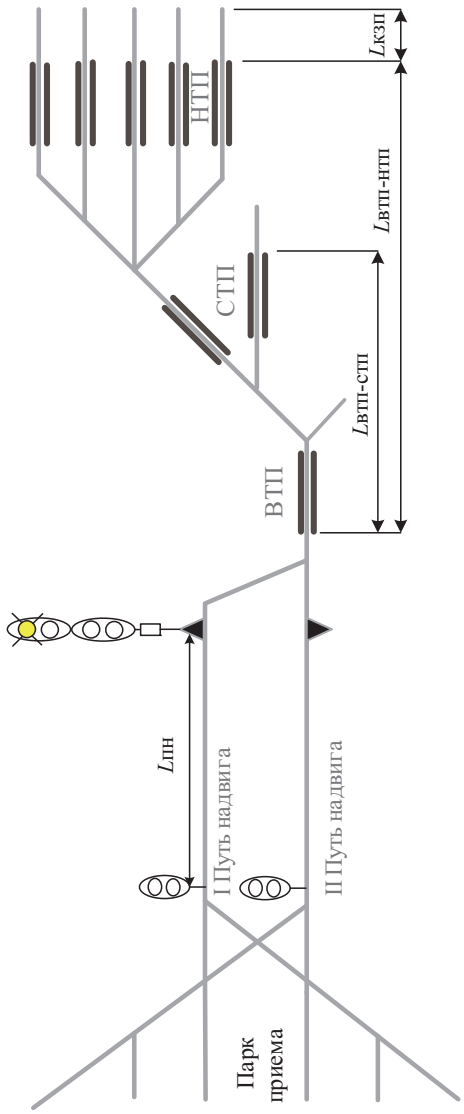


Рис. 3. Схема расположения устройств на сортировочной горке: ВТП – верхняя тормозная позиция; СТП – средняя тормозная позиция; НТП – нижняя тормозная позиция; КЗП – контроль занятости пути

группе вагонов ЗСГ, растормаживаются замедлители и осаживает на сортировочный путь в соответствии с назначением.

3. Способ «Съем с объединением в одну группу нескольких» используется при соблюдении следующего условия, если в составе несколько отцепов ЗСГ, находящихся на удалении друг от друга (от 1 до 3 вагонов), тогда такие отцепы объединяют в одну группу и вытягивают на противоположную сторону подгорочного парка. Затем в парке формирования группы ЗСГ перевозят на пути в соответствии с их назначением.

4. Способ «Роспуск до полной остановки» возможен только для вагонов цистерн или танк-контейнеров. Необходимым условием является: $L_{\text{кзп}} > n_{\text{р}} \cdot l_{\text{в}}$, достаточная свободность пути за замедлителями нижней тормозной позиции (см. рис. 2). Тогда вагон с опасным грузом в цистернах или танк-контейнерах распускается с сортировочной горки и вытормаживается до полной остановки в замедлителях нижней тормозной позиции, исключая сцепление и соударение со стоящими на пути вагонами. По окончании роспуска отцеп ЗСГ осаживается и сцепляется со стоящими на пути вагонами маневровым горочным локомотивом.

Если расположение вагонов в надвигаемом составе соответствует условиям нескольких способов, то применяется тот, при котором затраты времени минимальны.

Рассмотрим способ «Осаживание вторым горочным локомотивом» (рис. 4). Для этого способа используются следующие типы полурейсов (рис. 5): группа ЗСГ надвигается на спускную часть и зажимается замедлителями верхней и средней тормозных позиций, затем отцепляется, и после этого оставшаяся часть состава при локомотиве вытягивается на горб горки. После этого с соседнего пути надвига со стороны горки заезжает второй горочный локомотив резервом, прицепляется к группе вагонов ЗСГ, растормаживаются замедлители и осаживается на сортировочный путь в соответствии с назначением.

Аналитическое выражение для оценки затрачиваемого времени на производство маневровой работы с вагонами ЗСГ способом «Осаживание вторым горочным локомотивом» может быть представлено в виде

$$t'_{\text{рос}} = t_{\text{р}} + t_{\text{у}} + t_{\text{и}} + t_{\text{т}} + t_{\text{р}} + t_{\text{и}} + t_{\text{т}} + t_{\text{р}} + t_{\text{и}} + t_{\text{т}},$$

где $t_{\text{р}}$ – время разгона, мин; $t_{\text{т}}$ – время остановки, мин; $t_{\text{и}}$ – время движения по инерции,

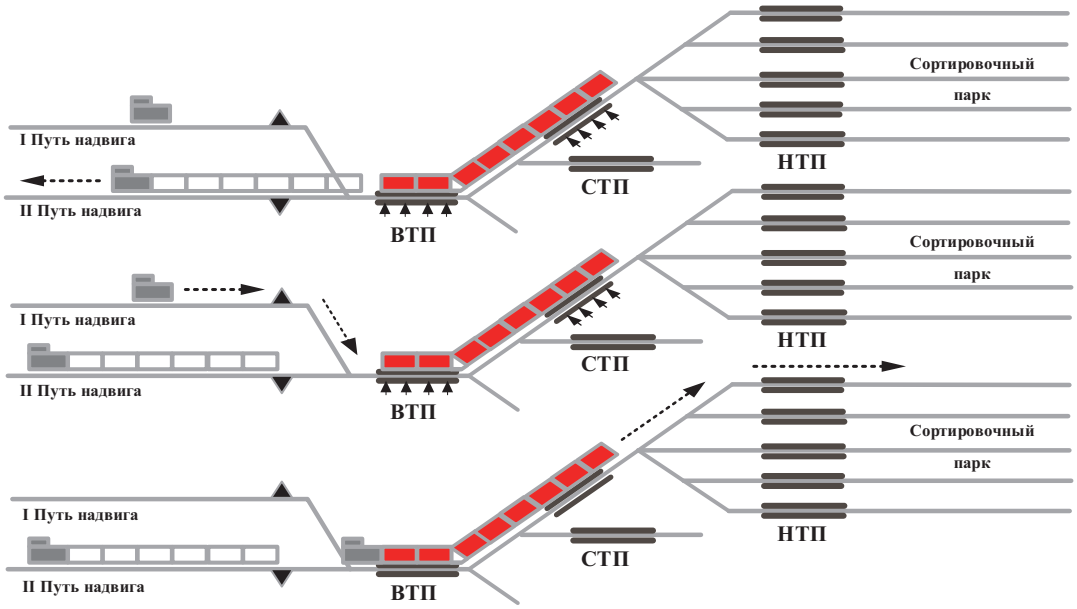


Рис. 4. Способ осаживания вторым горочным локомотивом

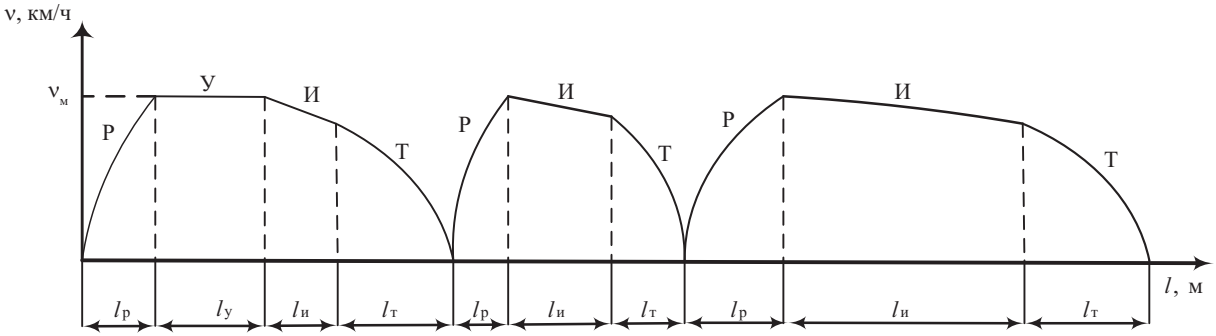


Рис. 5. Типы полурейсов при использовании способа «осаживания вторым горочным локомотивом»: РУИТ – разгон–движение с установленной скоростью–движение по инерции–торможение; РИТ – разгон–движение по инерции–торможение

мин; $t_у$ – время движения с установленной скоростью, мин; $v_м$ – скорость при производстве маневровой работы на сортировочной горке, км/ч; l – расстояние, м.

Представленные способы производства маневровой работы с вагонами ЗСГ и аналитическое выражение для оценки затрачиваемого времени при их использовании позволяют:

• на основе информации о составе подходящих поездов выбрать способ для производства маневровой работы с вагонами, имеющими ограничения по роспуску;

• сократить время горочного интервала $t_г$ и как результат повысить перерабатывающую способность $U^г_{пер}$ сортировочной горки;

• рассчитать время расформирования состава с вагонами ЗСГ на сортировочной горке;

• прогнозировать работу сортировочной горки, а также станции в системе АСУ, учитывая время на расформирование составов с вагонами ЗСГ.

Заключение

Таким образом, в существующих условиях повышение перерабатывающей способности сортировочной горки при расформировании составов с вагонами ЗСГ без капитальных вложений возможно путем разработки и совершенствования технологии производства маневровой работы [8–21]. Для существующих условий с учетом комплекса технических средств сортировочной горки предложена измененная технология производства маневровой работы с вагонами ЗСГ. К двум существующим технологическим способам производства маневровой работы с вагонами, имеющими ограничения по роспуску, можно предложить еще четыре дополнительных. Это позволит более рационально использовать локомотивы.

Получено аналитическое выражение для оценки времени, затрачиваемого при производстве маневровой работы с вагонами ЗСГ при роспуске с горки. В дальнейшем потребуется детальное исследование всей совокупности факторов, влияющих на перерабатывающую способность сортировочных горок при расформировании составов с вагонами ЗСГ, и на этой основе разработать методику оценки предлагаемых способов расформирования составов, провести их экспериментальную проверку и предложить практические рекомендации по применению результатов исследования.

Библиографический список

1. Минимальные нормы прикрытия вагонов с опасными грузами при постановке их в поезда и маневрах. Условия роспуска их с сортировочных горок. – М. : Транспорт, 2001. – 262 с.

2. Правила технической эксплуатации на железнодорожном транспорте Российской Федерации. – М. : Трансинфо ЛТД, 2016. – 515 с.

3. Позолотчикова Я. Г. С опасными грузами работать безопасно / Я. Г. Позолотчикова // Гудок. – 2015. – Вып. 153. – 31.08.

4. Березин А. Интеллектуальные горки / А. Березин // Гудок. – 2016. – Вып. 59. – 14.04.

5. Сотников Е. А. Эксплуатационная работа железных дорог (состояние, проблемы, перспективы) / Е. А. Сотников. – М. : Транспорт, 1986. – 256 с.

6. Ковалев В. И. Управление эксплуатационной работой на железнодорожном транспорте / В. И. Ковалев, В. А. Кудрявцев, А. Г. Котенко, В. И. Бадах, Е. Ю. Мокейчев, М. В. Стрелков. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2015. – 264 с.

7. Козырев С. В. Нормы времени на маневровые работы, выполняемые на железнодорожных станциях ОАО «РЖД», нормативы численности бригад маневровых локомотивов / С. В. Козырев. – М. : ОАО «РЖД», 2006. – 97 с.

8. Сотников Е. А. Интенсификация работы сортировочных станций / Е. А. Сотников. – М. : Транспорт, 1979. – 239 с.

9. Акулиничев В. М. Математические методы в эксплуатации железных дорог / В. М. Акулиничев, В. А. Кудрявцев, А. Н. Корешков. – М. : Транспорт, 1981. – 223 с.

10. Андреев С. С. Челябинск-Главный : проблемы и опыт / С. С. Андреев, Ю. И. Левантович // Железнодорожный транспорт. – 1980. – № 10. – С. 2–9.

11. Сотников Е. А. Методические рекомендации по применению способов повышения перерабатывающей способности сортировочных горок крупных сортировочных станций / Е. А. Сотников, И. И. Старковский, Л. Б. Тишков. – М. : Транспорт, 1981. – 57 с.

12. Акулиничев В. М. Методы интенсификации работы сортировочных станций / В. М. Акулиничев, В. А. Кудрявцев, А. Н. Корешков // Железные дороги мира. – 1980. – № 10. – С. 3–16.

13. Яриков И. М. Техническое и технологическое развитие важнейших сортировочных станций / И. М. Яриков, И. Н. Шапкин // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 8. – С. 11–14.

14. Деев В. В. Тяга поездов / В. В. Деев, Г. А. Ильин, Г. С. Афонин. – М. : Транспорт, 1987. – 264 с.

15. Ивасенко А. А. Перспективные направления развития сортировочных станций / А. А. Ивасенко // Проблемные аспекты развития транспортной системы : материалы науч.-практич. конференции с международным участием. – Иркутск : БГУЭП, 2015. – С. 73–77.

16. Пехтерев Ф. С. Основные научные направления в рамках разработки генеральной схемы развития сети железных дорог ОАО «РЖД» / Ф. С. Пехтерев // Бюл. Объед. Учен. совета ОАО «РЖД». – 2015. – № 4. – С. 13–22.

17. Голицына Е. С. Актуальность внедрения микропроцессорной горочной централизации / Е. С. Голицына // Молодой ученый. – 2017. – № 45. – С. 43–45.

18. Островский А. М. Проблема перевозки опасных грузов / А. М. Островский, В. И. Медведев, И. О. Телисенко // Транспорт РФ. – 2006. – № 2. – С. 57–60.

19. Островский А. М. Пропуск вагонов с опасными грузами через сортировочные горки / А. М. Островский, А. М. Лисютин // Научный мир. – Новосибирск : Сиб. гос. ун-т путей сообщения, 2012. – Т. 2, № 1. – С. 38–41.

20. Сивицкий Д. А. Моделирование работы специализированного сортировочного устройства и определение горочного технологического интервала / Д. А. Сивицкий // Транспорт Урала. – Екатеринбург : УГУПС, 2016. – № 3. – С. 100–105.

21. Тесленко И. О. Опасные грузы, условия переработки которых на сортировочных горках могут быть пересмотрены / И. О. Тесленко, М. В. Корнеев // Технические науки – от теории к практике : материалы XXVIII Междунар. науч.-практич. конференции. – Новосибирск : СибАК, 2013. – № 11. – С. 71–77.

References

1. *Minimalnye normy prikrytiya vagonov s opasnymi gruzami pri postanovke ikh v poezda i manevrakh. Usloviya rospuska ikh s sortirovochnykh gorok* [*Minimal standards of car cover with dangerous cargo in assigning them to trains and maneuvers. Conditions for splitting them out from hump yards*]. Moscow, Transport Publ., 2001, 262 p. (In Russian)

2. *Pravila tekhnicheskoj ekspluatatsii na zheleznodorozhnom transporte Rossijskoi Federatsii* [*Regulations of technical operation on railway transport of the Russian Federation*]. Moscow, Transinfo LTD Publ., 2016, 515 p. (In Russian)

3. Pozolotchikova Ya. G. S opasnymi gruzami rabotat bezopasno [Safely operating dangerous cargo]. *Hooter*, 2015, issue 153. 31 Avg. (In Russian)

4. Berezin A. Intellektualnye gorki [Intellectual descent plates]. *Hooter*, 2016, issue 59. 14 Apr. (In Russian)

5. Sotnikov E. A. *Ekspluatatsionnaya rabota zheleznykh dorog (sostoyanie, problemy, perspektivy)* [*Operational work of railways (status, problems and prospects)*]. Moscow, Transport Publ., 1986, 256 p. (In Russian)

6. Kovalev V. I., Kudryavtsev V. A., Kotenko A. G., Badakh V. I., Mokeichev E. Yu. & Strelkov M. V. *Upravlenie ekspluatatsionnoi rabotoi na zheleznodorozhnom transporte* [*Managing operation work on railway transport*]. Moscow, Educational-methodical center in education on rail transport Publ., 2015, 264 p. (In Russian)

7. Kozyrev S. V. *Normy vremeni na manevrovye raboty, vypolnyaemye na zheleznodorozhnykh stantsiyakh OAO "RZhD", normativy chislennosti brigad manevrovykh lokomotivov* [*Time standards for shunting work at railway stations of OJSC "RZhD*", *quantity specifications of shunting locomotives brigades*]. Moscow, OJSC "RZhD" Publ., 2006, 97 p. (In Russian)

8. Sotnikov E. A. *Intensifikatsiya raboty sortirovochnykh stantsii* [*Intensification of marshalling yards work*]. Moscow, Transport Publ.,1979, 239 p. (In Russian)

9. Akulinichev V. M., Kudryavtsev V. A. & Koreshkov A. N. *Matematicheskie metody v ekspluatatsii zheleznykh dorog* [*Mathematical methods in railway operation*]. Moscow, Transport Publ., 1981, 223 p. (In Russian)

10. Andreev S. S. & Levantovich Yu. I. Chelyabinsk-Glavnyyi: problemy i opyt [Chelyabinsk-Chief: issues and experience]. *Railway transport*, 1980, no. 10, pp. 2–9. (In Russian)

11. Sotnikov E. A., Starkovsky I. I. & Tishkov L. B. *Metodicheskie rekomendatsii po primeneniyu sposobov povysheniya pererabatyvayushchei sposobnosti sortirovochnykh gorok krupnykh sortirovochnykh stantsii* [*Methodical recommendations on applying increasing techniques of processing capability of great marshalling hump yards*]. Moscow, Transport Publ., 1981, 57 p. (In Russian)

12. Akulinichev V. M., Kudryavtsev V. A. & Koreshkov A. N. Metody intensifikatsii raboty sortirovochnykh stantsii [Methods of intensification of marshalling yards work]. *World railways*, 1980, no. 10, pp. 3–16. (In Russian)

13. Yarikov I. M. & Shapkin I. N. Tekhnicheskoe i tekhnologicheskoe razvitie vazhneishikh sortirovochnykh stantsii [Technical and technological development of marshalling yards]. *Railway transport*, 2010, no. 8, pp. 11–14. (In Russian)

14. Deev V. V., Ilin G. A. & Afonin G. S. *Tyaga poezdov* [*Train traction*]. Moscow, Transport Publ.,1987, 264 p. (In Russian)

15. Ivasenko A. A. Perspektivnye napravleniya razvitiya sortirovochnykh stantsii [Perspective directions of marshalling yards]. *Problematic aspects of transport system development: materials of scientific-practical conference with international participation*. Irkutsk, BGUEP Publ., 2015, pp. 73–77. (In Russian)

16. Pekhterev F. S. Osnovnye nauchnye napravleniya v ramkakh razrabotki generalnoi skhemy razvitiya seti zheleznykh dorog OJSC "RZhD" [The main scientific directions within the framework of developing general development plan of railway network of OJSC "RRW"]. *Bulletin of the United Scientific Council of OJSC "RRW"*, 2015, no. 4, pp. 13–22. (In Russian)

17. Golitsyna E. S. Aktualnost vnedreniya mikroprotsessornoi gorochnoi tsentralizatsii [Relevance of implementing microprocessor hump centralization]. *Young scientist,* 2017, no. 45, pp. 43–45. (In Russian)

18. Ostrovsky A. M., Medvedev V. I. & Telisenko I. O. Problema perevozki opasnykh gruzov [The problem of dangerous cargo transportation]. *Transport of the Russian Federation,* 2006, no. 2, pp. 57–60. (In Russian)

19. Ostrovsky A. M. & Lisyutin A. M. Propusk vagonov s opasnymi gruzami cherez sortirovochnye gorki [Passing cars with dangerous cargo through hump yards]. *Scientific world,* 2012, vol. 2, no. 1, pp. 38–41. (In Russian)

20. Sivitsky D. A. Modelirovanie raboty spetsializirovannogo sortirovochnogo ustroystva i opredelenie

gorochnogo tekhnologicheskogo interval [Modelling specialised screening device and determination of technological hump interval]. *Transport of the Ural*, 2016, no. 3, pp. 100–105. (In Russian)

21. Teslenko I. O. & Korneev M. V. Opasnye gruzy usloviya pererabotki, kotorykh na sortirovochnykh gorkakh mogut byt peresmotreny [Dangerous cargo whose processing conditions on marshalling yards may be revised]. *Engineering sciences – from theory to practice: the materials of the XXVIIIth International scientific-practical conference*. Novosibirsk, SibAC Publ., 2013, no. 11, pp. 71–77. (In Russian)

*ТЕПИКИН Владимир Александрович – аспирант, mr.tepikin@mail.ru; КОТЕНКО Алексей Геннадьевич – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, kotenko@pgups.ru; РОЛЛЕ Игорь Александрович – канд. техн. наук, доцент, igor.rollet@inbox.ru (Петербургский государственный университет путей сообщений Императора Александра I).

УДК 656.259.12

А. В. Якушев, С. А. Фомин, Ю. В. Гомонец

ИЗМЕНЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОЛЕСНЫХ ПАР ВАГОНОВ МЕТРО С УВЕЛИЧЕНИЕМ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ

Дата поступления: 07.09.2017
Решение о публикации: 21.11.2017

Аннотация

Цель: Анализ изменения электрического сопротивления колесных пар на протяжении срока службы с целью опытной проверки влияния электрического сопротивления колесных пар на надежность работы рельсовой цепи в шунтовом режиме. **Методы:** Величины электрических сопротивлений колесных пар получены методом прямых измерений. **Результаты:** Измерены электрические сопротивления 10 колесных пар различных заводов-изготовителей, имеющих разные сроки эксплуатации (от 4 до 22 лет), пробеги (от 480 864 до 2 759 954 км) и количества ремонтов. Проведен анализ изменения электрического сопротивления колесных пар на протяжении срока службы. **Практическая значимость:** Установлено, что срок службы, пробеги, количества ремонтов колесных пар не влияют на изменение их электрического сопротивления, следовательно, изменение шунтовой чувствительности рельсовой цепи зависит от других факторов.

Ключевые слова: Электрическое сопротивление, колесная пара, измерение, срок службы, срок эксплуатации, ремонт, рельсовая цепь, шунтовая чувствительность.

*** Alexey V. Yakushev**, Cand. Eng. Sci., associate professor, n-industria@yandex.ru; **Sergey A. Fomin**, postgraduate student, fsa307@yandex.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University); **Julia V. Gomonets**, chief of department, n-industria@yandex.ru (Co Ltd “N-industry”) CHANGING ELECTRICAL RESISTANCE VALUE OF SUBWAY CAR WHEELSETS WITH INCREASING OPERATION PERIOD

Summary

Objective: Analysis of change in electrical resistance of wheelsets during lifetime with the purpose of test influence checking of electric wheelset resistance on reliability of rail circuit in shunt regime. **Methods:** Values of wheelset electrical resistance are obtained by the method of direct measurements. **Results:** Electrical resistance of 10 wheelsets of different manufactures with different operation terms (from 4 to 22 years), runs (from 480 864 to 2 759 954 km) and the quantity of repairs are measured. The analysis of electrical resistance change of wheelsets during lifetime is performed. **Practical importance:** It is stated that lifetime, runs, the quantity wheelset repairs do not influence on the change of their electrical resistance, thus changing shunt sensitivity of rail circuit depends on the other factors.

Keywords: Electrical resistance, wheelset, measurement, lifetime, operation term, repair, rail circuit, shunt sensitivity.

Введение

Надежность работы рельсовой цепи (РЦ) в шунтовом режиме характеризуется абсолютной шунтовой чувствительностью $R_ш$ и коэффициентом чувствительности к нормативному поездному шунту [1, 2]. Когда на путь в пределах РЦ вступает поезд, образуется электрическая

цепь, в которой ток от трансформатора протекает через колесные пары. РЦ шунтируется, поскольку параллельно аппаратуре приемного конца подключается шунт – колесные пары поезда с очень малым электрическим сопротивлением. Сигнальный ток в основном пойдет через колесные пары, и ток в путевом реле резко падает [3, 4]. В результате фронтовые контакты путевого реле размыкаются, и РЦ считается занятой. Снижение тока (напряжения) в обмотке путевого реле под действием колесных пар называется шунтовым эффектом, а колесные пары – поездным шунтом.

Параметр $R_ш$ представляет собой сопротивление поездного шунта, при котором напряжение на входе приемника уменьшается до напряжения надежного возврата $U_{вн}$ при наихудших условиях шунтового режима [5–8].

РЦ должны иметь $R_ш \geq 0{,}06$ Ом, называемую нормативной.

Коэффициент чувствительности к нормативному поездному шунту $K_{шн}$ – это отношение напряжения надежного возврата $U_{вн}$ приемника к фактическому напряжению на его входе $U_ш$ при наложенном на РЦ шунте сопротивлением 0,06 Ом в наихудших условиях для шунтового режима, т. е. $K_ш = U_{вн} / U_ш$.

Шунтовой режим выполняется, если $R_ш \geq R_{шн} = 0{,}06$ Ом или $K_{шн} \geq 1$.

Для получения $U_{вн}$ на входе приемника при наихудших для шунтового режима условиях необходимо, чтобы напряжение питания РЦ было равно определенному (максимально допустимому) напряжению $U_{дш}$. Следовательно, для выполнения шунтового режима требуется, чтобы фактическое напряжение питания $U_ф$ было меньше или равно $U_{дш}$, т. е. $U_ф \leq U_{дш}$.

Коэффициент чувствительности к оборванной (поврежденной) нити $K_{кп}$ характеризует работу РЦ в контрольном режиме. Он представляет собой отношение величины $U_{вн}$ к фактическому напряжению приемника $U_к$ в контрольном режиме при критическом сопротивлении изоляции и критическом месте обрыва: $K_{кп} = U_{вн} / U_к$. Контрольный режим РЦ выполняется, если $K_{кп} \geq 1$.

Для определения величины $U_{вн}$ на входе приемника при наихудших для контрольного режима условиях необходимо, чтобы напряжение питания РЦ было равно определенному (максимально допустимому) напряжению $U_{дкп}$. Для обеспечения контрольного режима требуется, чтобы фактическое напряжение питания $U_ф$ было меньше или равно $U_{дкп}$, т. е. $U_ф \leq U_{дкп}$.

Коэффициенты $K_{пер}$, $K_{шн}$ и $K_{кп}$ используют при расчетах РЦ с учетом наиболее неблагоприятного сочетания параметров элементов аппаратуры и рельсовой линии в каждом из режимов.

Исходя из вышеприведенной теории [1], можно сделать предположение, что колесные пары существенного влияния на надежность работы РЦ в шунтовом режиме не оказывают, т. е. теоретически электрическое сопротивление колесной пары, замеренное при ее формировании, остается практически неизменным за весь период срока службы этой пары.

На практике существует проблема периодического появления «ложной свободности» РЦ, которая актуальна для ГУП «Петербургский метрополитен». Как правило, данная неисправность возникает при движении «облегченного» подвижного состава (подвижной состав участка моторно-рельсового транспорта используется для осуществления хозяйственных перевозок после окончания движения поездов на линиях метрополитена в так называемое «ночное окно»), но выявлялись случаи, когда подвижной состав, находившийся на участке пути, кратковременно становился «невидимым» для поездного диспетчера.

В настоящее время в действующем ГОСТ [9] в конструкторской документации на колесные пары тележек вагонов метрополитена серий ЕМ, 81-й и их модификаций требование по обязательному измерению электрического сопротивления колесных пар отсутствует. Однако для колесных пар тягового подвижного состава железных дорог при изготовлении [10, 11] электрическое сопротивление между бандажами должно составлять не более 0,01 Ом.

Для изготавливаемых колесных пар метрополитена по проекту «НеВа» замер электрического сопротивления обязателен. Применяемая Škoda Transportation a. s. (Чехия) технология измерений соответствует требованиям [11] (рис. 1).

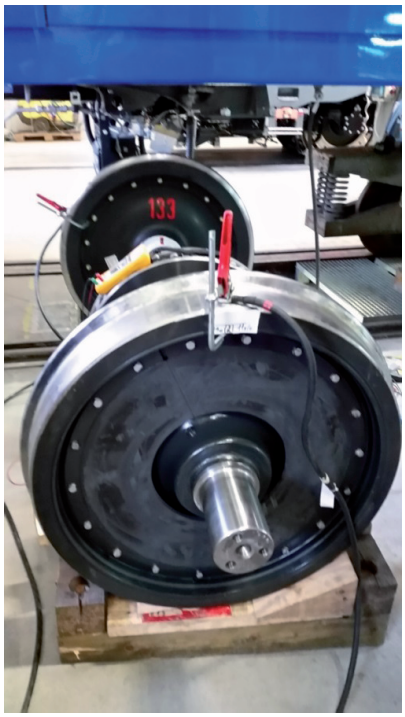


Рис. 1. Замер электрического сопротивления колесной пары вагона по проекту «НеВа»

С целью опытной проверки влияния колесных пар на надежность работы РЦ в шунтовом режиме Службой подвижного состава ГУП «Петербургский метрополитен» совместно с ООО «Н-Индустрия» был проведен анализ изменения электрического сопротивления колесных пар на протяжении срока службы.

Постановка задачи

В настоящей работе поставлена задача: определить опытным путем изменение величины электрического сопротивления колесных пар вагонов метро после ремонтов и обслуживаний в депо на протяжении всего срока эксплуатации.

Метод измерения электрического сопротивления колесных пар вагонов метро, его точность, применяемые средства измерений и вспомогательные устройства аналогичны изложенным в [11].

Объекты исследований

В качестве объектов исследований использовались: колесные пары неприводная (черт. DO556675 СБ) и приводная (черт. DO556676 СБ) по 1 шт. вагона метро поезда «НеВа», колесная пара (черт. 560.31.10.100 СБ (2.7170.31.10.012.20 СБ)) в количестве 8 шт. вагона метро 81-й серии.

На дату проведения измерений пробег колесных пар вагонов поезда «НеВа» составил 503 170 км, выполнена одна обточка колес в объеме ТР-3, начало эксплуатации колесных пар – с 2013 г., срок эксплуатации – 4 года.

Две колесные пары 2013 г. выпуска вагонов 81-й серии имели пробег 462 005 и 480 864 км, одна с 2001 г. эксплуатации – 2 103 388 км, одна с 1999 г. – 2 404 221 км, две с 1997 г. – 2 357 156 и 2 531 938 км, одна с 1996 г. – 2 759 954 км и одна с 1995 г. – 2 228 181 км.

Состояние всех исследуемых колесных пар приведено в табл. 1. Колесные пары вагонов 81-й серии имели от 1 до 3 переформирований, количество обточек текущих колес составило от 1 до 5, срок эксплуатации – от 4 до 22 лет, количество ремонтов – от 1 до 8 в объеме капитального (КР), среднего (СР) и текущего (ТР) ремонтов за период эксплуатации.

Средства измерений

Электрическое сопротивление объектов контролировалось с помощью средств измерений, имеющих действующие свидетельства о поверке: миллиомметр цифровой АМ-6000, измеритель температуры ИВТМ-7, линейка с диапазоном измерений 0–1000 мм.

Параметры прибора АМ-6000: диапазон измерений – от 1 до 200 мОм, разрешение –

ТАБЛИЦА 1. Анализ состояния исследуемых колесных пар

Номер колесной пары	Начало эксплуатации, год	Пробег, км	Объем ремонта и обслуживания колесной пары					Дата последнего переформирования	Количество обточек текущих колес
			КР	СР	ТР-3	ТО-4	Переформирование		
Чертеж DO 556675 СБ									
89	2013	503 170	–	–	1	–	–	–	1
Чертеж DO 556676 СБ									
60	2013	503 170	–	–	1	–	–	–	1
Чертежи 560.31.10.100 СБ и 2.7170.31.10.012.20 СБ									
66856	1997	2 357 156	–	1	6	6	2	2013	1
12922	1996	2 759 954	–	1	7	6	3	2015	2
01187	2001	2 103 388	1	2	3	6	2	2013	2
56871	2013	480 864	–	–	1	1	–	–	2
19885	2013	462 005	–	–	1	1	–	–	2
3071	1995	2 228 181	–	2	5	3	1	2007	5
06155	1999	2 404 221	–	1	6	6	2	2010	5
35996	1997	2 531 938	–	1	7	8	2	2010	3

Примечание. ТР-3 – текущий ремонт третьего объема, ТО-4 – техническое обслуживание четвертого объема.

0,1 мОм. Основную погрешность прибора в миллиомах вычисляли по формуле $\pm 0{,}01R_{изм} + 0{,}4$, где $R_{изм}$ – измеренная величина электрического сопротивления.

Методика измерений

Методика проведения измерений подробно изложена в [11]. Приведем основные ее положения.

Колесная пара устанавливалась на основание из электроизоляционного материала сопротивлением не менее 10 Ом·м, согласно рис. 2. Контактные медные пластины, соединенные с прибором АМ-6000 проводами по четырехзажимной схеме, крепили к поверхности катания колес струбцинами, выдерживая расстояние 50–100 мм (рис. 3).

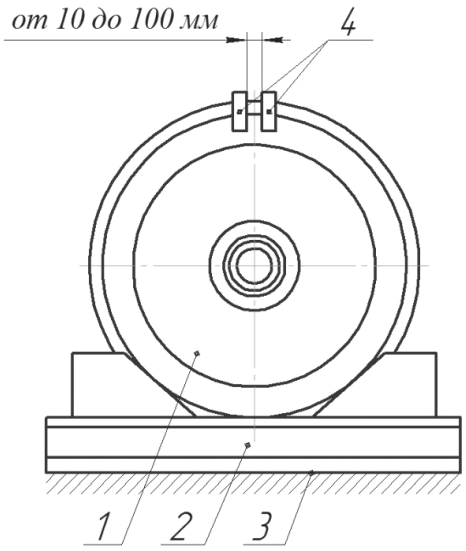


Рис. 2. Установка колесной пары: *1* – колесная пара; *2* – основание; *3* – электроизоляционный материал; *4* – зажимы

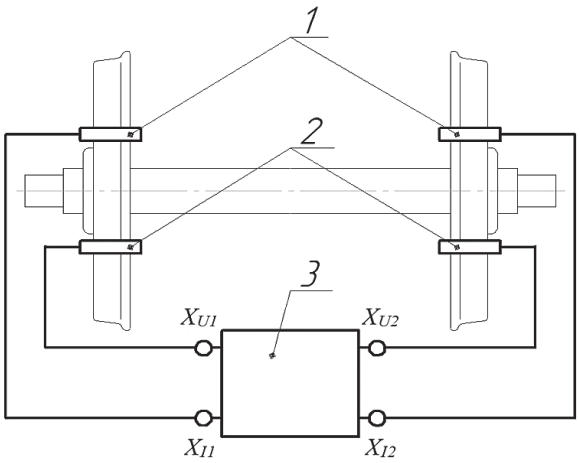


Рис. 3. Четырехзажимная схема измерения электрического сопротивления колесной пары: *1* – зажимы тока X_{I1}, X_{I2}; *2* – зажимы напряжения X_{U1}, X_{U2}; *3* – миллиомметр

Измеренное значение фиксировали по отсчетному устройству прибора. Электрическое сопротивление колесной пары менее 1 мОм не учитывали и приравнивали к нулю, в связи с тем, что в диапазоне от 0 до 1 мОм основная погрешность прибора составляла 0,4 мОм, что превышало измеренное значение. Производили переключение полярности цепей тока и напряжения прибора. Затем снова измеряли электрическое сопротивление. По результатам двух измерений находили среднеарифметическое значение. Его принимали за результат измерений для конкретной колесной пары.

Полученные фактические значения электрического сопротивления сравнивали с нормативным, равным 0,01 Ом (10 мОм). Если последнее было превышено, это означало отрицательный результат.

Результаты измерений

Результаты измерений электрического сопротивления колесных пар, с точностью три знака после запятой, приведены в табл. 2. Как из нее видно, вычисленные средние арифме-

ТАБЛИЦА 2. Результаты измерений

№ п/п	Номер колесной пары	Фактический диаметр колеса, мм	Предельные размеры диаметра колеса, мм	Результаты измерений, Ом		
				при прямом направлении тока	при обратном направлении тока	среднее арифметическое значение
Чертеж DO 556675 СБ						
1	89	844	от 770 до 850,5	0,000	0,000	0,000
Чертеж DO 556676 СБ						
2	60	844	от 770 до 850,5	0,000	0,000	0,000
Чертежи 560.31.10.100 СБ и 2.7170.31.10.012.20 СБ						
3	66 856	782	от 725 до 790	0,000	0,000	0,000
4	12 922	777	от 725 до 790	0,000	0,000	0,000
5	01 187	773	от 725 до 790	0,000	0,000	0,000
6	56 871	753	от 725 до 790	0,000	0,000	0,000
7	19 885	753	от 725 до 790	0,000	0,000	0,000
8	3071	750	от 725 до 790	0,000	0,000	0,000
9	06 155	750	от 725 до 790	0,000	0,000	0,000
10	35 996	749	от 725 до 790	0,000	0,000	0,000

тические величины электрического сопротивления по результатам фактических замеров равны нулю с точностью 3 знака после запятой. Изменения значений, регистрируемых прибором АМ-6000, происходили в четвертом знаке после запятой и составили менее 1 мОм. Вычисленные значения не превысили основной погрешности прибора 0,4 мОм, поэтому приравнены к нулю.

Стоит отметить, что фактические величины электрического сопротивления исследуемых колесных пар ниже примерно в 100 раз нормативного, равного 10 мОм. Количество, объемы и вид произведенных ремонтов [12], срок службы колесных пар [13] не повлияли на изменение электрического сопротивления.

Заключение

В результате проведенных исследований было установлено следующее.

Электрическое сопротивление колесных пар поезда метро «НеВа» и вагонов метро 81-й серии существенно ниже 10 мОм и не меняется от количества, объема и вида произведенного ремонта, а также от срока эксплуатации колесной пары.

Колесные пары поезда метро «НеВа» и вагонов метро 81-й серии, а также их состояние и срок эксплуатации не влияют на изменение шунтовой чувствительности РЦ.

В большей степени влияние на повышение электрического сопротивления оказывает переходное сопротивление между бандажом колесной пары и рельсом [14, 15]. Эта составляющая главным образом определяет сопротивление поездного шунта, изменяется в широких пределах в зависимости от состояния поверхности головок рельсов, числа осей на РЦ, давления на ось. Сопротивление поездного шунта увеличивается при появлении на головках рельсов ржавчины, грязи, шлака, пленок от бакелита и из нефтепродуктов.

Библиографический список

1. Воронин В. А. Рельсовые цепи на метрополитене / В. А. Воронин, А. П. Евпятьева, Н. В. Куксов. – М. : Транспорт, 2001. – 75 с.

2. Аркатов В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2009. – № 1 (17). – С. 26–29.

3. Дмитриева В. С. Основы железнодорожной автоматики и телемеханики / В. С. Дмитриева. – М. : Транспорт, 1982. – 168 с.

4. Махмутов К. М. Устройства интервального регулирования движения поездов на метрополитене / К. М. Махмутов. – М. : Транспорт, 1986. – 351 с.

5. Дмитриев В. С. Системы автоблокировки с рельсовыми цепями тональной частоты / В. С. Дмитриев, В. А. Минин. – М. : Транспорт, 1992. – 181 с.

6. Солнцев А. М. Устройства автоблокировки на метрополитене / А. М. Солнцев, К. И. Кудринская. – М. : Изд-во литературы по строительству, 1967. – 282 с.

7. Устройства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) Московского метрополитена. Технология обслуживания. – М. : Транспорт, 1997. – 192 с.

8. Устройства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) на метрополитенах. Технология обслуживания. – М. : Транспорт, 1991. – 176 с.

9. ГОСТ Р 51255–99. Колесные пары для вагонов метрополитена. Общие требования безопасности. – М. : Изд-во стандартов, 1999.

10. ГОСТ 11018–2011. Колесные пары тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия. – М. : Стандартинформ, 2012.

11. ГОСТ 31536–2012. Колесные пары тягового подвижного состава. Метод контроля электрического сопротивления. – М. : Стандартинформ, 2014.

12. Миронов В. И. Способ определения свойств поверхностного слоя материала грузовых вагонов / В. И. Миронов, А. В. Якушев // Подвижной состав XXI века : идеи, требования, проекты : тез. докл. V Междунар. науч.-технич. конференции. – СПб. : ПГУПС, 2007. – С. 104–107.

13. Миронов В. И. Повышение ресурса и живучести вагонных тележек / В. И. Миронов, В. П. Ефимов, А. В. Якушев // Проблемы механики сплошных сред и смежные вопросы технологии машиностроения : сб. докл. III конференции ДВО РАН ИМиМ. – Комсомольск-на-Амуре : ИМиМ ДВО РАН, 2005. – С. 212–218.

14. Бамбулевич В. Б. Испытание деталей и узлов объединения на стендах – оперативный и надежный способ оценки их качества / В. Б. Бамбулевич, Н. Л. Николаев, А. В. Якушев // Тяжелое машиностроение. – 2004. – № 4. – С. 11–12.

15. Николаев Н. Л. Испытание конструкционных материалов – составляющая высокого качества выпускаемой продукции / Н. Л. Николаев, А. В. Якушев // Тяжелое машиностроение. – 2004. – № 4. – С. 13–14.

References

1. Voronin V. A., Evpyateva A. P. & Kuksov N. V. *Relsovye tsepi na metropolitene* [*Rail circuit on subways*]. Moscow, Transport Publ., 2001, 75 p. (In Russian)

2. Arkatov V. S. & Kravtsov Yu. A. Relsovye tsepi. Analiz raboty i tekhnicheskoe obsluzhivanie [Rail circuit. Analysis of operation and maintenance]. *Cars and car equipment*, 2009, no. 1 (17), pp. 26–29. (In Russian)

3. Dmitrieva V. S. *Osnovy zheleznodorozhnoi avtomatiki i telemekhaniki* [*Basics of railway automatics and telemechanics*]. Moscow, Transport Publ., 1982, 168 p. (In Russian)

4. Makhmutov K. M. *Ustrojstva intervalnogo regulirovaniya dvizheniya poezdov na metropolitene* [*Devices of interval underground train regulation in metro*]. Moscow, Transport Publ., 1986, 351 p. (In Russian)

5. Dmitriev V. S. & Minin V. A. *Sistemy avtoblokirovki s relsovymi tsepyami tonalnoj chastity* [*Autolock systems with rail tone frequency chains*]. Moscow, Transport Publ., 1992, 181 p. (In Russian)

6. Solntsev A. M. & Kudrinskaya K. I. *Ustrojstva avtoblokirovki na metropolitene* [*Auto-lock devices in metro*]. Moscow, Publishing house of literature in building, 1967, 282 p. (In Russian)

7. *Ustrojstva signalizatsii, tsentralizatsii i blokirovki (SSB) Moskovskogo metropolitena. Tekhnologiya obsluzhivaniya* [*Devices of signalling, centralization and blocking (SSB) of Moscow metro. Technology of service*]. Moscow, Transport Publ., 1997, 192 p. (In Russian)

8. *Ustrojstva signalizatsii, tsentralizatsii i blokirovki (SSB) na metropolitenakh. Tekhnologiya obsluzhivaniya* [*Devices of signalling, centralization and blocking (SSB) in metro. Technology of service*]. Moscow, Transport Publ., 1991, 176 p. (In Russian)

9. *GOST 51255–99. Kolesnye pary dlya vagonov metropolitena. Obshchie trebovaniya bezopasnosti* [*State Standard Specification 51255–99. Wheelsets for metro cars. General safety requirements*]. Moscow, Standard Publishing house, 1999. (In Russian)

10. *GOST 11018–2011. Kolesnye pary tyagovogo podvizhnogo sostava zheleznykh dorog kolei 1520 mm. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [*State Standard Specification 11018–2011. Wheelsets of drag-out rolling stock of 1520 mm railway track. General technical conditions*]. Moscow, Standardinform Publ., 2012. (In Russian)

11. *GOST 31536–2012. Kolesnye pary tyagovogo podvizhnogo sostava. Metod kontrolya elektricheskogo soprotivleniya* [*State Standard Specification 31536–2012. Wheelsets of drag-out rolling stock. Method of electric resistance checking*]. Moscow, Standardinform Publ., 2014. (In Russian)

12. Mironov V. I. & Yakushev A. V. Sposob opredeleniya svoist poverkhnostnogo sloya materiala gruzovykh vagonov [The way of determining properties of the surface material layer of freight cars]. *Rolling stock of the XXIth century: ideas, requirements, projects: Report abstracts of the Vth International scientific-technical conference.* Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2007, pp. 104–107. (In Russian)

13. Mironov V. I., Efimov V. P. & Yakushev A. V. Povyshenie resursa i zhivuchesti vagonnykh telezhek [Increasing resource and durability of car bogies]. *Continuum Mechanics problems and related issues of mechanical engineering technology. Proceedings of the IIIrd conference of FEB RAS IMiM.* Komsomolsk-on-Amur, IMiM FEB RAS Publ., 2005, pp. 212–218. (In Russian)

14. Bambulevich V. B., Nikolaev N. L. & Yakushev A. V. Ispytanie detaley i uzlov obedineniya na stendakh – operativnyi i nadezhnyi sposob otsenki ikh kachestva [Testing parts and blocks of an association on stands is a quick and reliable way of evaluating their quality]. *Heavy machine engineering*, 2004, no. 4, pp. 11–12. (In Russian)

15. Nikolaev N. L. & Yakushev A. V. Ispytanie konstruktsionnykh materialov – sostavlyayushchaya vysokogo kachestva vypuskaemoy produktsii [Testing construction materials is a component of high quality of output production]. *Heavy machine engineering,* 2004, no. 4, pp. 13–14. (In Russian)

*ЯКУШЕВ Алексей Вячеславович – канд. техн. наук, доцент, n-industria@yandex.ru; ФОМИН Сергей Анатольевич – аспирант, fsa307@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); ГОМОНЕЦ Юлия Витальевна – начальник отдела, n-industria@yandex.ru (ООО «Н-Индустрия»).

УДК 007.52

А. К. Канаев, Э. В. Логин

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТЬЮ CARRIER ETHERNET

Дата поступления: 30.10.2017
Решение о публикации: 10.11.2017

Аннотация

Цель: Раскрыть особенности процесса периодической проверки сегментов сети и процесса информирования системы управления (СУ) о неисправностях в маршрутах сети. На основе этих двух процессов сформировать алгоритм, описывающий взаимосвязанную работу ключевых механизмов по управлению, контролю и эксплуатации OAM (Operation, Administration, Maintenance) в Carrier Ethernet (CE). Получение модели системы управления сетью CE, с учетом которой возможно формирование требований к элементам и подпроцессам в перспективной системе управления на основе технологии CE. **Методы:** Моделирование этого процесса контроля и управления состоянием элементов сети производится на основе принципа имитационного моделирования. Применяется дискретно-событийное моделирование как способ создания имитационной модели, где функционирование элементов сети описывается с использованием теории массового обслуживания. **Результаты:** Выполненная с помощью полученной модели оценка временных характеристик процессов функционирования СУ сетью CE при изменении вероятностно-временных характеристик (ВВХ) отдельных подпроцессов позволяет на этапах планирования и проектирования оценивать соответствие перспективной СУ сетью CE требованиям по оперативности реализации цикла управления, а в случае несоответствия этим требованиям формировать обоснованные рекомендации по изменению ВВХ отдельных подпроцессов для выполнения соответствия требованиям к процессу управления сетью в целом. **Практическая значимость:** Модель процессов контроля и управления состояниями сетевых элементов CE позволяет на этапе проектирования формировать требования к перспективной СУ, а также обоснованно выбирать значения временных параметров подпроцессов, входящих в общий процесс управления.

Ключевые слова: Carrier Ethernet, модель, агентное управление, дискретно-событийная модель, AnyLogic, механизмы OAM, транспортная сеть.

Andrei K. Kanaev, D. Eng. Sci., professor, head of Department, kanaevak@mail.ru; *** Elina V. Login**, postgraduate student, assistant, elinabeneta@yandex.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) MODEL OF FUNCTIONING CONTROL SYSTEM OF CARRIER ETHERNET TRANSPORT NETWORK

Summary

Objective: Reveal peculiarities of periodic checking process of network segments and the process of control system (CS) informing about network route faults. On the base of these two processes generate the algorithm describing interrelated work of key mechanisms for management, control and operation

of OAM (Operation, Administration, Maintenance) in the Carrier Ethernet (CE). Obtaining CE network management system model with whose regard it is possible to form requirements to elements and subprocesses in perspective technology-based management system system (CS). **Methods:** Modelling this process of checking and control of network element state is performed on the base of simulation principle. Discrete event modeling as a technique creating a simulation model, where functioning network elements are described with the use of queueing theory is applied. **Results:** Estimate of time characteristics of SU functioning processes by CE network performed with the help of the model obtained in changing probabilistic-temporary characteristics of (VVH) individual subprocesses allows evaluating correspondence of SU perspective by CE network to requirements in implementation efficiency of control cycle at the stages of planning and design. But in case of inadequacy to these requirements it allows forming sound recommendations for changing VVH individual subprocesses to perform conformity to requirements for network management process in the large. **Practical importance:** The model of checking and control processes of CE network elements condition allows forming requirements for CE perspective as well as reasonably selecting time parameter values of subprocesses within the overall control process during design stage.

Keywords: Carrier Ethernet, model, agent control, discrete-event model, AnyLogic, OAM mechanisms, transport net.

В современных телекоммуникационных системах (ТКС) предъявляются высокие требования к сетям и элементам, из которых они состоят. Ужесточение требований к сетям связано с появлением в ТКС и развитием соответствующих систем управления (СУ). Наиболее актуальными в настоящее время являются пакетные технологии операторского класса, такие как Carrier Ethernet (CE), отличающаяся наличием комплекса стандартизированных механизмов [1, 2] по управлению неисправностями, производительностью и конфигурациями, что в целом представляет собой механизмы управления и эксплуатации [3]. Но сейчас в явном виде не существует единой методической основы для систем управления, которая позволила бы интегрировать процессы управления и эксплуатации CE с учетом требований и возможностей заказчика. В [4] рассмотрены достоинства и недостатки сетей CE и дана оценка основных механизмов. Предлагаемый в статье алгоритм процесса контроля и управления состояниями элементов сети CE включает в себя набор ключевых механизмов по управлению, контролю и эксплуатации OAM (Operation, Administration, Maintenance) [5]. Представленная модель дает оценку длительности цикла управления для двух процессов: периодической проверки сегментов сети CE и информирования СУ о неисправностях в маршрутах этой сети.

Описание процесса управления состоянием элементов сети CE

Технология CE использует в цепочке управления ряд протоколов для реализации процессов управления и контроля, называемыми механизмами OAM [6–9]. Эти протоколы позволяют контролировать и управлять состояниями элементов сети с помощью процессов периодической проверки маршрутов и информирования СУ о неисправностях в маршрутах сети. С учетом проанализированных [6, 9] механизмов организации процессов контроля и управления состояниями элементов сети сформирован единый алгоритм рассматриваемых процессов (рис. 1):

1. Процесс периодического контроля и управления состояниями элементов сети организуется следующим образом. В случае установки источника запроса СУ запускается процесс проверки маршрутов с помощью сообщения CCM (Contituity Check Message). На каждый маршрут сети отправляются сообщения CCM с некоторой временной периодичностью (от

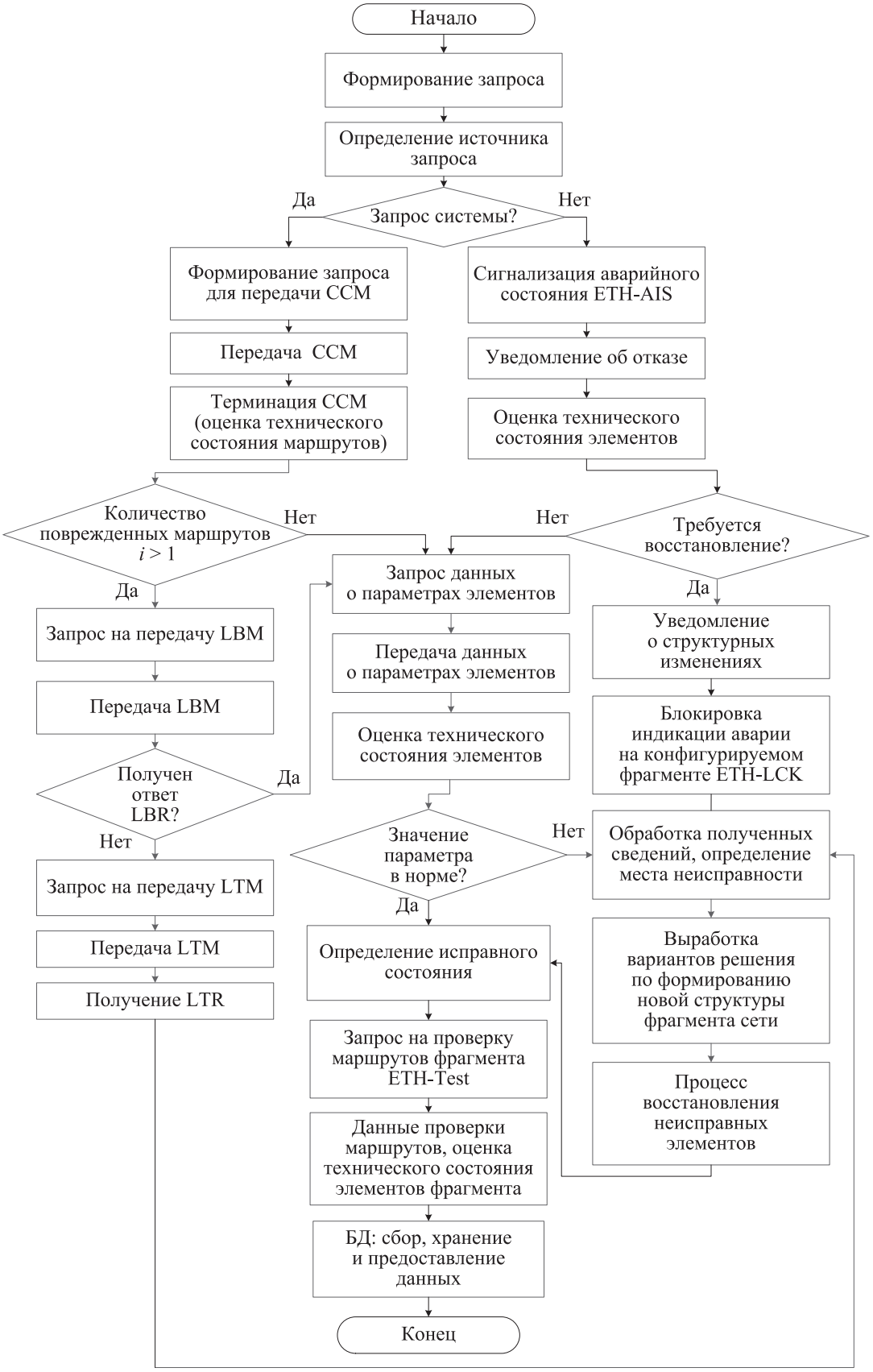


Рис. 1. Алгоритм процессов контроля и управления состоянием элементов сети CE

0,1 до 10 с). Результат фиксируется путем терминации данного сообщения в конце маршрута на устройстве MEP (оконечное устройство маршрута в данном домене). Информация о терминации передается управляющему агенту по каналу схемы взаимодействия агента CE и элемента сети [9]. После этого с помощью механизмов LBM/LBR (проверка двунаправленной связности фрагмента или маршрута сети) и LTM/LTR (локализация места неисправности) устанавливаются все неисправные маршруты и элементы, а один из трех блоков управления в узле СУ на основе полученных данных о параметрах элементов вырабатывает варианты решения по реструктуризации фрагмента сети.

2. При внешнем запросе фрагмента сети СУ получает сигнальное сообщение AIS (Automatic Indication Signal). Это такой режим работы СУ, при котором устанавливается неисправный маршрут и формируется новая структура фрагмента сети с изменением таблицы маршрутов на основании информационных данных элемента сети. Инициатором данного процесса является фрагмент сети, сигнализирующий о неисправном состоянии маршрута с целью оперативного информирования о состоянии элемента сети. После оценки технического состояния элементов поврежденного маршрута и в случае необходимости восстановления в маршруте запускается сигнал, который блокирует индикацию неисправного элемента LCK (Locked Signal). После этого выявляется место неисправности, производится реконфигурация фрагмента сети и запускается процесс восстановления неисправности маршрута. После установки исправного состояния маршрута запускается тестовый сигнал Test для контрольной проверки.

При моделировании процессов управления сетью CE введены следующие ограничения и допущения: 1) функции распределения случайных величин относятся к классу экспоненциальных; 2) вероятности, соответствующие ветвям цепочечного алгоритма, определяются статистическими методами; 3) времена реализации отдельных блоков цепочечного алгоритма имеют экспоненциальное распределение; 4) модель предполагает отсутствие новых событий до окончания обработки предыдущего цикла; 5) потоки событий, не конкурирующие.

Описание исходных данных для модели процессов контроля и управления состояниями элементов сети CE

Элементами транспортной сети CE являются коммутаторы, предназначенные для выполнения функций соединения узлов сети в пределах одного домена CE. Под доменом сети CE понимается набор соединенных коммутаторов и маршрутизаторов под управлением одного оператора или в пределах одного сегмента сети. Доменов может быть несколько (до 7 вложенных доменов).

Имитационный метод моделирования представляет собой получение частных численных решений сформулированной задачи с помощью численных методов или на основе аналитических решений [10–12]. Для решения поставленной задачи по созданию имитационной модели выбрана среда моделирования AnyLogic [13–15], благодаря которой разработана модель процессов периодического контроля и управления состояниями элементов сети CE.

Математически каждый элемент сети описывается с использованием теории массового обслуживания, которая рассматривает входные потоки запросов, очереди, устройства обслуживания, выходные потоки обработанных запросов и т. д.

На рис. 2 представлена цепочка блоков, которая моделирует появление разного типа заявок (сообщения CCM, поиск неисправного элемента, запросы на параметры и др.).

В таблице приведены данные по подпроцессам моделируемого процесса периодического контроля и управления состояниями элементов сети CE.

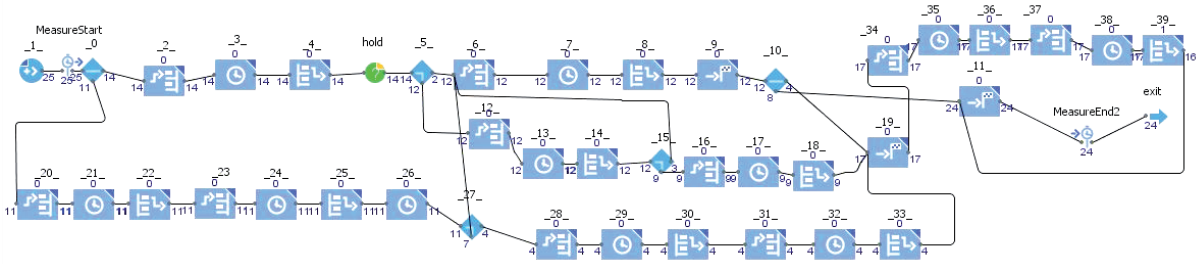


Рис. 2. Цепочечный алгоритм модели в формате среды моделирования AnyLogic

Подпроцессы моделируемого процесса

Номера блоков	Тип сообщения	Подпроцесс
_2_…_4_	CCM	Проверка целостности маршрутов
_12_…_14_	LBM/LTR	Проверка двунаправленной связности
_16_…_18_	LTM/LTR	Локализация неисправности
_6_…9_, _11_	Запросы и данные	Проверка параметров элементов сети и передача информации в БД
_19_, _23_…_25_	Уведомления	Изменение структуры сети связи, уведомление об AIS
_20_…_22_	ETH-AIS	Сигнализация аварийного состояния элемента сети
_31_…_33_	ETH-LCK	Блокировка индикации аварии на конфигурируемом фрагменте сети
_37_…_39_	ETH-Test	Запрос на проверку параметров связности маршрута

Результаты моделирования

Для каждого подпроцесса в модели установлено свое распределение времени формирования сообщения, задаваемое по случайному закону распределения. На рис. 3 представлен график, который иллюстрирует изменение длительности цикла управления ($T_ц$) в рамках моделируемого временного отрезка ($T_{мод}$) и при вводимых случайных значениях параметра времени формирования сообщения ($T_{ФС}$). На нем указаны реализуемые в тот или иной момент времени моделирования подпроцессы, которые в большей степени вносят временной вклад в общую длительность цикла. Полученные значения при сопоставлении результатов с задействованными в эксперименте подпроцессами говорят о существенном вкладе в значение длительности цикла управления фрагментом сети ряда подпроцессов, таких как LBM–LBR (проверка двунаправленной связности), LTM–LTR (локализация неисправности) и AIS (информирование СУ о наличии неисправного маршрута фрагмента сети). Стоит отметить, что наибольшее значение $T_ц$ достигается при выполнении подпроцесса локализации неисправности LTM–LTR (см. рис. 3).

На рис. 4 изображен график длительности цикла управления при заданных значениях (5, 50 и 80 мс) параметра $T_{ФС}$. При задании различных значений $T_{ФС}$ внутри коммутатора было установлено, что модель нечувствительна к данному параметру и время длительности цикла изменяется незначительно (в пределах 1–2 с).

На рис. 5 представлены графики длительностей цикла $T_ц$ при заданных значениях параметра периодичности посылки сообщения для проверки целостности маршрута сети ΔT_{CCM}. Выявлено, что данный параметр влияет

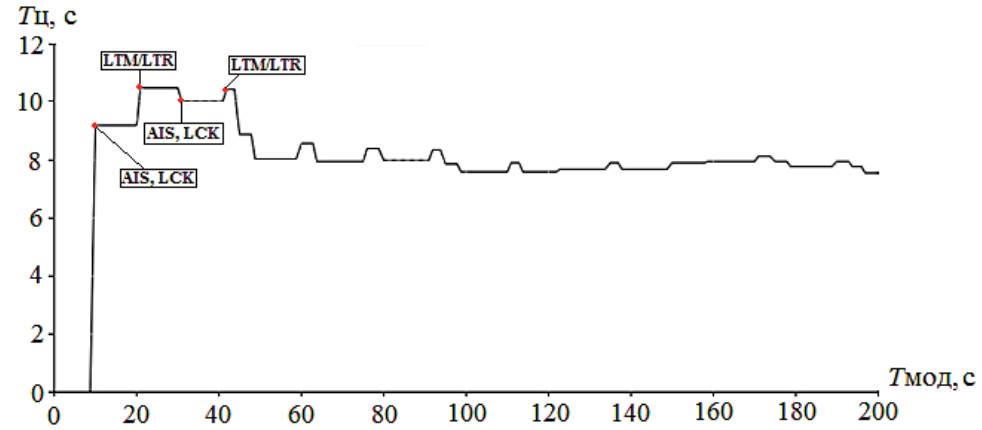


Рис. 3. График длительности цикла управления ($T_ц$) в условиях случайной длительности формирования сообщения ($T_{ФС}$) с указанием подпроцессов, вносящих наибольший вклад в длительность цикла

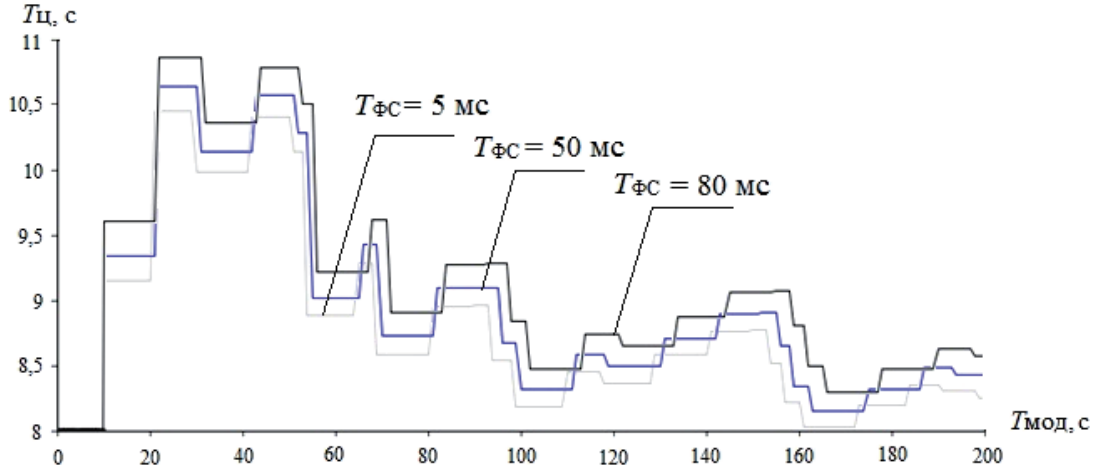


Рис. 4. График длительности цикла управления ($T_ц$) при заданных значениях параметра времени формирования сообщения (5, 50 и 80 мс)

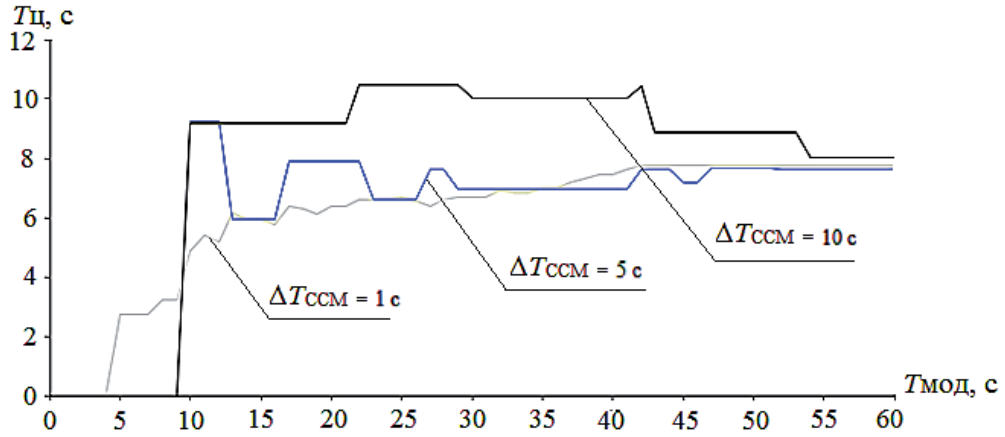


Рис. 5. График длительности цикла управления ($T_ц$) при изменении периодичности проверочного сообщения $\Delta T_{ССМ}$ (1, 5 и 10 с)

на длительность цикла: менее 9 с при периодичности $\Delta T_{ССМ}$ от 1 до 5 с. Стоит отметить то, что максимальная величина $T_ц = 9$ с достигается один раз за все время моделирования $T_{мод}$. Это говорит о большой дисперсии распределения параметра длительности цикла при $\Delta T_{ССМ} = 5$ с. То есть, начиная с $\Delta T_{ССМ} > 5$ с, длительность цикла имеет значение в пределах 6–10 с и практически не изменяется, демонстрируя небольшую дисперсию распределения параметра $T_ц$. Фактически решается задача обоснования и выбора оптимального значения периодичности посылки сообщения ССМ, при котором возможно без увеличения длительности цикла контролировать состояние элементов, не теряя при этом из контроля другие события в сети.

Заключение

Полученные данные позволяют оценить вклад различных подпроцессов (проверка двунаправленной связности, локализация неисправности, информирование о неисправности и др.) в общую длительность цикла управления, а также соответствие их требуемым значениям.

Представленный в работе способ моделирования относится к имитационному и дает возможность вносить изменения в модель относительно параметров, задаваемых на основании соответствующих законов распределения случайных величин и их параметров. Таким образом, модель может использоваться для оценки процессов управления сетями как различного масштаба, так и разной сложности.

С помощью модели также можно оценить чувствительность системы на изменение входных параметров. Например, периодичность сообщения ССМ в пределах от 1 до 5 с уже демонстрирует высокую дисперсию распределения, но при этом имеет относительно небольшую длительность цикла управления. Таким образом, решается задача обоснованного выбора значения входных параметров СУ.

Библиографический список

1. MEF 33 Ethernet Access Services Definitions. – Phase 2. – The Metro Ethernet Forum, 2012.

2. MEF 6.1 Ethernet Services Definitions. – Phase 2. – The Metro Ethernet Forum, 2008.

3. Yaakov (Jonathan) Stein Ethernet vs. MPLS-TP in Access Networks. – URL : http://www.dspcsp.com/lectures/ethtp.pdf (дата обращения : 21.04.2016).

4. Бенета Э. В. Выбор телекоммуникационной технологии операторского класса / Э. В. Бенета, А. К. Канаев // Автоматика, связь, информатика. – 2016. – Вып. 7. – С. 13–15.

5. MEF 30.1 Service OAM Fault Management Implementation Agreement. – Phase 2. – The Metro Ethernet Forum, 2013.

6. Бенета Э. В. Анализ функций OAM в технологии Carrie Ethernet / Э. В. Бенета, А. К. Канаев // 71-я Всерос. науч.-технич. конференция, посвященная Дню радио. Секция «Телекоммуникации на железнодорожном транспорте» : труды конференции 20–28 апреля 2016 г. – СПб. : СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. – С. 241–242.

7. Бенета Э. В. Формирование алгоритма управления отказами в телекоммуникационной сети связи, построенной по технологии Carrier Ethernet / Э. В. Бенета, А. К. Канаев // Сб. материалов XV юбил. Междунар. конференции «Региональная информатика–2016». Секция «Информационные технологии на транспорте» : труды конференции 26–28 ноября 2016 г. – СПб. : ПГУПС, 2016. – С. 95–101.

8. Бенета Э. В. Перспективная телекоммуникационная сеть следующего поколения на основе технологии Carrier Ethernet / Э. В. Бенета, А. К. Канаев // Бюл. результатов науч. исследований. – 2014. – Вып. 4 (13). – С. 69–76.

9. Бенета Э. В. Технология Carrier Ethernet для построения транспортных сетей / Э. В. Бенета, А. К. Канаев // Сб. науч. статей IV Междунар. науч.-технич. и науч.-метод. конференции «Актуальные проблемы инфокоммуникаций в науке и образовании». Секция «Сети связи специального назначения» : труды конференции 3–4 марта 2015 г. – СПб. : СПбГУТ, 2017. – С. 1065–1069.

10. Мезенцев К. Н. Моделирование систем в среде AnyLogic 6.4.1. Ч. 2 : учеб. пособие / К. Н. Мезенцев. – М. : МАДИ, 2011. – 103 с.

11. AnyLogic : учеб. пособие по агентному моделированию. – XJ Technologies Compony Ltd., 1992–2004. – URL : www.xjtek.com (дата обращения : 30.10.2017).

12. Боев В. Д. Исследование адекватности GPSS World и AnyLogic при моделировании дискретно-событийных процессов : монография / В. Д. Боев. – СПб. : ВАС, 2011. – 404 с.

13. Каталевский Д. Ю. Основы имитационного моделирования системного анализа в управлении : учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. / Д. Ю. Каталевский. – М. : РАНХИГИС, 2015. – 496 с.

14. Борщев А. В. Как строить простые, красивые и полезные модели сложных систем / А. В. Борщев // Материалы конференции «Имитационное моделирование. Теория и Практика». ИММОД–2013. – Казань : Фэн АН РТ, 2013. – Т. 1. – С. 21–34.

15. Закиров В. И. Исследование надежности беспроводных сетей связи методом имитационного моделирования в среде AnyLogic / В. И. Закиров, В. В. Золотухин // Материалы конференции «Имитационное моделирование. Теория и Практика». ИММОД–2011. – URL : https://www.anylogic.ru/resources/articles/issledovanie-nadezhnosti-besprovodnykh-setey-svyazi-metodom-imitatsionnogo-modelirovaniya-v-srede-an (дата обращения : 30.10.2017).

References

1. *MEF 33 Ethernet Access Services Definitions. Phase 2.* The Metro Ethernet Forum, 2012.

2. *MEF 6.1 Ethernet Services Definitions. Phase 2.* The Metro Ethernet Forum, 2008.

3. *Yaakov (Jonathan) Stein Ethernet vs. MPLS-TP in Access Networks.* URL: http://www.dspcsp.com/lectures/ethtp.pdf (accessed: 21.04.2016).

4. Beneta E. V. & Kanaev A. K. Vybor telekommunikatsionnoy tekhnologii operatorskogo klassa [The choice of carrier-grade telecommunication technology]. *Automation, Communication, Informatics*, 2016, issue 7, pp. 13–15. (In Russian)

5. *MEF 30.1 Service OAM Fault Management Implementation Agreement. Phase 2.* The Metro Ethernet Forum, 2013.

6. Beneta E. V. & Kanaev A. K. Analiz funktsiy v tekhnologii Carrie Ethernet [Analysis of OAM functions in Carrie Ethernet technology]. *The 71th All-Russian scientific and technical conference devoted to Radio day. Section "Telecommunications in railway transport": Conference proceedings*, April 20–28, 2016. Saint Petersburg, StPSEU "LETI" Publ., 2016, pp. 241–242. (In Russian)

7. Beneta E. V. & Kanaev A. K. Formirovanie algoritma upravleniya otkazami v telekommunikatsionnoy seti svyazi, postroennoy po tekhnologii Carrier Ethernet [Formation of algorithm of failure management in telecommunication network, built by Carrier Ethernet technology]. *Paper collection of the 15th anniversary International conference "Regional Informatics–2016". Section "Information technologies in transport": Proceedings of the conference,* November 26–28, 2016. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2016, pp. 95–101. (In Russian)

8. Beneta E. V. & Kanaev A. K. Perspektivnaya telekommunikatsionnaya se' sleduyushchego pokoleniya na osnove tekhnologii Carrier Ethernet [Perspective next-generation telecommunication network based on Carrier Ethernet technology]. *Bulletin of Research results,* 2014, issue 4 (13), pp. 69–76. (In Russian)

9. Beneta E. V. & Kanaev A. K. Tekhnologiya Carrier Ethernet dlya postroeniya transportnykh setey [Carrier Ethernet technology for building transportation networks]. *Collection of scientific articles of the IVth International scientific-technical and scientific-methodical conference "Current problems of infocommunication in science and education". Section "Special-purpose communication networks": Proceedings of the conference,* March 3–4, 2015. Saint Petersburg, SPbGUT Publ., 2017, pp. 1065–1069. (In Russian)

10. Mezentsev K. N. *Modelirovanie sistem v srede AnyLogic 6.4.1. Pt 2* [System *modelling in AnyLogic 6.4.1. Pt 2 environment*]. Moscow, MADI Publ., 2011, 103 p. (In Russian)

11. *AnyLogic. XJ Technologies Company Ltd.*, 1992–2004. URL: www.xjtek.com (accessed: 30.10.2017).

12. Boev V. D. *Issledovanie adekvatnosti GPSS World i AnyLogic pri modelirovanii diskretno-sobytiynykh protsessov* [*Investigation of GPSS World and AnyLogic adequacy in modeling discrete event processes*]. Saint Petersburg, BAC Publ., 2011, 404 p. (In Russian)

13. Katalevskiy D. Yu. *Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya sistemnogo analiza v upravlenii.* 2-e izd., pererab. i dop. [*Basics of modelling system analysis in management*]. 2nd ed., revised and add. Moscow, RANKhIGIS Publ., 2015, 496 p. (In Russian)

14. Borshchev A. V. Kak stroit prostye, krasivye i poleznye modeli slozhnykh sistem [How to build a simple, beautiful and useful models of complex systems]. *Proceedings of the conference "Simulation. Theory and practice ". IMMOD–2013.* Kazan, Fen AN RT Publ., 2013, vol. 1, pp. 21–34. (In Russian)

15. Zakirov V. I. & Zolotukhin V. V. Issledovanie nadezhnosti besprovodnykh setey svyazi metodom imitatsionnogo modelirovaniya v srede AnyLogic [Investigation of reliability of wireless communication networks by simulation method in AnyLogic environment]. *Proceedings of the conference "Simulation. Theory and practice". IMMOD–2011.* URL: https://www.anylogic.ru/resources/articles/issledovanie-nadezhnosti-besprovodnykh-setey-svyazi-metodom-imitatsionnogo-modelirovaniya-v-srede-an/(accessed: 30.10.2017) (In Russian)

КАНАЕВ Андрей Константинович – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, kanaevak@mail.ru; *ЛОГИН Элина Валерьевна – ассистент, elinabeneta@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 656.25, 338.512

А. Б. Никитин, И. В. Кушпиль

МЕТОД РАСЧЕТА СТОИМОСТИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Дата поступления: 17.11.2017
Решение о публикации: 05.12.2017

Аннотация

Цель: Разработать метод расчета стоимости жизненного цикла (ЖЦ), систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ), учитывающий основные статьи затрат каждой фазы ЖЦ. Полученный метод должен содержать математические выражения для оценок затрат, элементы прогнозирования будущих затрат, рекомендации по применению на практике. **Методы:** Использованы инженерный и параметрический методы оценки стоимостей. Первый метод прямо оценивает размеры определенных затрат, анализируя их последовательно, при этом удается применять действующие нормативы, установленные опытным путем. Второй метод основан на составлении соответствующих уравнений с применением различных параметров и переменных. Полученные уравнения позволяют преобразовывать трудозатраты на выполнение тех или иных работ в стоимость. **Результаты:** Разработан наиболее полный, пошаговый метод расчета стоимости ЖЦ систем ЖАТ. Приведены примеры некоторых расчетов. Учтено влияние фактора времени (инфляция и дисконтирование) на итоговые результаты расчетов. **Практическая значимость:** Предложенный метод, отступающий от распространенного идеализированного подхода, дает возможность анализировать и прогнозировать основные статьи затрат, возникающие на протяжении всего ЖЦ систем ЖАТ. Он может использоваться в качестве инструмента принятия экономических решений, при сравнении альтернативных вариантов оборудования и систем.

Ключевые слова: Жизненный цикл, сравнение альтернатив, стоимость, владение, расчет, метод, автоматика, телемеханика.

Aleksandr B. Nikitin, D. Eng. Sci., professor, head of department; *** Igor V. Kushpil**, postgraduate student, i_kushpil@mail.ru ((Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) METHOD OF CALCULATING LIFE CYCLE COST OF SYSTEMS OF RAILWAY AUTOMATICS AND TELEMECHANICS

Summary

Objective: Develop a method of calculating life cycle cost of (RAT) railway automatics and telemechanics systems which takes into account the basic expenses on each (LC) phase. The method obtained must contain mathematical expressions for cost estimates, elements of predicting future costs, recommendations for implementation into practice. **Methods:** Engineering and parametric methods for estimating costs are used. The first method directly assesses certain costs consistently analyzing them, at the same time it inables to apply existing regulations established empirically. The second method is based on compiling relevant equations using different parameters and variables. Equations obtained allow converting working hours performing those or other works into cost. **Results:** The most complete, step-by-step method for calculating (LC) of (RAT) systems is developed. Examples of some calculations are presented. Impact of time factor (inflation and discounting) on final calculation results is taken into consideration. **Practical importance:** The method suggested departing from common idealized approach gives possibility to

analyze and predict the basic expenses that occur throughout (LC) of (RAT) systems. It can be used as a tool of economic decision-making in comparing alternative variants of equipment and systems.

Keywords: Life cycle, comparison of alternatives, cost, ownership, calculation, method, automatics, telemechanics.

Введение

Руководство ОАО «РЖД» регулярно инвестирует в инфраструктуру и транспортные средства, выбирает поставщиков оборудования. Заинтересованные стороны требуют не только лучших технических, но и наиболее экономичных решений, имеющих последствия в течение длительного периода в будущем.

Обычно при выборе оборудования во внимание берется только начальная стоимость приобретения и не учитываются все последующие расходы на эксплуатацию и обслуживание, доля которых составляет порядка 60–70% всех расходов [1].

С помощью анализа стоимости жизненного цикла (ЖЦ) Life Cycle Cost (LCC) вычисляется стоимость системы или продукта на протяжении всего срока службы. Этот метод рекомендуется применять для инвестиционных проектов, оценки различных решений и сопоставления альтернативных вариантов.

LCC был разработан Министерством обороны США в 1960-х годах и использовался как инструмент принятия экономических решений для крупных инфраструктурных проектов, в дальнейшем распространенный на многие сферы деятельности [2].

Российским аналогом LCC служит технико-экономический расчет. В отличие от LCC он позволяет получить численные значения эффектов от внедрения оборудования путем соотнесения затрат, доходов и рисков, но не является инструментом принятия экономических решений [3].

Текущее состояние вопроса

Методология расчета LCC, разработанная Международной электротехнической комиссией, изложена в документе [4]. На его основе был создан отечественный нормативный документ [5], который носит рекомендательный характер по причинам отсутствия математической составляющей, а также примеров расчетов LCC для объектов железнодорожной инфраструктуры.

Документ [6] желательно применять при выборе и оценке поставщиков оборудования, на основе анализа LCC их продукции. Данный документ не дает комплексного понимания метода LCC по тем же причинам, что и документ [5].

В настоящее время наиболее проработанным отечественным документом является «Методика определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены…» [7]. В ней подробно описана калькуляция только эксплуатационных расходов, возникающих в локомотивном хозяйстве, хозяйстве пути и сооружений, вагонном хозяйстве. Проработка вопроса в аспекте хозяйства сигнализации и связи отсутствует. В [7] приводится общеизвестная формула расчета LCC для сложных технических систем:

$$\text{LCC} = \text{Ц}_{\text{пр}} + \sum_{t=1}^{T} (\text{И}_t + \Delta\text{К}_t - \text{Л}_t) \cdot \alpha_t, \quad (1)$$

где $\text{Ц}_{\text{пр}}$ – цена приобретения системы (первоначальная стоимость); И_t – годовые эксплуатационные расходы; $\Delta\text{К}_t$ – единовременные затраты на внедрение техники в эксплуатацию; Л_t – ликвидационная стоимость объекта; α_t – коэффициент дисконтирования; t – текущий год эксплуатации; T – конечный год эксплуатации.

К недостаткам формулы (1) относятся:

1. $\text{Ц}_{\text{пр}}$ рассмотрена в узком смысле и может применяться только потенциальным покупателем (пользователем) системы, но не разработчиком. В широком смысле $\text{Ц}_{\text{пр}}$ состоит из

суммы затрат, понесенных на первых четырех фазах ЖЦ (рис. 1, табл. 1). Расчет стоимости каждой фазы должен быть выполнен.

2. К ΔK_t относят затраты, связанные с проведением строительных, монтажных и пусконаладочных работ. В аспекте систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) рассмотрение ΔK_t как отдельного элемента затрат некорректно, так как система не может быть введена в эксплуатацию без проведения перечисленных работ ($\Rightarrow \Delta K_t \subset Ц_{пр}$).

3. Применение α_t к ΔK_t некорректно, так как ΔK_t не возникают в процессе эксплуатации системы, а значит, нет необходимости учитывать влияние фактора времени. Принимать во внимание α_t следует при расчете $И_t$ за каждый год эксплуатации (t), а также $Л_t$ за конечный год эксплуатации (T).

Таким образом, сложились условия, при которых существующая документация и формула (1) фактически неприемлемы для расчетов LCC на практике и нуждаются в доработке [8].

Последовательный подход

Жизненный цикл систем ЖАТ состоит из 6 фаз (рис. 1).

Фазы 1–4 ($f_{1–4}$) содержат статьи затрат, оценивающих стоимость приобретения системы ($C_{приоб}$). Часто за стоимость приобретения ошибочно принимают только стоимость оборудования и не учитывают другие статьи затрат [9, 10].

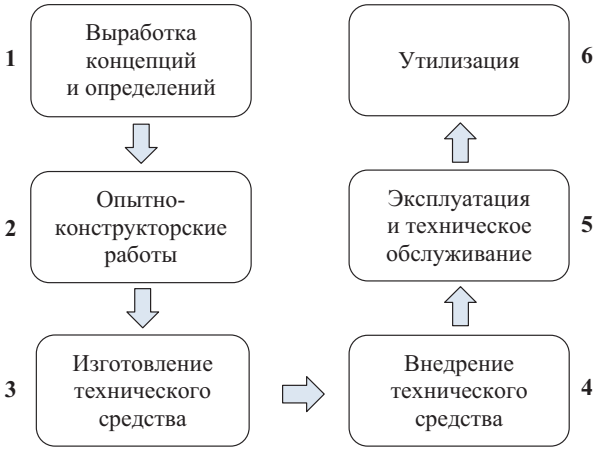


Рис. 1. Фазы ЖЦ систем ЖАТ

Фаза 5 (f_5) содержит статьи затрат, оценивающих стоимость владения системой ($C_{влад}$). Данная фаза является самой дорогостоящей (60–70 % всех затрат) и наиболее продолжительной. Затраты на владение не видны непосредственно, и их трудно предвидеть [11].

Фаза 6 (f_6) содержит статьи затрат, оценивающих стоимость утилизации системы ($C_{утил}$). Ими часто пренебрегают в связи с их незначительностью. Однако утилизированное оборудование может обладать некоторой остаточной стоимостью (наличие редкоземельных металлов, повторно используемое оборудование), что может принести прибыль после утилизации [12].

Следовательно, выражение для расчета $LCC_{ЖАТ}$ примет вид

$$LCC_{ЖАТ} = \overbrace{C_{f1} + C_{f2} + C_{f3} + C_{f4}}^{C_{приоб}} + \overbrace{C_{f5}}^{C_{влад}} - \overbrace{C_{f6}}^{C_{утил}}, \quad (2)$$

где $C_{f1}, C_{f2}, ..., C_{f6}$ – полные стоимости фаз ЖЦ.

Стоимость каждой фазы определяется по статьям затрат (табл. 1).

Дальнейшее развитие формулы (2) осуществляется путем раскрытия математического смысла $C_{f1}, C_{f2}, ..., C_{f6}$.

Фаза f_1 (Выработка концепций и определений)

Статьи затрат фазы f_1 сложно выразить в денежном эквиваленте, так как они относятся к интеллектуальным затратам предприятия-разработчика системы. Они включаются в стоимость оборудования на третьей фазе ЖЦ ($\Rightarrow C_{f1} \subset C_{f3}$).

Фаза f_2 (Опытно-конструкторские работы)

Основные статьи затрат – проектные работы, состоящие в разработке проектной и рабо-

ТАБЛИЦА 1. Основные статьи затрат фаз ЖЦ систем ЖАТ

Выработка концепций и определений, f_1	Опытно-конструкторские работы, f_2	Изготовление технического средства, f_3	Внедрение технического средства, f_4	Эксплуатация и техническое обслуживание, f_5	Утилизация, f_6
Структура системы	Проектная документация	Приобретение оборудования	Строительные работы	Заработная плата обслуживающего персонала	Демонтажные работы
Условия применения системы	Рабочая документация	Приобретение запасных частей	Монтажные работы	Стоимость устранения неисправностей	Возвратные суммы после демонтажа
Формирование системных требований		Приобретение тары, упаковки, реквизита	Пусконаладочные работы	Затраты на электроэнергию	
Технико-коммерческое предложение		Транспортные расходы		Амортизационные отчисления	
		Расходы на комплектацию			
		Заготовительно-складские расходы			

чей документации ($C_{\text{докум}}$), необходимой для фаз f_3 и f_4:

$$C_{f2} = C_{\text{докум}}. \qquad (3)$$

Стоимость разработки проектной и рабочей документации (см. (3)) для железных дорог регламентируется документами [13, 14] и рассчитывается по формуле

$$C_{\text{докум}} = \overbrace{(a + b \cdot x)}^{\text{Базовая стоимость}} \cdot K^i, \qquad (4)$$

где a, b – постоянные величины основного показателя проектируемого объекта (тыс. руб.); x – основной показатель проектируемого объекта (шт./ед.); «Базовая стоимость» – стоимость по состоянию на 01.01.2000 г.; K^i – коэффициент, отражающий инфляционные процессы в проектировании на момент расчета цены проектных работ.

Особенности проведения расчета описаны в гл. 2.3 «Устройства автоматики, телемеханики и связи. Автоматика и телемеханика» справочника [14]. В ней в табл. 24–37 приведены величины a, b и показатель x для проектирования различных устройств и систем ЖАТ.

Ценами справочника учтены:

– научно-исследовательские и опытно-экспериментальные работы;

– разработка проекта производства работ (ППР);

– внесение изменений в проектную и рабочую документацию;

– защита проектной документации в экспертных и утверждающих инстанциях.

Пример. Рассчитать стоимость проектных работ по оснащению станции системой

Микропроцессорной централизации (МПЦ) с числом стрелок 15.

Расчет. Таблица 2 копирует табл. 25 справочника [14].

На основе табл. 2 получено: $a = 459{,}38$ тыс. руб.; $b = 53{,}50$ тыс. руб.; $x = 15$ стрелок; $K^i = 3{,}99$ (по состоянию на II квартал 2017 г., см. [15]).

Подставляя значения в формулу (4), находим стоимость проектных работ по состоянию на II квартал 2017 г. (без учета НДС):

$$\Rightarrow (4) \Rightarrow C_{\text{докум}} = (459{,}38 + 53{,}50 \cdot 15) \cdot 3{,}99 = 5034{,}9 \text{ тыс. руб.}$$

Из них стоимость проектной документации составляет 40 % = 2013,96 тыс. руб.; стоимость рабочей документации составляет 60 % = 3020,94 тыс. руб.

Проектирование таких систем как контрольно-габаритное устройство (КГУ), устройство контроля схода подвижного состава (УКСПС), система счета осей (ССО), автоматическая переездная сигнализация (АПС) рассчитывается отдельно с помощью соответствующей таблицы справочника [14].

Фаза f_3 (Изготовление технического средства)

В общем случае изготовление технического средства сводится к определению сметной стоимости оборудования.

Сметная стоимость оборудования – это сумма всех затрат на его приобретение и доставку на приобъектный склад или место передачи в монтаж [16]. Сюда включены:

– стоимость приобретения оборудования и материалов ($C_{\text{оборуд}}$);

– стоимость запасных частей ($C_{\text{зап}}$);

– стоимость тары и упаковки ($C_{\text{упак}}$);

– транспортные расходы ($C_{\text{трансп}}$);

– расходы на комплектацию ($C_{\text{компл}}$);

– заготовительно-складские расходы ($C_{\text{склад}}$).

Стоимость третьей фазы ЖЦ (C_{f3}) определяется так:

$$C_{f3} = C_{\text{оборуд}} + C_{\text{зап}} + C_{\text{упак}} + C_{\text{трансп}} + C_{\text{компл}} + C_{\text{склад}}. \quad (5)$$

Стоимость оборудования ($C_{\text{оборуд}}$) в базовом уровне цен (01.01.2000 г.) находится по справочнику [17], согласно спецификации, сформированной на фазе f_2.

Текущая стоимость оборудования определяется базисно-индексным методом, путем применения индексов изменения сметной стоимости оборудования, утверждаемых ОАО «РЖД» на соответствующий период:

$$C_{\text{оборуд}} = \overbrace{\sum_{i=1}^{n} c_i}^{\text{Базовая стоимость}} \cdot I_{\text{оборуд}}^{\text{РЖД}}, \quad (6)$$

где $c_1, c_2, ..., c_n$ – стоимости отдельных позиций спецификации оборудования в базисном

ТАБЛИЦА 2. Электрическая централизация стрелок на станциях (табл. 25 [14])

№ п/п	Наименование объекта проектирования	Единица измерения основного показателя объекта	Постоянные величины базовой цены разработки проектной и рабочей документации, тыс. руб.		Распределение базовой цены проектной и рабочей документации, в % от цены	
			a	*b*	проектная	рабочая
1	2	3	4	5	6	7
МПЦ при количестве стрелок:						
1	До 10	1 стрелка	411,08	58,33	40	60
2	Свыше 10 до 20	–	459,38	53,50	40	60

уровне цен (на 01.01.2000 г.); $I^{\text{РЖД}}_{\text{оборуд}}$ – индекс приведения сметной стоимости оборудования к текущему моменту времени [18].

В случае отсутствия той или иной позиции в [17] стоимость обусловливается прайс-листом изготовителя на текущий момент времени, без учета $I^{\text{РЖД}}_{\text{оборуд}}$ к данным позициям.

Стоимость запасных частей ($C_{\text{зап}}$) может приниматься в размере до 2 % от стоимости оборудования (см. [16]):

$$C_{\text{зап}} \approx 0{,}02 \cdot C_{\text{оборуд}}; \qquad (7)$$

стоимость тары, упаковки и реквизита ($C_{\text{упак}}$) для электрооборудования в размере до 1,5 % от стоимости оборудования (см. [16]):

$$C_{\text{упак}} \approx 0{,}015 \cdot C_{\text{оборуд}}; \qquad (8)$$

транспортные расходы ($C_{\text{трансп}}$) в размере 5 % от стоимости оборудования (см. [16]):

$$C_{\text{трансп}} \approx 0{,}05 \cdot C_{\text{оборуд}}; \qquad (9)$$

расходы на комплектацию ($C_{\text{компл}}$) в размере 1 % от стоимости оборудования (см. [16]):

$$C_{\text{компл}} \approx 0{,}01 \cdot C_{\text{оборуд}}; \qquad (10)$$

заготовительно-складские расходы ($C_{\text{склад}}$) в размере 1,2 % от стоимости оборудования (см. [16]):

$$C_{\text{склад}} \approx 0{,}012 \cdot C_{\text{оборуд}}. \qquad (11)$$

Подставляя выражения (6)–(11) в формулы (5) и (6), получим

$$\Rightarrow (5) \Rightarrow C_{f3} \approx 1 \cdot C_{\text{оборуд}} + \\ + 0{,}02 \cdot C_{\text{оборуд}} + 0{,}015 \cdot C_{\text{оборуд}} + \\ + 0{,}05 \cdot C_{\text{оборуд}} + 0{,}01 \cdot C_{\text{оборуд}} + \\ + 0{,}012 \cdot C_{\text{оборуд}} \approx 1{,}107 \cdot C_{\text{оборуд}} \Rightarrow \\ \Rightarrow (6) \Rightarrow \left\{ C_{f3} \approx 1{,}107 \cdot \sum_{i=1}^{n} c_i \cdot I^{\text{РЖД}}_{\text{оборуд}} \right\}.$$

Фаза f_4 (Внедрение технического средства)

Внедрение системы – это ввод в эксплуатацию. Основные статьи затрат:

– стоимость строительных работ ($C_{\text{стр}}$);
– стоимость монтажных работ ($C_{\text{монт}}$);
– стоимость пусконаладочных работ ($C_{\text{пнр}}$).

Стоимость четвертой фазы ЖЦ (C_{f4}) определяется так:

$$C_{f4} = C_{\text{стр}} + C_{\text{монт}} + C_{\text{пнр}}. \qquad (12)$$

В общем случае $C_{\text{стр}}$, $C_{\text{монт}}$, $C_{\text{пнр}}$ находятся по сметным расчетам, которые составляются на основании [19]. Сметные расчеты могут быть представлены математическими выражениями

$$C_{\text{стр}} = \left(\begin{array}{l} \sum_{i=1}^{n} \text{ПЗ}^{i}_{\text{стр}} \cdot V^{i}_{\text{стр}} + \\ + \sum_{i=1}^{n} \text{НР}^{i}_{\text{стр}} + \sum_{i=1}^{n} \text{СП}^{i}_{\text{стр}} \end{array} \right) \cdot I^{\text{РЖД}}_{\text{стр}}, \\ C_{\text{монт}} = \left(\begin{array}{l} \sum_{j=1}^{m} \text{ПЗ}^{j}_{\text{монт}} \cdot V^{j}_{\text{монт}} + \\ + \sum_{j=1}^{m} \text{НР}^{j}_{\text{монт}} + \sum_{j=1}^{m} \text{СП}^{j}_{\text{монт}} \end{array} \right) \cdot I^{\text{РЖД}}_{\text{монт}}, \qquad (13) \\ C_{\text{пнр}} = \left(\begin{array}{l} \sum_{q=1}^{w} \text{ПЗ}^{q}_{\text{пнр}} \cdot V^{q}_{\text{пнр}} + \\ + \sum_{q=1}^{w} \text{НР}^{q}_{\text{пнр}} + \sum_{q=1}^{w} \text{СП}^{q}_{\text{пнр}} \end{array} \right) \cdot I^{\text{РЖД}}_{\text{пнр}},$$

в которых $\text{ПЗ}^{i}_{\text{стр}}, \text{ПЗ}^{j}_{\text{монт}}, \text{ПЗ}^{q}_{\text{пнр}}$ – прямые затраты (тыс. руб.) на i-й вид строительных работ [20], на j-й вид монтажных работ [21], на q-й вид пусконаладочных работ [22], определяются они в базовых ценах; n, m, w и $V^{i}_{\text{стр}}, V^{j}_{\text{монт}}, V^{q}_{\text{пнр}}$ – количество и объем таких видов работ соответственно (определяются проектом). Кроме того, с привязкой к конкретным полевым условиям производства работ на размер ПЗ оказывают влияние коэффициенты (см. [19]): $K_{\text{движ}}$ – коэффициент для производства работ в условиях движения поездов, $K_{\text{окна}}$ – коэффициент для производства работ в

«Окна» в ночное время суток, $K_{\text{услов}}$ – коэффициент влияния особых условий производства, $K_{\text{район}}$ – районный коэффициент к оплате труда; $\text{НР}^i_{\text{стр}}, \text{НР}^j_{\text{монт}}, \text{НР}^q_{\text{пнр}}$ – накладные расходы на i-й вид строительных работ, j-й вид монтажных работ, и q-й вид пусконаладочных работ:

$$\begin{aligned} \text{НР}^i_{\text{стр}} &= \text{ПЗ}^i_{\text{стр}} \cdot V^i_{\text{стр}} \cdot \text{Нн}^i_{\text{стр}}, \\ \text{НР}^j_{\text{монт}} &= \text{ПЗ}^j_{\text{монт}} \cdot V^j_{\text{монт}} \cdot \text{Нн}^j_{\text{монт}}, \\ \text{НР}^q_{\text{пнр}} &= \text{ПЗ}^q_{\text{пнр}} \cdot V^q_{\text{пнр}} \cdot \text{Нн}^q_{\text{пнр}}, \end{aligned} \quad (14)$$

где $\text{Нн}^i_{\text{стр}}, \text{Нн}^j_{\text{монт}}, \text{Нн}^q_{\text{пнр}}$ – норма накладных расходов (в %) на i-й вид строительных работ, j-й вид монтажных работ и q-й вид пусконаладочных работ (см. [23]); $\text{СП}^i_{\text{стр}}, \text{СП}^j_{\text{монт}}, \text{СП}^q_{\text{пнр}}$ – сметная прибыль на i-й вид строительных работ, j-й вид монтажных работ и q-й вид пусконаладочных работ:

$$\begin{aligned} \text{СП}^i_{\text{стр}} &= \text{ПЗ}^i_{\text{стр}} \cdot V^i_{\text{стр}} \cdot \text{Нсп}^i_{\text{стр}}, \\ \text{СП}^j_{\text{монт}} &= \text{ПЗ}^j_{\text{монт}} \cdot V^j_{\text{монт}} \cdot \text{Нсп}^j_{\text{монт}}, \\ \text{СП}^q_{\text{пнр}} &= \text{ПЗ}^q_{\text{пнр}} \cdot V^q_{\text{пнр}} \cdot \text{Нсп}^q_{\text{пнр}}, \end{aligned} \quad (15)$$

здесь $\text{Нсп}^i_{\text{стр}}, \text{Нсп}^j_{\text{монт}}, \text{Нсп}^q_{\text{пнр}}$ – норма сметной прибыли (в %) на i-й вид строительных работ, j-й вид монтажных работ и q-й вид пусконаладочных работ (см. [23]); $I^{\text{РЖД}}_{\text{стр}}, I^{\text{РЖД}}_{\text{монт}}, I^{\text{РЖД}}_{\text{пнр}}$ – индексы приведения сметной стоимости каждого вида работ соответственно к текущему моменту времени [18].

Фаза f_5 (Эксплуатация и техническое обслуживание)

Основными статьями затрат данной фазы являются:

– затраты на заработную плату обслуживающего персонала (ОП) ($C_{\text{зп}}$);

– затраты на устранение неисправностей (ремонт) ($C_{\text{рем}}$);

– затраты на электроэнергию ($C_{\text{эл}}$);

– амортизационные отчисления ($C_{\text{ам}}$).

Стоимость пятой фазы ЖЦ (C_{f5}) определяется как

$$C_{f5} = C_{\text{зп}} + C_{\text{рем}} + C_{\text{эл}} + C_{\text{ам}}. \quad (16)$$

Статьи затрат фазы f_5 систем ЖАТ характеризуются своей протяженностью во времени (10–30 лет), вследствие чего необходимо учитывать изменение во времени цен на потребляемые в процессе эксплуатации объектов ресурсы, обусловленное **инфляцией**. Однако затраты, полученные в разные моменты времени, не сопоставимы друг с другом и обязательно должны быть приведены к начальному моменту времени путем **дисконтирования**.

Таким образом, в расчеты должны быть введены:

– $I_{\text{инфл}}$ – индекс инфляции (табл. 3). Обычно выбирается среднегодовой прогнозный темп инфляции в размере 4–8 %. Для учета возможных рисков он может быть увеличен на 3–5 %;

– α_t – коэффициент дисконтирования (см. табл. 3). Ставка дисконтирования обычно выбирается в размере 6–10 %. Для учета возможных рисков она может быть увеличена на 3–5 %.

Годовые затраты на заработную плату ОП [7], занятого профилактическими работами, по графику технологического процесса составляют

$$C_{\text{зп}} = e \cdot n \cdot T_{\text{год}} \cdot K_{\text{рег}} \cdot K_{\text{соц}}, \quad (17)$$

где e – часовая тарифная ставка ОП (руб.); n – количество ОП (чел.); $T_{\text{год}}$ – годовой фонд рабочего времени (ч); $K_{\text{рег}}$ – коэффициент, учитывающий региональную надбавку; $K_{\text{соц}}$ – коэффициент, учитывающий выплаты в фонд социального страхования.

С учетом влияния фактора времени формула (17) примет вид

$$\overset{T}{\underset{t=1}{C_{\text{зп}}}} = \sum_{t=1}^{T} C_{\text{зп}} \cdot I^t_{\text{инфл}} \cdot \alpha_t, \quad (18)$$

здесь t – текущий год эксплуатации; T – конечный год эксплуатации; $C_{\text{зп}}$ – годовые за-

ТАБЛИЦА 3. Значения индекса инфляции и фактора дисконтирования

Инфляция, %									Ставка дисконтирования, %						
Год	1	2	3	4	5	6	7	8	Год	3	4	5	6	7	8
1	1,0100	1,0200	1,0300	1,0400	1,0500	1,0600	1,0700	1,0800	1	0,9709	0,9615	0,9524	0,9434	0,9346	0,9259
2	1,0201	1,0404	1,0609	1,0816	1,1025	1,1236	1,1449	1,1664	2	0,9426	0,9246	0,9070	0,8900	0,8734	0,8573
3	1,0303	1,0612	1,0927	1,1249	1,1576	1,1910	1,2250	1,2597	3	0,9151	0,8890	0,8638	0,8396	0,8163	0,7938
4	1,0406	1,0824	1,1255	1,1699	1,2155	1,2625	1,3108	1,3605	4	0,8885	0,8548	0,8227	0,7921	0,7629	0,7350
5	1,0510	1,1041	1,1593	1,2167	1,2763	1,3382	1,4026	1,4693	5	0,8626	0,8219	0,7835	0,7473	0,7130	0,6806
6	1,0615	1,1262	1,1941	1,2653	1,3401	1,4185	1,5007	1,5869	6	0,8375	0,7903	0,7462	0,7050	0,6663	0,6302
7	1,0721	1,1487	1,2299	1,3159	1,4071	1,5036	1,6058	1,7138	7	0,8131	0,7599	0,7107	0,6651	0,6227	0,5835
8	1,0829	1,1717	1,2668	1,3686	1,4775	1,5938	1,7182	1,8509	8	0,7894	0,7307	0,6768	0,6274	0,5820	0,5403
9	1,0937	1,1951	1,3048	1,4233	1,5513	1,6895	1,8385	1,9990	9	0,7664	0,7026	0,6446	0,5919	0,5439	0,5002
10	1,1046	1,2190	1,3439	1,4802	1,6289	1,7908	1,9672	2,1589	10	0,7441	0,6756	0,6139	0,5584	0,5083	0,4632
11	1,1157	1,2434	1,3842	1,5395	1,7103	1,8983	2,1049	2,3316	11	0,7224	0,6496	0,5847	0,5268	0,4751	0,4289
12	1,1268	1,2682	1,4258	1,6010	1,7959	2,0122	2,2522	2,5182	12	0,7014	0,6246	0,5568	0,4970	0,4440	0,3971
13	1,1381	1,2936	1,4685	1,6651	1,8856	2,1329	2,4098	2,7196	13	0,6810	0,6006	0,5303	0,4688	0,4150	0,3677
14	1,1495	1,3195	1,5126	1,7317	1,9799	2,2609	2,5785	2,9372	14	0,6611	0,5775	0,5051	0,4423	0,3878	0,3405
15	1,1610	1,3459	1,5580	1,8009	2,0789	2,3966	2,7590	3,1722	15	0,6419	0,5553	0,4810	0,4173	0,3624	0,3152

траты на заработную плату ОП (в начальный момент времени); $I^t_{\text{инфл}}$ – индекс инфляции текущего года эксплуатации (например, при темпе инфляции 4 % за 1 год $I^1_{\text{инфл}} = 1{,}04$); α_t – коэффициент дисконтирования текущего года эксплуатации (при ставке дисконтирования 8 % за 1 год $\alpha_1 = 0{,}9259$).

Годовые затраты, связанные с устранением неисправностей, состоящие в замене или восстановлении отдельных элементов техники [24], равны

$$C_{\text{рем}} = \sum_{i=1}^{n} n_i \cdot c^i_{\text{рем}}, \qquad (19)$$

где n_i – количество ремонтов i-го вида за год эксплуатации (ед.); $c^i_{\text{рем}}$ – стоимость i-го вида ремонта (руб.).

С учетом влияния фактора времени формулу (19) представим следующим образом:

$$C^T_{\text{рем}\,t=1} = \sum_{t=1}^{T} C_{\text{рем}} \cdot I^t_{\text{инфл}} \cdot \alpha_t, \qquad (20)$$

в которой t – текущий год эксплуатации; T – конечный год эксплуатации; $C_{\text{рем}}$ – годовые затраты на ремонт (в начальный момент времени); $I^t_{\text{инфл}}, \alpha_t$ – объяснение см. в формуле (18).

Годовые затраты электроэнергии, потребляемой устройствами ЖАТ [24], составляют

$$C_{\text{эл}} = \sum_{i=1}^{n} P_i \cdot T^{\text{с}}_i \cdot N_{\text{дн}} \cdot Ц, \qquad (21)$$

здесь P_i – мощность i-го устройства (кВт·ч); $T^{\text{с}}_i$ – среднесуточное количество часов работы i-го устройства (ч); $N_{\text{дн}}$ = 1 год = 365 дн. – длительность планируемого периода; $Ц$ – тариф за 1 кВт·ч электроэнергии (руб.).

С учетом влияния фактора времени формулу (21) представим в виде

$$C^T_{\text{эл}\,t=1} = \sum_{t=1}^{T} C_{\text{эл}} \cdot I^t_{\text{инфл}} \cdot \alpha_t, \qquad (22)$$

где t – текущий год эксплуатации; T – конечный год эксплуатации; $C_{\text{эл}}$ – годовые затраты на ремонт (в начальный момент времени); $I^t_{\text{инфл}}$, α_t – объяснение см. в формуле (18).

Основные фонды (оборудование, машины, сооружения) в процессе эксплуатации подвергаются как физическому, так и моральному износу, затем наступает момент, когда их необходимо заменить. Амортизационные отчисления – это отчисления на замену выбывших по износу основных фондов. Они определяются таким образом, чтобы, ежегодно откладывая конкретную сумму денег, к концу службы устройства накопить необходимые средства для его замены [24].

Норма амортизационных отчислений выражается в процентах и рассчитывается так:

$$q = \frac{\Phi - \Phi_{\text{л}}}{\Phi \cdot T_{\text{сл}}} \cdot 100\%, \qquad (23)$$

здесь Ф – банковская стоимость основных фондов (руб.); $\Phi_{\text{л}}$ – ликвидационная стоимость основных фондов (руб.); $T_{\text{сл}}$ – амортизационный период основных фондов (срок службы в годах).

Применительно к расчету $\text{LCC}_{\text{ЖАТ}}$ формула (23) видоизменяется:

$$\begin{bmatrix} \Phi = C_{\text{приоб}} = C_{f1} + C_{f2} + C_{f3} + C_{f4} \\ \Phi_{\text{л}} = C_{\text{утил}} = C_{f6} \end{bmatrix} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow (23) \Rightarrow q = \frac{C_{\text{приоб}} - C_{\text{утил}}}{C_{\text{приоб}} \cdot T_{\text{сл}}} \cdot 100\%. \qquad (24)$$

Годовая сумма амортизационных отчислений на полное восстановление системы составит

$$C_{\text{ам}} = \frac{C_{\text{приоб}} \cdot q}{100}. \qquad (25)$$

С учетом влияния фактора времени формула (25) примет вид

$$C^T_{\text{ам}\,t=1} = \sum_{t=1}^{T} C_{\text{ам}} \cdot I^t_{\text{инфл}} \cdot \alpha_t, \qquad (26)$$

где t – текущий год эксплуатации; T – конечный год эксплуатации; $C_{\text{ам}}$ – годовые затраты

на ремонт (в начальный момент времени); $I^t_{\text{инфл}}$, α_t – объяснение см. в формуле (18).

Фаза f_6 (Утилизация)

Статья затрат – стоимость работ по демонтажу оборудования ($C_{\text{дем}}$), статья доходов – возвратные суммы после демонтажа оборудования ($C_{\text{возвр}}$).

Стоимость шестой фазы ЖЦ (C_{f6}) зависит от стоимости утилизации ($C_{\text{утил}}$):

$$C_{f6} = C_{\text{утил}} = C_{\text{возвр}} - C_{\text{дем}}, \qquad (27)$$

при условии $C_{\text{возвр}} \gg C_{\text{дем}}$.

В общем случае $C_{\text{дем}}$ находится по сметным расчетам. Однако, ввиду их громоздкости и незначительной величины затрат, $C_{\text{дем}}$ допускается рассчитывать через стоимость монтажных работ ($C_{\text{монт}}$), используя рекомендацию [25]:

$$C_{\text{дем}} \approx C_{\text{монт}} \cdot 0{,}4 \cdot I^T_{\text{инфл}} \cdot \alpha_T, \qquad (28)$$

в которой $C_{\text{монт}}$ – сметная стоимость монтажных работ (в начальный момент времени); 0,4 – коэффициент к расценкам на демонтаж (для оборудования, предназначенного для дальнейшего использования без консервации и упаковки); $I^T_{\text{инфл}}$ – индекс инфляции конечного года эксплуатации; α_T – коэффициент дисконтирования конечного года эксплуатации.

Возвратные суммы вычисляются на основе стоимости оборудования и коэффициента годности (износа) оборудования, пригодного для последующего использования:

$$C_{\text{возвр}} = C_{\text{оборуд}} \cdot I^T_{\text{инфл}} \cdot \alpha_T \cdot K_{\text{Г}}, \qquad (29)$$

где $C_{\text{оборуд}}$ – стоимость оборудования в начальный момент времени; $I^T_{\text{инфл}}$ – индекс инфляции конечного года эксплуатации; α_T – коэффициент дисконтирования конечного года эксплуатации; $K_{\text{Г}}$ – коэффициент годности оборудования (для устройств ЖАТ, срок службы которых превышает 10 лет, $K_{\text{Г}} = 0{,}25$ [19]).

Заключение

Разработан наиболее полный на текущий момент времени пошаговый метод расчета стоимости ЖЦ систем ЖАТ с примерами и рекомендациями (см. формулы (1)–(29)). Учтено влияние фактора времени (инфляция и дисконтирование) на итоговые результаты расчетов, что позволяет оценивать затраты ЖЦ в динамике.

Расчет LCC, с одной стороны, дает возможность для производителей оборудования учитывать эксплуатационные расходы уже при разработке системных решений, а с другой – выявлять сильные и слабые стороны своей продукции и предпринимать соответствующие меры по укреплению конкурентоспособности.

Непосредственно для пользователя LCC может быть достаточным основанием для принятия экономических решений. В целом калькуляция LCC и создание моделей затрат являются полезным инструментом экономического оценивания, который можно использовать как для сравнения предлагаемых альтернативных вариантов оборудования, так и для решения текущих и будущих инвестиционных задач в хозяйстве Сигнализации Централизации и Блокировки.

Библиографический список

1. Jaehoon K. A study on the Life Cycle Cost calculation of the maglev vehicle based on the maintenance information / K. Jaehoon, P. Jun-Seo, J. Do-Sik // Korea Railroad Research Institute. – October 2011. – P. 26–31.

2. Sami K. Life Cycle Cost / K. Sami // CIRP Encyclopedia of Production Engineering / ed. by G. Reinhart. – Sydney : Springer, 2014. – P. 751–753.

3. Назаров О. Н. Стоимость жизненного цикла – инструмент управления рисками при создании и эксплуатации тягового подвижного состава / О. Н. Назаров, А. В. Заручейский // Бюл. Объед. учен. совета ОАО «РЖД». – 2016. – № 6. – С. 1–9.

4. IEC 60300-3-3. Dependability management. – Pt 3-3: Application guide – Life cycle costing. – Geneva : NEQ, 2004.

5. ГОСТ Р 27.202–2012. Надежность в технике. Управление надежностью. Стоимость жизненного цикла. – М. : Изд-во стандартов, 2012.

6. СТО РЖД 1.05.509.15–2008. Руководство по оценке стоимости жизненного цикла продукции (LCC). – М., 2008.

7. Методика определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта (основные положения). – Утв. распоряжением ОАО «РЖД» № 2459р. – М., 2007.

8. Кушпиль И. В. Проблемы расчета стоимости жизненного цикла систем железнодорожной автоматики и телемеханики / И. В. Кушпиль // Материалы Междунар. науч.-практич. конференции «Транспорт России: Проблемы и Перспективы–2017». – СПб., 2017. – С. 417–421.

9. Hoffart C. Life Cycle Costing in high complex industries-developing and applying a Life Cycle Costing approach in the railway industry / C. Hoffart // Engineering Asset Management and Infrastructure Sustainability / ed. by J. Mathew. – London : Springer, 2010. – P. 375–389.

10. Beck K. LCC – Ausgangspunkt fur Kostensenkungen in der Eisenbahnsignaltechnik / K. Beck, T. Rapp, B. Jäger // SIGNAL+DRAHT. – 2008. – N 5. – P. 20–24.

11. Fuß W. Reduction der LCC durch höhere modülarität der aussenanlagenansteuerung im stellwerk / W. Fuß // SIGNAL+DRAHT. – 2012. – N 3. – P. 20–23.

12. Sevestre C. Reduction in cost of signalling / C. Sevestre // IRSE-ITC on behalf of the International Technical Committee of the IRSE. – 2012. – N 1. – P. 2–15.

13. Методические указания по применению справочников базовых цен на проектные работы в строительстве № 620. – М., 2009.

14. Справочник базовых цен на проектные работы в строительстве. Железные дороги № 590. – М., 2014.

15. Индексы изменения сметной стоимости строительно-монтажных работ, индексы изменения сметной стоимости проектных и изыскательских работ для строительства. – М. (обновляется ежеквартально).

16. МДС 81-35.2004. Определение стоимости оборудования, мебели, инвентаря. – М., 2004.

17. Отраслевые отпускные цены на оборудование ОСОЦЖо-2001. – М., 2001.

18. Сборник текущих индексов изменения сметной стоимости ОАО «РЖД». – М. (обновляется ежеквартально).

19. Порядок определения стоимости строительства объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта и других объектов ОАО «РЖД» с применением отраслевой сметно-нормативной базы ОСНБЖ-2001 (ОПДС-2821.2011). – М., 2011.

20. ОЕРЖ-2001. Отраслевые единичные расценки на строительные и специальные строительные работы. – М., 2001.

21. ОЕРЖм-2001. Отраслевые единичные расценки на монтаж оборудования. – М., 2001.

22. ОЕРЖп-2001. Отраслевые единичные расценки на пусконаладочные работы. – М., 2001.

23. Укрупненные нормативы накладных расходов и сметной прибыли по строительным, монтажным, ремонтно-строительным и пусконаладочным работам (Приложение 3 к МДС 81-33.2004). – М., 2004.

24. Карпович И. В. Экономика, организация и планирование хозяйства сигнализации и связи : учебник для техникумов и колледжей ж.-д. транспорта / И. В. Карпович, С. Г. Климович, Л. И. Хляпова. – М. : Маршрут, 2002. – 436 с.

25. СНиП 4.06–91. Общие положения по применению расценок на монтаж оборудования. – М., 1991.

References

1. Jaehoon K., Jun-Seo P. & Do-Sik J. *A study on the Life Cycle Cost calculation of the maglev vehicle based on the maintenance information*. Korea, Korea Railroad Research Institute Publ., 2011, pp. 26–31.

2. Sami K. *Life Cycle Cost. CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Ed. by G. Reinhart. Sydney, Springer, 2014, pp. 751–753.

3. Nazarov O. N. & Zarucheysky A. V. Stoimost zhiznennogo tsikla – instrument upravleniya riskami pri sozdanii i ekspluatatsii tyagovogo podvizhnogo sostava [Life cycle cost-risk management tool in establishing and operating drag-out rolling stock]. *Bulletin of the united scientific council of JSC "RRW"*, 2016, no. 6, pp. 1–9. (In Russian)

4. *IEC 60300-3-3. Dependability management*, pt 3-3. *Application guide – Life cycle costing.* Geneva, NEQ, 2004.

5. *GOST R 27.202-2012. Nadezhnost v tekhnike. Upravlenie nadezhnostyu. Stoimost zhiznennogo tsikla* [*State Standard Specification GOST R 27.202-2012. Reliability in engineering. Reliability management. Life cycle cost*]. Moscow, Standard publishing house, 2012. (In Russian)

6. *STO "RRW". 1.05.509.15-2008. Rukovodstvo po otsenke stoimosti zhiznennogo tsikla produktsii (LCC)* [*Guide for assessing product life cycle cost (LCC)*]. Moscow, 2008. (In Russian)

7. *Metodika opredeleniya stoimosti zhiznennogo tsikla i limitnoy tseny podvizhnogo sostava i slozhnykh tekhnicheskikh sistem zheleznodorozhnogo transporta (osnovnye polozheniya)* [*Procedure of determining life cycle cost and limit price of rolling stock and complex technical systems of railway transport (basic regulations)*]. Approved by Regulation of JSC "RRW", no. 2459r. Moscow, 2007. (In Russian)

8. Kushpil I.V. Problemy rascheta stoimosti zhiznennogo tsikla sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Problems of calculating life cycle cost of railway automatics and telemechanics systems]. *Materials of the International scientific-practical conference Transport of Russia: problems and perspectives–2017*. Saint Petersburg, 2017, pp. 417–421. (In Russian)

9. Hoffart C. Life Cycle Costing in high complex industries-developing and applying a Life Cycle Costing approach in the railway industry. *Engineering Asset Management and Infrastructure Sustainability*. Ed. by J. Mathew. London, Springer, 2010, pp. 375–389.

10. Beck K., Rapp T. & Jäger B. LCC – Ausgangspunkt fur Kostensenkungen in der Eisenbahnsignaltechnik. *SIGNAL+DRAHT*, 2008, no. 5, pp. 20–24.

11. Fuß W. Reduction der LCC durch höhere modülarität der aussenanlagenansteuerung im stellwerk. *SIGNAL+DRAHT*, 2012, no. 3, pp. 20-23.

12. Sevestre C. Reduction in cost of signalling. *IRSE-ITC on behalf of the International Technical Committee of the IRSE*, 2012, no. 1, pp. 2–15.

13. *Metodicheskie ukazaniya po primeneiyu spravochnikov bazovykh tsen na proektnye raboty v stroitelstve no. 620* [Methodical instructions in applying basic price guides for project work in construction N 620]. Moscow, 2009. (In Russian)

14. *Spravochnik bazovykh tsen na proektnye raboty v stroitelstve. Zheleznye dorogi no. 590* [*Basic price guide for project work in construction. Railways*]. Moscow, 2014, N 590. (In Russian)

15. *Indeksy izmeneniya smetnoy stoimosti stroitelno-montazhnykh rabot, indeksy izmeneniya smetnoy stoimosti proektnykh i izyskatel'skikh rabot dlya stroitelstva* [*Indices of estimated cost change for building and assembly jobs, indices of estimated cost change for project and exploration work in construction*]. Moscow (updated quarterly). (In Russian)

16. *MDS 81-35.2004. Opredelenie stoimosti oborudovaniya, mebeli, inventarya* [*Determination of equipment, furniture, inventory cost*]. Moscow, 2004. (In Russian)

17. *Otraslevye otpusknye tseny na oborudovanie OSOZhO-2001* [*Industry selling prices for equipment*]. Moscow, 2001. (In Russian)

18. *Sbornik tekushchikh indeksov izmeneniya smetnoy stoimosti OAO "RZhD"* [*Collection of current indices of estimated cost change of JSC "RZhD"*]. Moscow (updated quarterly). (In Russian)

19. *Poryadok opredeleniya stoimosti stroitelstva obektov infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta i drugikh obektov OAO "RZhD" s primeneniem otraslevoy smetno-normativnoy bazy OSHBZh -2001 (OPDS-2821.2011)* [*Calculation of infrastructure construction cost of railway transport and other facilities of JSC "RZhD" using an industry estimate-regulatory framework OSHBZh-2001 (OPDS-2821.2011)*]. Moscow, 2011. (In Russian)

20. *OERZh-2001. Otraslevye edinichnye rastsenki na stroitelnye i spetsialnye stroitelnye raboty* [*Industry individual rates for construction and special construction work*]. Moscow, 2001. (In Russian)

21. *OERZhm-2001. Otraslevye edinichnye rastsenki na montazh oborudovaniya* [*Industry individual rates for equipment installation*]. Moscow, 2001. (In Russian)

22. *OERZhp-2001. Otraslevye edinichnye rastsenki na puskonaladochnye raboty* [*Industry individual rates for commissioning*]. Moscow, 2001. (In Russian)

23. *Ukrupnennye normativy nakladnykh raskhodov i smetnoy pribyli po stroitelnym, montazhnym, remontno-stroite'nym i puskonaladochnym rabotam (Prilozhenie 3 k MDS 81-33.2004* [*Consolidated regulations of burden costs and estimated profit for construction, equipment installation, repair building and commissioning (Application 3 k MDS 81-33.2004)].* Moscow, 2004. (In Russian)

24. Karpovich I.V., Klimovich S.G. & Khlyapova L.I. *Ekonomika, organizatsiya i planirovanie khozyaystva signalizatsii i svyazi* [*Economics, organization and planning of signalling and communication*]. Moscow, Route Publ., 2002, 436 p. (In Russian)

25. *SNeP 4.06-91. Obshchie polozheniya po primeneniyu rastsenok na montazh oborudovaniya* [*General provisions for application of installation equipment cost*]. Moscow, 1991. (In Russian)

НИКИТИН Александр Борисович – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, *КУШПИЛЬ Игорь Васильевич – аспирант, i_kushpil@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.4

А. М. Худоногов, П. Ю. Иванов, Н. И. Мануилов, Е. Ю. Дульский

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ТОРМОЗНОЙ СЕТИ ПОЕЗДА

Дата поступления: 17.08.2017
Решение о публикации: 21.11.2017

Аннотация

Цель: Увеличение участковой скорости движения поездов и повышение безопасности движения. **Методы:** Для разработки «Интеллектуальной системы диагностики тормозной сети поезда» (далее – «ИСДТСП») использованы теоретические методы, например анализ, синтез, прогнозирование, и эмпирические методы, такие как сравнение, аналогия, моделирование, наблюдение. Проведены эксперименты в части апробации прототипа устройства. **Результаты:** При рассмотрении вопроса надежности тормозного оборудования и анализе работ предшественников выявлена проблема отсутствия действующего устройства диагностики тормозной сети поезда, которое обеспечит исключение отказов, связанных с нарушением целостности и плотности тормозной сети поезда. Создана «ИСДТСП». Данное техническое решение направлено на повышение безопасности движения поездов и увеличение участковой скорости. **Практическая значимость:** Применение «ИСДТСП» на тяговом подвижном составе железных дорог приводит к большей безопасности движения за счет непрерывного контроля тормозной магистрали по параметру плотности тормозной сети. Увеличивается участковая скорость движения поездов путем автоматизации замера плотности тормозной сети поезда.

Ключевые слова: Интеллектуальная система диагностики тормозной сети поезда, автотормоза, безопасность движения, участковая скорость, плотность тормозной сети поезда.

Anatolii M. Khudonogov, D. Eng. Sci., professor, a.hudonogov@yandex.ru; **Pavel Yu. Ivanov**, Cand. Eng. Sci., assistant professor;* **Nikita I. Manuilov**, postgraduate student, nikita-manuilov@mail.ru; **Evgeny Yu. Dulskii**, Cand. Eng. Sci., associate professor, E.Dulskiy@mail.ru (Irkutsk State University)
INTELLECTUAL SYSTEM OF TRAIN BRAKING NETWORK DIAGNOSTICS

Summary

Objective: Enlarging service speed of trains and increasing safety of operation. **Methods:** For the development of intellectual system of train braking network diagnostics (hereinafter referred to as “ISTBND”) theoretical methods, for example, analysis, synthesis, forecasting and empirical methods, such as comparison, analogy, modelling, observation are used. Experiments as part of device prototype testing are performed. **Results:** In considering reliability of braking equipment and analysis of predecessors works the lack of existing device of train braking network diagnostics, which will provide failure elimination connected with breakdown of integrity and density of train braking network is revealed. “ISTBND” is created. This technical solution is aimed at improving train safety of operation and increasing service speed. **Practical importance:** Usage of “ISTBND” on drag-out rolling stock of railways results in greater safety of operation at the expense of continuous checking of brake line along the parameter of braking network density. Train service speed is increased by automating measurement of train braking network density.

Keywords: Intellectual system of train braking network diagnostics, automatic brakes, safety of operation, service speed, density of train brake network.

Эффективная работа тормозной пневматической системы поезда определяется достаточным производством и правильным распределением сжатого воздуха между тормозными приборами. Данные параметры во многом зависят от технического состояния воздухопроводов, камер и емкостей в тормозной системе, и его необходимо периодически контролировать.

Плотность тормозной сети поезда – основной регламентированный параметр диагностики тормозной сети. В настоящее время замер плотности тормозной сети поезда производится машинистом по манометру и часам. Погрешность такого замера достигает 40 %, потеря времени 9 мин за поездку. Актуальность автоматизации замера заключается в том, что у грузовых составов плотность превышает 0,5/500 с, что затрудняет замер секундомером. Необходимо совершенствование процедуры замера плотности тормозной сети поезда. Причиной больших значений плотности может быть перекрытие концевых кранов уже после продувки тормозной магистрали, также это могут быть ледяные пробки [1–6].

Согласно законам газодинамики, объемный расход воздуха Q, приведенный к нормальным атмосферным условиям, пропорционален при условии постоянства температуры, объему резервуара V и темпу изменения давления в нем $\Delta P/\Delta t$:

$$Q = \frac{V}{P_a} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta P}, \qquad (1)$$

где P_a – атмосферное давление, которое равно 1 кгс/см²; ΔP – величина изменения давления сжатого воздуха в резервуаре за интервал времени Δt [7, 8].

Следовательно, замерив темп изменения давления и зная объем резервуара, можно контролировать расход воздуха в нем.

Очевидно, создание автоматической системы диагностики является очень актуальным. Однако существует проблема автоматизации замера плотности, которая заключается в многофакторности потребления сжатого воздуха из главного резервуара локомотива, вызванных периферийными пневматическими устройствами (свисток, тифон, песок, главный выключатель, выключатель быстродействующий, токоприемник) (рис. 1, *а*, *б*) [9–11].

В статье изложены аспекты разработки «Интеллектуальной системы диагностики

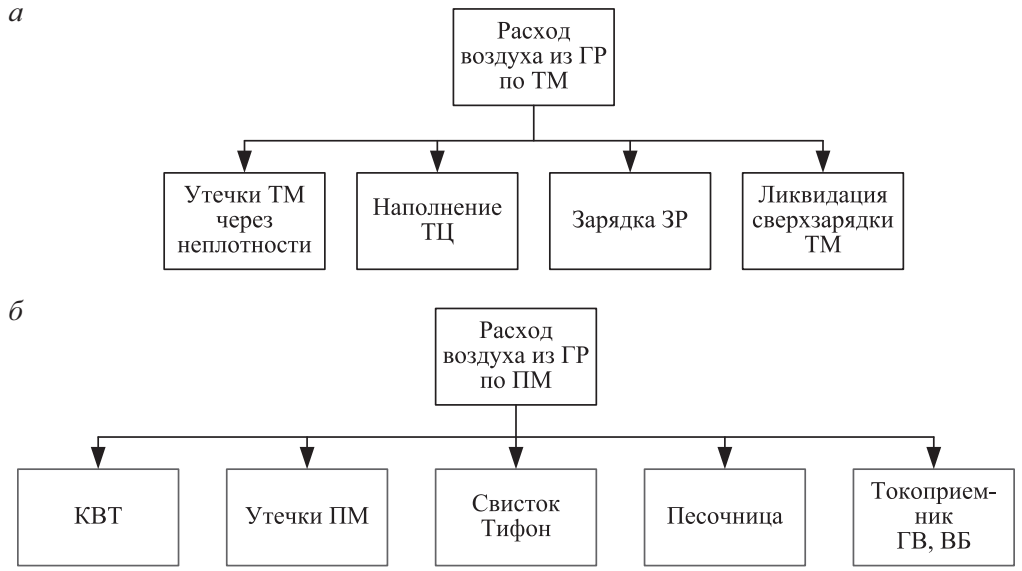


Рис. 1. Утечки, возникающие в главном резервуаре через тормозную (*а*) и питательную магистраль (*б*): ГР – главный резервуар; ГМ – питательная магистраль; ТМ – тормозная магистраль; ЗР – запасный резервуар; ГВ – главный выключатель; ВБ – выключатель быстродействующий; КВТ – кран вспомогательного тормоза; ТЦ – тормозной цилиндр

тормозной сети поезда» («ИСДТСП»), работа которой основана на принципиально новом алгоритме. Она состоит из микроконтроллерного блока, блока датчиков давления, блока интерфейса. В тормозной магистрали и тормозных цилиндрах уже имеется штатный датчик, который устанавливается при монтаже на питательную магистраль (рис. 2). «ИСДТСП» автоматически измеряет плотность и по ее изменению диагностирует обрывы тормозной магистрали, перекрытия концевых кранов, ледяные пробки, утечки из тормозной магистрали, выявляет причину самопроизвольного срабатывания автотормозов.

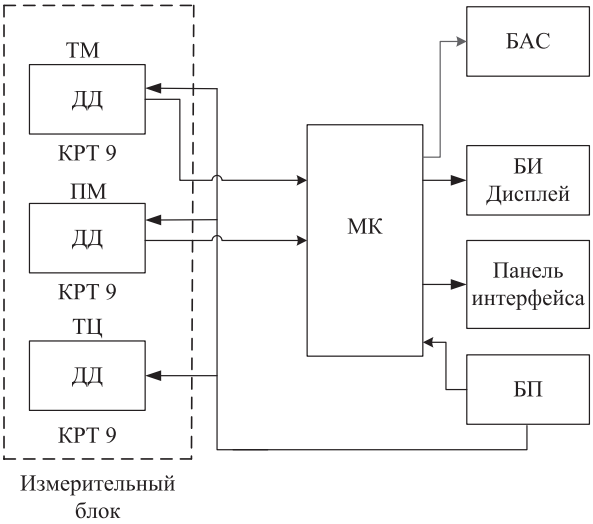


Рис. 2. Блок-схема «ИСДТСП»: КРТ 9 – измеритель давления; БП – блок питания; МК – микроконтроллер; БАС – блок аварийной сигнализации; БИ – блок индикации; ПМ – питательная магистраль; ДД – датчик давления; остальные обозначения см. на рис. 1

Алгоритм и программа, на которых работает микроконтроллер, обрабатывает кривую давления, непрерывно определяет плотность тормозной сети и вычисляет утечки от периферийных устройств (рис. 3).

Получение быстрого замера основывается на разработанном алгоритме, который использует математический аппарат получения приведенного значения плотности из входного массива данных давления.

Прототип «ИСДТСП» (рис. 4) является компактным и легко монтируемым, состоит из трех блоков: блок интерфейса, блок коммутации и датчики давления.

За счет ежесекундного замера плотности тормозной магистрали «ИСДТСП» сокращаются время обработки поезда на станции отправления и время на замер плотности в

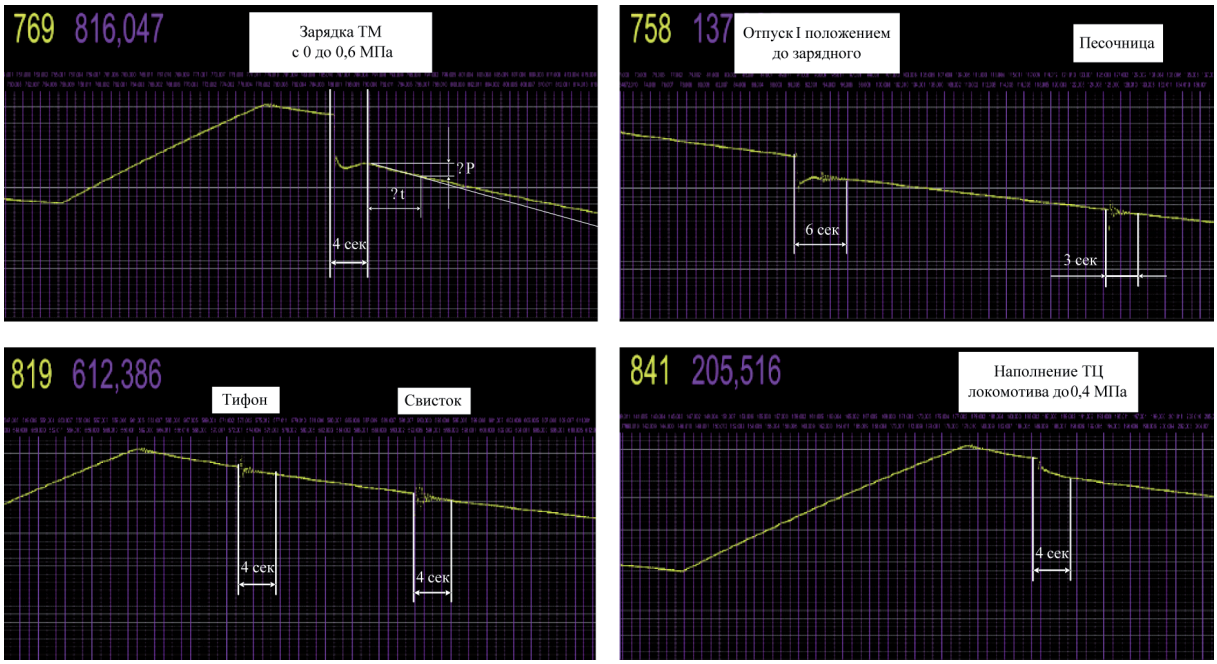


Рис. 3. Учет расхода воздуха от периферийных потребителей

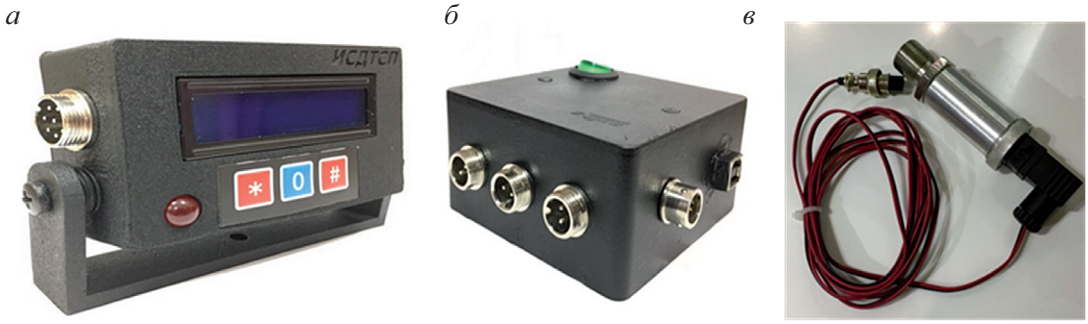


Рис. 4. Прототип «ИСДТСП»:
а – блок индикации; *б* – блок коммутации; *в* – датчики давления

пути следования (экономия до 10 мин за поездку). Также повышается безопасность движения поездов из-за непрерывной диагностики тормозной сети и выявления таких неисправностей как перекрытие концевых кранов, наличие ледяных пробок, возникновение утечек разного характера [12, 13].

С помощью внедрения и использования предложенного устройства производится увеличение участковой скорости на 0,87 км/ч за счет снижения времени замера плотности тормозной сети с 9 мин до 15 с за поездку. Повышается точность замера плотности тормозной сети поезда до 3 %, благодаря применению микропроцессорной техники.

Библиографический список

1. Иванов П. Ю. Устройство контроля плотности тормозной магистрали поезда / П. Ю. Иванов, Н. И. Мануилов, Е. Ю. Дульский // Наука и молодежь : сб. трудов Первой Всерос. науч.-практич. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Иркутск : ИрГУПС, 2015. – С. 58–62.

2. Иванов П. Ю. Интеллектуальная система тормозной сети поезда / П. Ю. Иванов, Н. И. Мануилов, Е. Ю. Дульский // Наука и молодежь. – 2016. – № 1. – С. 150–156.

3. Иванов П. Ю. Исследование причин самопроизвольного срабатывания автотормозов грузовых поездов / П. Ю. Иванов, Н. И. Мануилов, Е. Ю. Дульский // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2017. – № 1. – С. 399–404.

4. Иванов П. Ю. Анализ влияния человеческого фактора на безотказную работу тормозного оборудования поездов / П. Ю. Иванов, Н. И. Мануилов, Е. Ю. Дульский // Наука вчера, сегодня, завтра. – 2016. – № 12-2 (34). – С. 48–57.

5. Распоряжение ОАО «РЖД» от 12.12.2017 г. № 2580р «О вводе в действие Регламента взаимодействия работников, связанных с движением поездов, с работниками локомотивных бригад при возникновении аварийных и нестандартных ситуаций на путях общего пользования инфраструктуры ОАО “РЖД”». – URL : http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=709942&rnd=299965.1273311152&dst=100007&fld=134#0 (дата обращения : 27.01.2018).

6. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава: протокол заседания Совета по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества от 6–7 мая 2014 г. № 60. – URL : http://base.garant.ru/57410845 (дата обращения : 11.10.2017).

7. Вулис Л. А. Термодинамика газовых потоков / Л. А. Вулис. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1950. – 304 с.

8. Карминский В. Д. Техническая термодинамика и теплопередача / В. Д. Карминский – М. : Маршрут, 2005. – 224 с.

9. Кюрджиев Ю. В. Моделирование рабочих процессов, разработка и модернизация пневматических систем и агрегатов с учетом образования конденсата рабочего тела : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.04.06 / Ю. В. Кюрджиев. – М. : МИИЖТ, 2004. – 163 с.

10. Асадченко В. Р. Автоматические тормоза подвижного состава / В. Р. Асадченко. – М. : Маршрут, 2006. – 392 с.

11. Иноземцев В. Г. Автоматические тормоза / В. Г. Иноземцев, В. М. Казаринов, В. Ф. Ясенцев. – М. : Транспорт, 1981. – 464 с.

12. Иванов П. Ю. Влияние климатических условий на плотность тормозной сети поезда в эксплуатации / П. Ю. Иванов, Н. И. Мануилов, Е. Ю. Дульский // Актуальные вопросы и перспективы развития современной науки : материалы II Междунар. науч.-практич. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Санкт-Петербург). – 2017. – № 12-2 (34). – С. 48–57.

13. Иванов П. Ю. Моделирование работы резиновых уплотнений тормозной сети подвижного состава в условиях низких температур / П. Ю. Иванов, Н. И. Мануилов, Е. Ю. Дульский // Современные технологии, системный анализ, моделирование. – 2017. – № 3 (55). – С. 112–119.

References

1. Ivanov P. Yu., Manuilov N. I. & Dulskiy E. Yu. Ustroystvo kontrolya plotnosti tormoznoy magistrali poezda [Checking device of train braking line density]. *Science and youth. Collection of papers of the first All-Russian scientific-practical conference of students, postgraduates and young scientists*. Irkutsk, IrSTU Publ., 2015, pp. 58–62. (In Russian)

2. Ivanov P. Yu., Manuilov N. I. & Dulskiy E. Yu. Intellektualnaya sistema tormoznoj seti poezda [Intellectual system of train braking network]. *Science and youth,* 2016, no. 1, pp. 150 –156. (In Russian)

3. Ivanov P. Yu., Manuilov N. I. & Dulskiy E. Yu. Issledovanie prichin samoproizvolnogo srabatyvaniya avtotormozov gruzovykh poezdov [Investigation of reasons of spontaneous misoperation of freight train automatic brakes]. *Transport infrastructure of the Siberian region*, 2017, no. 1, pp. 399–404. (In Russian)

4. Ivanov P. Yu., Manuilov N. I. & Dulskiy E. Yu. Analiz vliyaniya chelovecheskogo faktora na bezotkaznuyu rabotu tormoznogo oborudovaniya poezdov [Analysis of human factor influence on non-failure operation of train braking equipment]. *Science of yesterday, today, tomorrow,* 2016, no. 12-2 (34), pp. 48–57. (In Russian)

5. *Rasporyazhenie OAO "RZhD" ot 12.12.2017 no. 2580r "O vvode v deystvie Reglamenta vzaimodeystviya rabotnikov, svyazannykh s dvizheniem poezdov, s rabotnikami lokomotivnykh brigad pri vozniknovenii avariinykh i nestandartnykh situatsiy na putyakh obshchego polzovaniya infrastruktury OAO "RZhD"* [*Regulation of OJSC "RZhD" of 12.12.2017 N 2580r "On implementing the Regulation of interaction between employees connected with train operation and locomotive crew workers in emergency and non-standard situations on general usage infrastructure of OJSC "RZhD"*]. URL: http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=709942&rnd=299965.1273311152&dst=100007&fld=134#0 (accessed: 27.01. 2018) (In Russian)

6. *Pravila tekhnicheskogo obsluzhivaniya tormoznogo oborudovaniya i upravleniya tormozami zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [*Rules of technical maintenance of braking equipment and railway rolling stock brake management*]. Protocol of sitting of Railway transport council of Commonwealth participants of May 6–7, 2014, no. 60. URL: http://base.garant.ru/57410845/(accessed: 11.10.2017). (In Russian)

7. *Vulis L. A. Termodinamika gazovykh potokov* [*Thermodynamics of gas flows*]. Moscow, Leningrad, State energy publishing house Publ., 1950, 304 p. (In Russian)

8. Karminskij V. D. *Tekhnicheskaya termodinamika i teploperedacha* [*Technical thermodynamics and heat transfer*]. Moscow, Route Publ., 2005, 224 p. (In Russian)

9. Kyurdzhiev Yu. V. *Modelirovanie rabochikh protsessov, razrabotka i modernizatsiya pnevmaticheskikh sistem i agregatov s uchetom obrazovaniya kondensata rabochego tela:* avtoref. dis… kand. tekhn. nauk [*Workflow modeling, development and modernization of pneumatic systems and components, taking into account working body condensation*]. Author's abstract. Cand. Eng. Sci. Thesis. Moscow, MIIZhT Publ., 2004, 163 p. (In Russian)

10. Asadchenko V. R. *Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava* [*Automatic rolling stock brakes*]. Moscow, Route Publ., 2006, 392 p. (In Russian)

11. Inozemtsev V. G., Kazarinov V. M. & Yasentsev V. F. *Avtomaticheskie tormoza* [*Automatic brakes*]. Moscow, Transport Publ., 1981, 464 p. (In Russian)

12. Ivanov P. Yu., Manuilov N. I. & Dulskiy E. Yu. Vliyanie klimaticheskikh uslovij na plotnost tormoznoj seti poezda v ekspluatatsii [Impact of climatic conditions on train braking network density in operation]. *Current issues and perspectives of modern science development: materials of the II*[nd] *International scientifical-practical conference of students, postgraduates and young scientists.* Saint Petersburg, 2017, no. 12-2 (34), pp. 48–57. (In Russian)

13. Ivanov P. Yu., Manuilov N. I. & Dulskiy E. Yu. Modelirovanie raboty rezinovykh uplotnenij tormoznoj seti podvizhnogo sostava v usloviyakh nizkikh temperatur [Modeling of rubber seals of rolling stock braking network at low temperatures]. *Modern technologies, system analysis, modeling,* 2017, no. 3 (55), pp. 112–119. (In Russian)

ХУДОНОГОВ Анатолий Михайлович – доктор техн. наук, профессор, a.hudonogov@yandex.ru; ИВАНОВ Павел Юрьевич – канд. техн. наук, ст. преподаватель, savl.ivanov@mail.ru; *МАНУИЛОВ Никита Игоревич – аспирант, nikita-manuilov@mail.ru; ДУЛЬСКИЙ Евгений Юрьевич – канд. техн. наук, доцент, E. Dulskiy@mail.ru (Иркутский государственный университет путей сообщения).

УДК 621.331:621.311

А. В. Агунов, Д. А. Соколов

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Дата поступления: 09.10.2017
Решение о публикации: 24.01.2018

Аннотация

Цель: Проведение анализа рабочих характеристик элементов и устройств, предназначенных для синтеза автоматических систем управления различными объектами систем электроснабжения железных дорог. **Методы:** Имитационное и компьютерное моделирование. **Результаты:** Приведены результаты моделирования переходных процессов некоторой нелинейной системы автоматического управления в технологической схеме системы обеспечения движения поездов. **Практическая значимость:** Показано, что компьютерное моделирование позволяет сымитировать поведение системы управления при различных режимах, следовательно, обеспечить выработку объективных решений в ситуациях, слишком сложных для простой причинно-следственной оценки альтернатив.

Ключевые слова: Компьютерное моделирование, симулятор электронных схем, системы автоматического управления, анализ качества элементов и устройств железнодорожной автоматики.

Aleksandr V. Agunov, D. Eng. Sci., professor, alexagunov@mail.ru; *** Denis A. Sokolov**, postgraduate student, sokoloffffff@gmail.com (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University)
COMPUTER MODELLING AND ANALYSIS OF AUTOMATION DEVICES OF RAILWAYS POWER SUPPLY SYSTEMS

Summary

Objective: Performing analysis of working elements and devices characteristics intended for synthesis of automatic control systems by various objects of railway power supply systems. **Methods:** Simulation and computer modelling. **Results:** The results of modelling transient processes of some nonlinear automatic control system in a technological scheme of the train operation support system. **Practical importance:** It is shown that computer modelling allows simulating control system behavior under different modes, hence, ensuring objective decision making in situations too complicated for a simple cause-effect evaluation of alternatives.

Keywords: Computer modelling, simulator of electronic schemes, automatic control systems, analysis of elements and railway automatics devices quality.

Введение

Специалисту-практику, работающему в области автоматизации систем электроснабжения железных дорог, постоянно приходится сталкиваться с необходимостью проведения анализа рабочих характеристик элементов и устройств, предназначенных для синтеза ав-

томатических систем управления различными техническими объектами систем обеспечения движения поездов (электроснабжения железных дорог), а также методологии их применения. Это могут быть как очень простые задачи (анализ работоспособности элементов электронных устройств автоматики), так и весьма сложные (анализ работы автоматической системы управления при условии воздействия на систему внешних возмущений).

Еще в конце 1990-х годов решение таких задач требовало использования методов физического моделирования. В настоящее время наиболее распространенный инструмент, применяемый для этих целей,– персональные компьютеры. Для них созданы пакеты прикладных программ, позволяющие даже не владеющему навыками программирования пользователю легко и быстро проводить достаточно сложные исследования электронных схем устройств автоматики [1–3].

Вместе с тем специалистами отрасли компьютеры используются еще недостаточно широко. Это объясняется в большей степени недооценкой возможностей таких пакетов из-за отсутствия достаточно полных сведений о принципах их работы и применяемых в них методах, т. е. сведений о том, каким образом программа моделирования получает те или иные решения.

Постараемся восполнить такой пробел более подробным рассмотрением среды имитационного моделирования Simulink, являющейся частью пакета прикладных программ MATLAB [4–13].

Описание среды Simulink

Simulink – это графическая среда имитационного моделирования, позволяющая при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные и гибридные, нелинейные и разрывные системы. Интерактивная среда Simulink дает возможность использовать уже готовые библиотеки блоков для моделирования электросиловых, механических и гидравлических систем, а также применять развитый модельно-ориентированный подход при разработке систем управления, средств цифровой связи и устройств реального времени. Дополнительные пакеты расширения Simulink приводят к решению всего спектра задач – от разработки концепции модели до тестирования, проверки, генерации кода и аппаратной реализации. Simulink интегрирован в пакет прикладных программ MATLAB, что позволяет применять встроенные математические алгоритмы, мощные средства обработки данных и графику.

При работе с Simulink пользователь может модернизировать библиотечные блоки, создавать свои собственные, а также составлять новые библиотеки блоков. При моделировании он может выбирать метод решения дифференциальных уравнений, а также способ изменения модельного времени (с фиксированным или переменным шагом). В ходе моделирования имеется возможность следить за процессами, происходящими в системе. Для этого применяются специальные устройства наблюдения, входящие в состав библиотеки Simulink. Результаты моделирования могут быть представлены в виде графиков или таблиц [14, 15].

Все вышесказанное, а также удобство работы с пакетом прикладных программ MATLAB делают Simulink хорошим инструментом для проведения компьютерного эксперимента с виртуальными элементами и устройствами железнодорожной автоматики и для оценки их качества.

Моделирование переходных процессов нелинейной автоматической системы управления

Традиционно качество систем автоматического управления оценивается переходным процессом в системе. Причем интерес здесь представляет поведение управляемой величины (выходная переменная y) при резком

изменении задающего воздействия (входная величина x).

Вычисление переходных характеристик нелинейных систем традиционными методами, например с помощью обратного преобразования Фурье или приближенными графоаналитическими методами, связано с определенными трудностями. Поэтому определение поведения системы здесь целесообразнее проводить с помощью компьютерного моделирования в среде Simulink.

На рис. 1 показан процесс моделирования переходных процессов некоторой нелинейной автоматической системы управления в технологической схеме системы обеспечения движения поездов.

На рис. 2 приведена схема компьютерной модели исследуемой системы. Формирование электрической схемы в соответствии с рис. 2 в Simulink осуществляется при помощи компьютерной мыши перемещением выбранных блоков из библиотеки, структурированной согласно назначению расположенных в ней блоков.

Гистерезисный нелинейный элемент в данной схеме моделируется с использованием блока Relay из библиотеки Discontinuities, реализующего релейную нелинейность. Передаточная функция линейной части системы задается с помощью блока Transfer Fcn из библиотеки Continuous. Сумматор представлен блоком Sum из библиотеки Math Operations; на его входы подается сигнал обратной связи, а также единичная функция от блока Step из библиотеки Sources с задержкой в 2 с после начала симуляции. В течение всего моделирования сигналы осциллографируются с помощью блока Scope из библиотеки Sinks (рис. 3).

Интерпретация результатов моделирования показывает, что через 2 с, когда сигнал на входе системы (верхняя кривая на рис. 3) изменил свое состояние с нулевого на единичное, начал меняться и сигнал на выходе схемы (нижняя кривая на рис. 3). Далее в системе развивается апериодический переходный процесс, и через 27,8 с сигнал на выходе схемы становится равным сигналу на входе.

Заключение

Компьютерное моделирование при помощи среды Simulink дает возможность сымитировать поведение системы автоматического управления при различных режимах, а следовательно, обеспечить выработку объективных решений в ситуациях, слишком сложных для простой причинно-следственной оценки альтернатив.

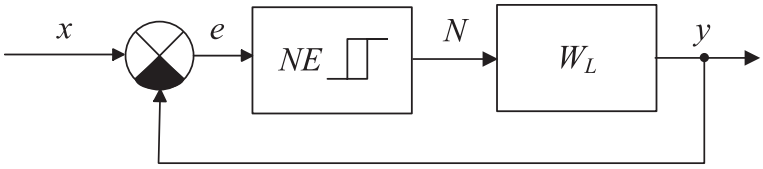


Рис. 1. Структурная схема моделируемой нелинейной системы автоматического управления: x – входная величина; e – величина рассогласования; NE – нелинейный элемент; N – промежуточный сигнал; W_L – передаточная функция; y – выходная переменная

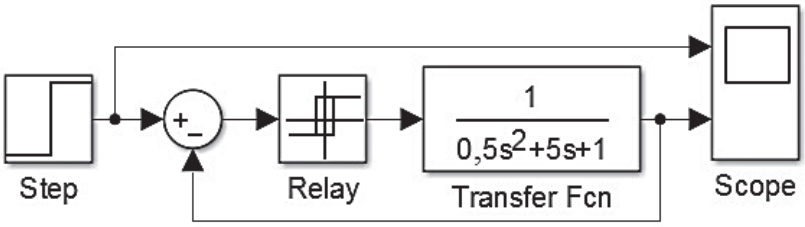


Рис. 2. Схема компьютерной модели исследуемой системы

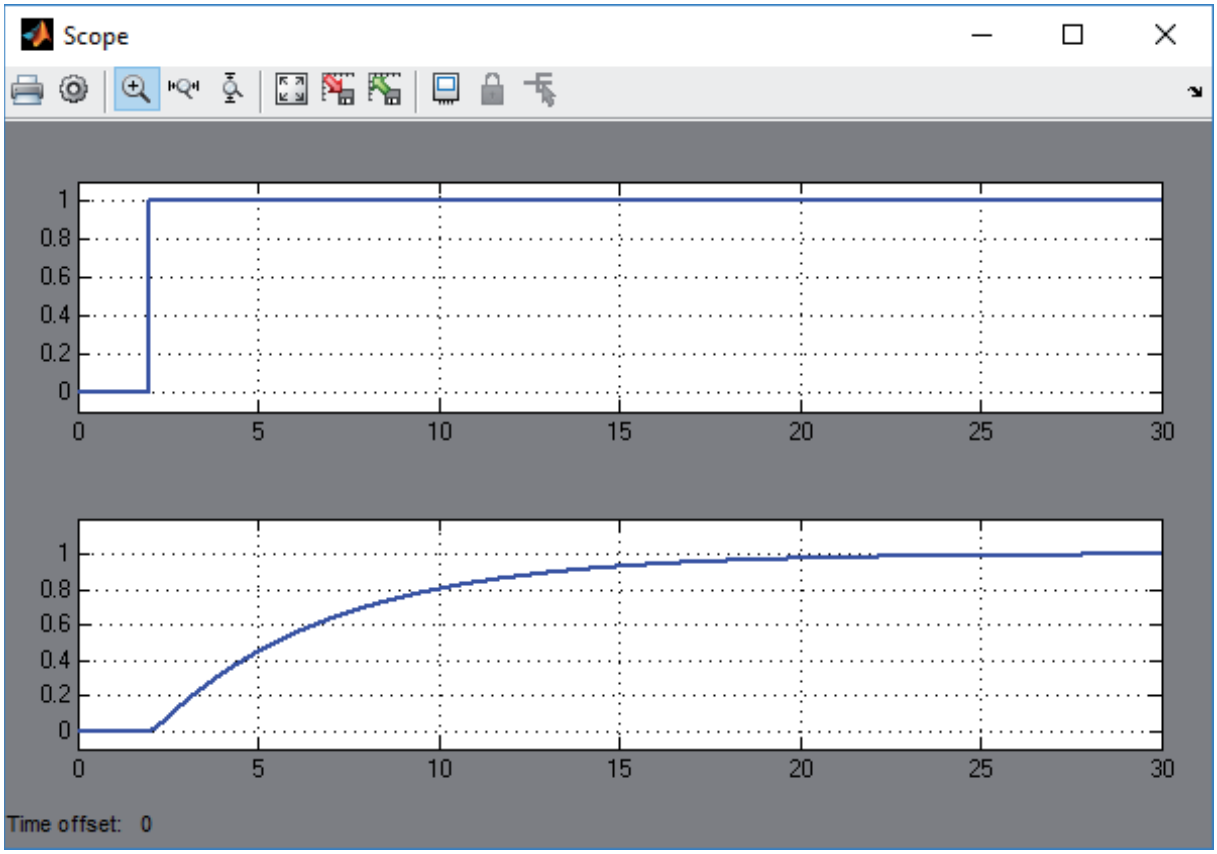


Рис. 3. Результаты работы модели

Кроме того, предшествующее построению конкретной системы автоматического управления компьютерное моделирование позволяет достичь максимально эффективного использования времени и материальных ресурсов разработчика за счет выявления нерациональных или даже ошибочных технических решений.

Библиографический список

1. Агунов А. В. Моделирование аналоговых электронных схем / А. В. Агунов. – СПб. : СПбГМТУ, 2003. – 35 с.

2. Разевиг В. Д. Моделирование аналоговых электронных устройств на персональных ЭВМ / В. Д. Разевиг. – М. : МЭИ, 1993. – 151 с.

3. Гультяев А. К. MATLAB 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows / А. К. Гультяев. – СПб. : КОРОНА-Принт, 1999. – 288 с.

4. Дьяконов В. П. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем : спец. справочник / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. – СПб. : Питер, 2002. – 444 с.

5. Дьяконов В. П. Математические пакеты расширения MATLAB : спец. справочник / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. – СПб. : Питер, 2001. – 488 с.

6. Дьяконов В. П. MATLAB 5.0/5.3. Система символьной математики / В. П. Дьяконов, И. В. Абараменкова. – М. : Нолидж, 1999. – 634 с.

7. Дьяконов В. П. Расширяемые системы для численных расчетов MATLAB / В. П. Дьяконов // Монитор-Аспект. – 1993. – № 2. – С. 26–31.

8. Дьяконов В. П. Справочник по применению системы PC MATLAB / В. П. Дьяконов. – М. : Наука ; Физматлит, 1993. – 112 с.

9. Медведев В. С. Control System Toolbox. MATLAB 5 для студентов / В. С. Медведев, В. Г. Потемкин. – М. : Диалог-МИФИ, 1999. – 287 с.

10. Мартынов Н. Н. MATLAB 5.x : Вычисления, визуализация, программирование / Н. Н. Мартынов, А. П. Иванов. – М. : КУДИЦ-ОБРАЗ, 2000. – 336 с.

11. Потемкин В. Г. MATLAB 5 для студентов / В. Г. Потемкин. – М. : Диалог-МИФИ, 1998. – 314 с.

12. Потемкин В. Г. Система инженерных и научных расчетов MATLAB 5.x / В. Г. Потемкин. – М. : Диалог-МИФИ, 1999. – 366 с.

13. Рудаков П. И. Обработка сигналов и изображений. MATLAB 5.x / П. И. Рудаков, И. В. Сафонов. – М. : Диалог-МИФИ, 2000. – 416 с.

14. Дьяконов В. П. Simulink 4 : спец. справочник / В. П. Дьяконов. – СПб. : Питер, 2002. – 528 с.

15. Данилов А. И. Компьютерный практикум по курсу «Теория управления». Simulink-моделирование в среде MATLAB : учеб. пособие / А. И. Данилов. – М. : МГУИЭ, 2002. – 128 с.

References

1. Agunov A. V. *Modelirovanie analogovykh elektronnykh skhem* [*Modelling analog electronic schemes*]. Saint Petersburg, SPbGMTU Publ., 2003, 35 p. (In Russian)

2. Razevig V. D. *Modelirovanie analogovykh elektronnykh ustroystv na personal'nykh EVM* [*Modelling analog electronic devices on personal computers*]. Moscow, MEI Publ., 1993, 151 p. (In Russian)

3. Gultyaev A. K. *MATLAB 5.2. Imitatsionnoe modelirovanie v srede Windows* [*MATLAB 5.2. Simulation in Windows environment*]. Saint Petersburg, Crown-Print Publ., 1999, 288 p. (In Russian)

4. Dyakonov V. P. *MATLAB. Analiz, identifikatsiya i modelirovanie system* [*MATLAB. Analysis, identification and modelling of systems*]. Saint Petersburg, Peter Publ., 2002, 444 p. (In Russian)

5. Dyakonov V. P. & Kruglov V. V. *Matematicheskie pakety rasshireniya MATLAB* [*Mathematical packets of MATLAB extension*]. Saint Petersburg, Peter Publ., 2001, 488 p. (In Russian)

6. Dyakonov V. P. & Abaramenkova I. V. *MATLAB 5.0/5.3. Sistema simvolnoi matematiki* [*MATLAB 5.0/5.3. Symbolic mathematics system*]. Moscow, Knowledge Publ., 1999, 634 p. (In Russian)

7. Rasshiryaemye sistemy dlya chislennykh raschetov MATLAB [MATLAB extensible systems for numerical calculations]. *Monitor-Aspect,* 1993, no. 2, pp. 26–31. (In Russian)

8. Spravochnik po primeneniyu sistemy PC MATLAB [*Guide in PC MATLAB system application*]. Moscow, Science Publ., PhysMathLit Publ., 1993, 112 p. (In Russian)

9. Medvedev V. S. & Potemkin V. G. *Control System Toolbox. MATLAB 5 dlya studentov* [*Control System Toolbox. MATLAB 5 for students*]. Moscow, Dialogue-MIFI Publ, 1999, 287 p. (In Russian)

10. Martynov N. N. & Ivanov A. P. *MATLAB 5.kh: Vychisleniya, vizualizatsiya, programmirovanie* [*MATLAB 5.x: Calculation, visualization, programming*]. Moscow, KUDITS-Image Publ., 2000, 336 p. (In Russian)

11. Potemkin V. G. *MATLAB 5 dlya studentov* [*MATLAB 5 for students*]. Moscow, Dialogue-MIFI Publ., 1998, 314 p. (In Russian)

12. Potemkin V. G. *Sistema inzhenernykh i nauchnykh raschetov MATLAB 5.x* [*MATLAB 5.x. System of engineering and scientific calculations*]. Moscow, Dialogue-MIFI Publ., 1999, 366 p. (In Russian)

13. Rudakov P. I. & Safonov I. V. *Obrabotka signalov i izobrazheniy. MATLAB 5.kh* [*MATLAB 5.x. Signal and image processing*]. Moscow, Dialogue-MIFI Publ., 2000, 416 p. (In Russian)

14. Dyakonov V. P. *Simulink 4* [*Simulink 4*]. Saint Petersburg, Peter Publ., 2002, 528 p. (In Russian)

15. Danilov A. I. *Kompyuternyy praktikum po kursu "Teoriya upravleniya". Simulink-modelirovanie v srede MATLAB* [*Computer workshop in the course "Control theory". Simulink-modelling in MATLAB environment*]. Moscow, MGUIE Publ., 2002, 128 p. (In Russian)

АГУНОВ Александр Викторович – доктор техн. наук, профессор, alexagunov@mail.ru; *СОКОЛОВ Денис Алексеевич – аспирант, sokoloffffff@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 519.2

П. В. Герасименко, Е. А. Благовещенская, В. В. Яковлев, С. М. Вертешев

МОДЕЛИРОВАНИЕ РИСКОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ТРАНСПОРТНЫХ ОПЕРАЦИЯХ

Дата поступления: 18.07.2017
Решение о публикации: 24.10.2017

Аннотация

Цель: Разработать методологию моделирования и алгоритм прогнозирования показателей риска при проведении транспортных операций. Актуальность цели обусловлена существенным запросом практики принятия обоснованных решений в условиях неопределенности и возможности возникновения рисков недостижения конечной цели транспортных операций. **Методы:** Использован подход системного анализа. Применены методы математической статистики. В основу построения математических моделей положены регрессионный анализ и статистические данные выполнения транспортных операций. Статистические данные формируются путем мониторинга выполнения типовых транспортных операций. **Результаты:** Изложены методологические принципы построения по статистическим данным математических моделей результатов выполнения транспортных операций. Дано описание аппарата оценивания показателей риска недостижения конечных целей транспортных операций. Рекомендована свертка показателей риска к одному показателю. Предложено использовать обобщенный векторный показатель риска, компонентами которого являются вероятность недостижения цели определенного уровня и ущерб, наносимый недостижением цели транспортной операции. Приведен пример оценивания риска несвоевременной доставки груза железнодорожным транспортом. **Практическая значимость:** Предлагаемая теория позволяет осуществлять прогнозирование результатов проведения транспортных операций и обоснованно принимать управленческие решения на начало их проведения. Рекомендовано продолжать совершенствование аппарата моделирования и прогнозирования показателей риска.

Ключевые слова: Транспортные операции, показатели риска, частота, мониторинг, регрессия, коэффициент детерминации, доверительный интервал, вероятность.

Petr V. Gerasimenko, D. Eng. Sci., professor, pv39@mail.ru; **Yekaterina A. Blagoveshenskaya**, D. Phys. and Math. Sci., professor, head of a chair; **Valentin V. Yakovlev**, D. Eng. Sci., professor, jakovlev@pgups.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University); **Sergei M. Vertechev**, D. Eng. Sci., professor (Pskovsky State University) MODELLING RISK APPEARING IN TRANSPORT OPERATIONS

Summary

Objective: Develop methodology for modelling and an algorithm of predicting risk indices in performing transport operations. Objective relevance is due to significant query of reasoned decision-making practice under conditions of uncertainty and possible risks of failure to achieve the ultimate goal of transport operations. **Methods:** System analysis approach is used. Methods of mathematical statistics are applied. Regression analysis and statistical data of performing transport operations are set as the basis for constructing mathematical models. Statistical data are formed by monitoring the performance of typical transport operations. **Results:** Methodological principles of constructing mathematical models of the results of transport operation implementation by statistical data are described. Description of apparatus of risk indices evaluation of failure to achieve ultimate goals of transport operations is given. Risk index folding to a single index is recommended. A generalized risk vector index whose components are probability of failure to achieve the goal of a particular level and damage brought by unattainability of transport operation goal is suggested. An example of evaluating the risk of late cargo delivery by railway is presented. **Practical importance:** The theory suggested allows predicting the results of transport operations performing

and reasonably making management decisions at their beginning. Recommended: continue to improve apparatus of modelling and predicting risk indices.

Keywords: Transport operations, risk indices, frequency, monitoring, regression, determination coefficient, confidence interval, probability.

Введение

Человечество на протяжении своего существования решает различные реальные проблемы и задачи, тем самым совершало, совершает и будет совершать созидательные или разрушительные действия и процессы. В определенный период своего развития из-за увеличения сложности проблем и задач оно пришло к тому, что, прежде чем приступить к практическому решению задачи, следует решить ее теоретически и только после реализовать на практике [1].

Как известно, практическая реализация не всегда завершается успешно, а сопровождается отклонениями поставленных в задаче целей [2]. В последнее время в связи появившимися сложными и ответственными задачами перед принятием решения на реализацию задачи возникла необходимость проводить оценку риска по достижению желаемой цели [3]. К настоящему времени накопилось огромное число решенных задач по оцениванию риска [4–6].

1. Методологические аспекты оценивания показателей риска

Большинство подходов и определений оценивания показателей риска показало свою относительно удовлетворительную эффективность при изучении локальных и, вообще говоря, простых объектов. При переходе к более сложным объектам они далеко не всегда успешно работают. Поэтому в последние годы предложены определения на основе системной методологии [7, 8]. Упрощенная схема методологии системного подхода представлена на рис. 1.

Из указанного подхода следует, что при исследовании риска необходимо планировать следующие этапы [9]:

– выделить некоторую обособленную эксплуатационно-техническую, экономическую или другую систему, которая может функционировать в определенной внешней (переменной или фиксированной) среде;

– определить цель системы, для достижения которой функционирует объект;

– система должна включать предмет исследования, объект функционирования и субъект, который принимает решение на функционирование объекта и является ответственным за риск, т. е. рискует;

– система может быть подвержена риску (риск возможен), но он возникает после принятия субъектом решения на начало функционирования объекта.

Применение системной методологии позволяет построить обобщенное понятие «риск» и разработать более общие подходы и методы его оценивания. Известно, что системы бывают простые и сложные, но для обеих систем, которые функционируют во внешней среде, основными элементами являются субъект, объект и предмет исследования [10]. Каждая система имеет цель, для достижения которой объект функционирует под управлением субъекта.

Субъект (физическое или юридическое лицо) – носитель предметно-практической деятельности и познания. Важнейшее свойство субъекта, выделяющее его из всего окружающего мира, – обладание сознанием. Субъект – источник активности, направленной на объект.

Объект – все то, что существует помимо субъекта в системе, что воспринимается, мыслится и обсуждается. Тем самым объект противопоставляется субъекту. Следует

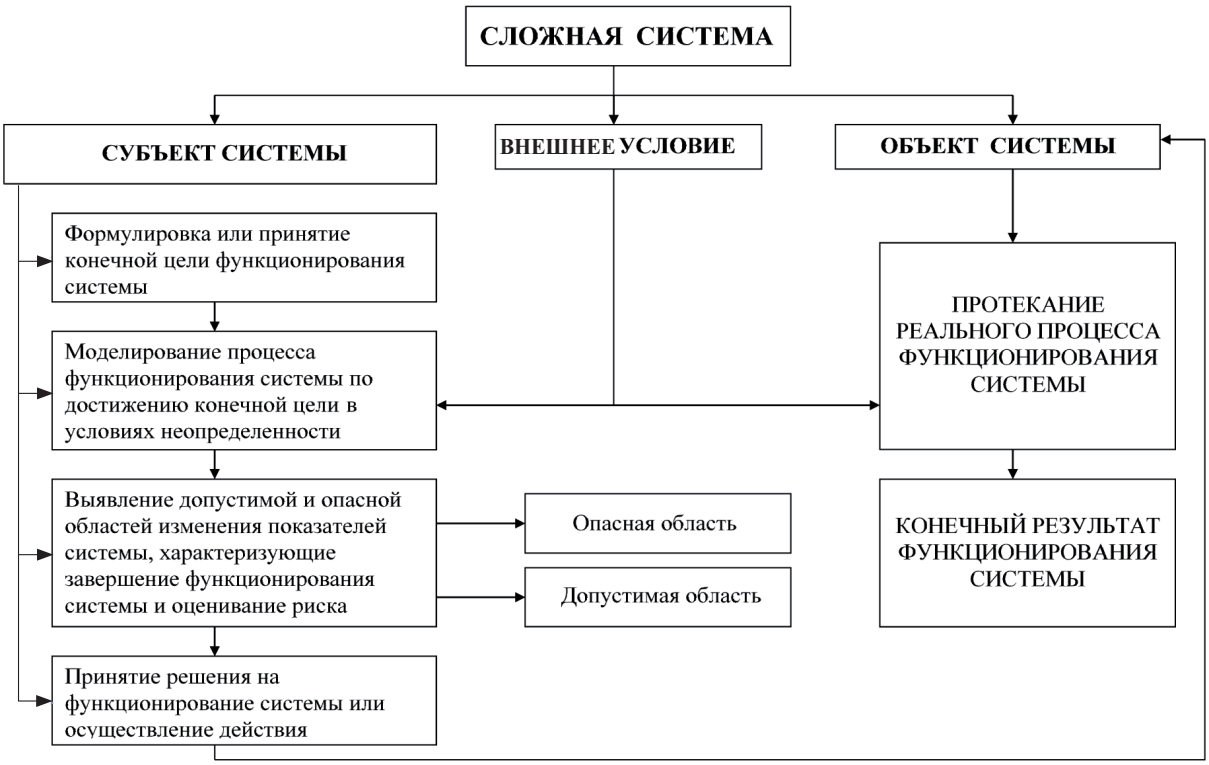


Рис. 1. Упрощенная схема системного подхода оценивания риска

заметить, что человек может выступать и в виде объекта, например, как объект познания другим человеком. В простой системе объект рассматривается целостным и неделимым, в сложной – состоит из множества элементов, а сама система характеризуется рядом признаков [11, 12].

Как отмечалось, система всегда имеет цель, для достижения которой объект системы должен функционировать, т. е. изменять (сохранять) свое состояние, в конкретной внешней среде. Внешняя среда определяется как совокупность всех объектов/субъектов, не входящих в систему. Изменение свойств и/или поведение внешней среды влияет на изучаемый (моделируемый) предмет объекта системы, а также тех объектов/субъектов, чьи свойства и/или поведение которых меняются в зависимости от поведения системы.

Предмет исследования – это та сторона, тот аспект, та точка зрения, «проекция», с которой исследователь познает целостный объект, выделяя при этом главные, наиболее существенные (с точки зрения исследователя), свойства объекта, необходимые для достижения конечной цели функционирования объекта. Один и тот же объект может быть предметом разных исследований или даже целых научных направлений.

Основным инструментальным и эффективным методом решения задач прогнозирования и оценивания риска является моделирование систем. В процессе моделирования некоторые свойства, определяющие предмет изучаемого реального объекта, переносятся на другой объект – модель изучаемого объекта. Тем самым модель – это некоторый заменитель объекта, изучая который можно делать некоторые выводы об исходном объекте. Именно здесь закладываются основы рисков, поскольку субъект принимает решение относительно функционирования объекта по смоделированной модели.

Риск возникает тогда, когда существует неопределенность в достижении конечной цели функционирования объекта. Обычно

цель выражается в достижении некоторого состояния объекта либо конкретных значений параметров объекта. Неопределенность является неотъемлемым атрибутом при принятии решения субъектом на функционирование объекта.

Под неопределенностью понимают отсутствие полной информации о функционировании объекта, невозможность точного предсказания будущего в достижении конечной цели.

Исходя из изложенного, определение понятия «риск» целесообразно базировать на ряде гипотез, которые следует учитывать при оценивании риска в различных системах.

Гипотеза 1. Субъект системы всегда строит свое отношение к объектам и процессам по их моделям, которые создаются наукой или человеческими знаниями и опытом.

Гипотеза 2. В реальной жизни не существуют два объекта с одинаковыми процессами функционирования, поскольку при функционировании на объект оказывают влияние случайные факторы как внутреннего состояния, так и внешней среды.

Гипотеза 3. Поскольку модельный процесс функционирования объекта, по которому субъект принимает решение, практически всегда будет отличаться от реального процесса, то и неопределенность недостижения конечной цели объектом всегда будет существовать. Более адекватная модель связана с меньшей неопределенностью. Другими словами, чем более адекватной будет модель, тем показатели будут в большей степени точно отражать реальный процесс функционирования объекта.

На основании приведенных гипотез на рис. 2 представлена упрощенная схема, поясняющая определение понятия «риск», где сплошная линия стрелки – путь следования при оценивании риска, а пунктирная – невозможная оценка.

Определение 1. *Риск – субъективная характеристика меры отклонения планируемой от реально достигаемой цели функционирования объекта системы, объясненная субъектом по прогнозной конечной цели, которая построена в условиях неопределенности, что может привести к различным, соответствующим уровням ошибки предсказания и размерам последствий для системы.*

Следует различать риск реально существующий и предполагаемый или возможный.

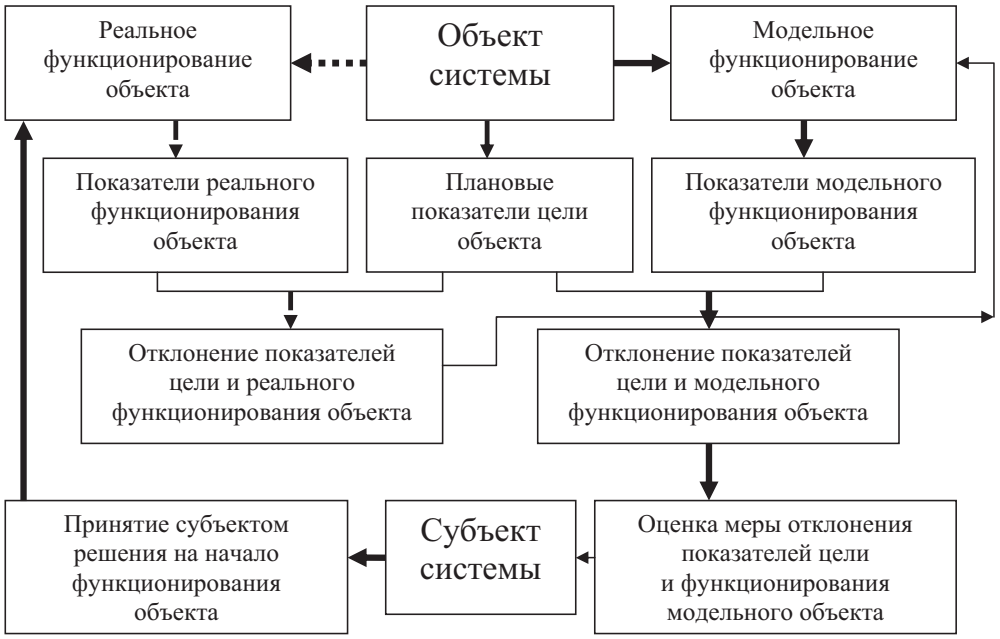


Рис. 2. Упрощенная схема, поясняющая определение понятия «риск»

Последний характерен для состояния системы до ее функционирования и характеризует возможную или реально ожидаемую ситуацию системы с неблагоприятными последствиями. О таком риске можно говорить после анализа моделирования. Реально существующий риск возникает после принятия решения субъектом на функционирование объекта.

Методические аспекты оценивания показателей риска

Реальный риск всегда существует во времени, если функционирование объекта происходит во времени. Тогда время изменения показателей риска равно времени функционирования объекта системы, т. е. с момента принятия решения субъектом на начало функционирования и до достижения реальной цели. В этот период можно продолжать проводить оценку риска, вводя новые исходные данные моделирования, а именно появляющиеся новые стороны внешней среды или внутреннего состояния. Наконец, можно целенаправленно изменять эти стороны, управляя тем самым риском.

Определение 2. *Управлять риском – значит, целенаправленно непрерывно или дискретно воздействовать на внешнюю среду или изменять внутреннее состояние объекта, с целью изменения показателей риска.*

Показатели риска показывают количественно меру по уровням отклонений модельных показателей функционирования объекта от плановых показателей, поставленных в цели. Как показатель количественной меры может выступать вероятность возникновения отклонения. Вторым показателем может служить величина последствий отклонения, в качестве которой может приниматься, например, ущерб или снижение успеха.

Таким образом, риск возникает тогда и только тогда, когда возможно не единственное развитие событий при функционировании объекта. Он существует, когда исход функционирования объекта может привести к ущербу (убытку) или другому негативному (снижению позитивного) последствию, а также, когда предполагаемое событие имеет практическое значение и затрагивает интересы хотя бы одного субъекта. Риска без принадлежности нет.

Рисковать означает принимать решение на функционирования объекта при наличии возможного риска. Рискуют субъекты (физические или юридические лица) системы, поскольку именно они принимают решение и несут ответственность за достижение конечной цели функционирования объекта системы в определенной внешней среде.

Как отмечалось, объектом могут являться различные производственные, экономические, социальные и другие объекты, в том числе и интеллектуальные транспортные системы, а также люди и иные конкретные элементы системы, которые совместно с субъектом обеспечивают функционирование системы в достижение стоящих перед ней целей. Функционирующий объект в конкретной внешней среде может оказываться подверженным воздействиям, которые не заложены при его моделировании, тем самым его реальное функционирование может не достигнуть конечной цели системы.

Согласно введенному определению риска, осуществлять оценивание показателей риска можно по следующему концептуальному подходу:

– построение системы, выявление и анализ факторов, которые порождают риски;

– качественный анализ функционирования объекта в заданной внешней среде и выявление видов риска;

– системное и комплексное моделирование функционирования объекта системы в заданной внешней среде;

– установление областей функционирования объекта по его показателям (допустимой, граничной и критической);

– оценивание показателей риска (меры отклонения) и разработка соответствующих мер по снижению уровня риска;

– принятие решения на начало функционирования объекта;

– управление риском.

Применение методики оценивания показателя риска

Практическое приложение изложенной методологии и методики в настоящей работе иллюстрируется решением задачи прогнозирования и оценивания показателей риска по своевременной доставке груза железной дорогой.

Для этого рассматривается система, включающая:

1) объект системы – предприятие, осуществляющее доставку груза, включая средства доставки и работников;

2) субъект системы – лицо, согласовавшее время доставки, подписавшее договор с заказчиком и принимающее решение на начало доставки груза;

3) предмет системы – время процесса перемещения груза;

4) внешняя среда – все остальное, участвующее в перемещении груза, исключая объект и субъект;

5) цель системы – доставка груза в плановое время, которое оговаривается в договоре;

6) исходные данные – статистические данные по ранней доставке груза, которые получены при принятых элементах системы.

Следует заметить, что построение системы может быть и иным.

В работе рассматривается именно такая система. Это не означает, что она является лучшей из возможных систем и служит примером применения теории.

Как известно, при исследовании срока доставки груза учитывается большое число факторов, влияющих на его формирование, на всех маршрутах движения груза [13]. В рассматриваемом примере на основании статистических данных 107 доставок груза на расстояние 1700 км выявлено, что время и частота времени доставки груза за конкретное время являются случайными величинами. В таблице приведены числовые хактеристики, а именно: частоты и время доставки груза в сутках, их дисперсии и СКО.

Числовые характеристики доставки груза

Числовая характеристика	Время доставки груза, сут.	Частота
Среднее значение	5,75	0,076923
Дисперсия	3,791667	0,002899
СКО	1,94722	0,053844

Большой разброс времени доставки груза относительно планового срока, который определяется «Правилами исчисления сроков доставки грузов», обусловливается случайным процессом перевозки груза. Представим сгруппированные статистические данные времени доставки груза и частоты:

Среднее время	2,75	3,25	3,75
Частота доставок	0,00935	0,00935	0,03738
Среднее время	4,25	4,75	5,25
Частота доставок	0,05607	0,14019	0,14019
Среднее время	5,75	6,25	6,75
Частота доставок	0,14953	0,09346	0,14953
Среднее время	7,25	7,75	8,25
Частота доставок	0,06542	0,06542	0,07477
Среднее время	8,75	9,0	
Частота доставок	0,00935	0,0	

Рассматривая их, как числовые характеристики ряда распределения случайной величины, целесообразно для дальнейшего преобразования осуществить построение непрерывной теоретической формы зависимости частоты от времени и найти плотность и функцию распределения времени доставки груза.

Приведенные значения можно дать как графическое изображение эмпирического вариационного ряда, которое принимает вид непрерывной кривой и называется кривой распределения. Она может рассматриваться как некая теоретическая форма распределения, свойственная определенным условиям транспортирования груза.

Анализируя частоты в эмпирическом распределении, можно описать его с помощью математической модели – закона распределения, установив по исходным данным параметры теоретической кривой, и определить тип распределения [14]. Модель зависимости частоты от времени доставки груза на расстояние 1700 км можно построить с помощью метода наименьших квадратов. На рис. 3 представлены построенная квадратичная зависимость и ее график.

Кроме того, на нем рядом с кривой зависимости частоты y от времени доставки груза x приведено значение коэффициента детерминации R^2. Его значение свидетельствует, что связь между частотой и временем доставки объясняется 80%. При определении типа распределения первоначально следует установить границы области параболической зависимости, которые следуют из решения следующего уравнения:

$$y(x) = -0,0139 \cdot x^2 + 0,1653 \cdot x - 0,364 = 0.$$

Решение уравнения дает следующие корни: $x_1 = 2,92$ и $x_2 = 8,97$. Для того чтобы теоретическая форма связи частоты и времени стала законом распределения, необходимо потребовать выполнение условия

$$A \cdot \int_{x_1}^{x_2} y(x) \cdot dx =$$

$$A \cdot \int_{2,92}^{8,97} (-0,0139 \cdot x^2 + 0,1653 \cdot x - 0,364) = 1.$$

Расчет показал, что для этого нужно, чтобы коэффициент $A = 1,943$. Тогда плотность распределения вероятности будет иметь вид

$$f(x) = 1,943 \cdot y(x) = \\ = -0,027 \cdot x^2 + 0,321 \cdot x - 0,707. \qquad (*)$$

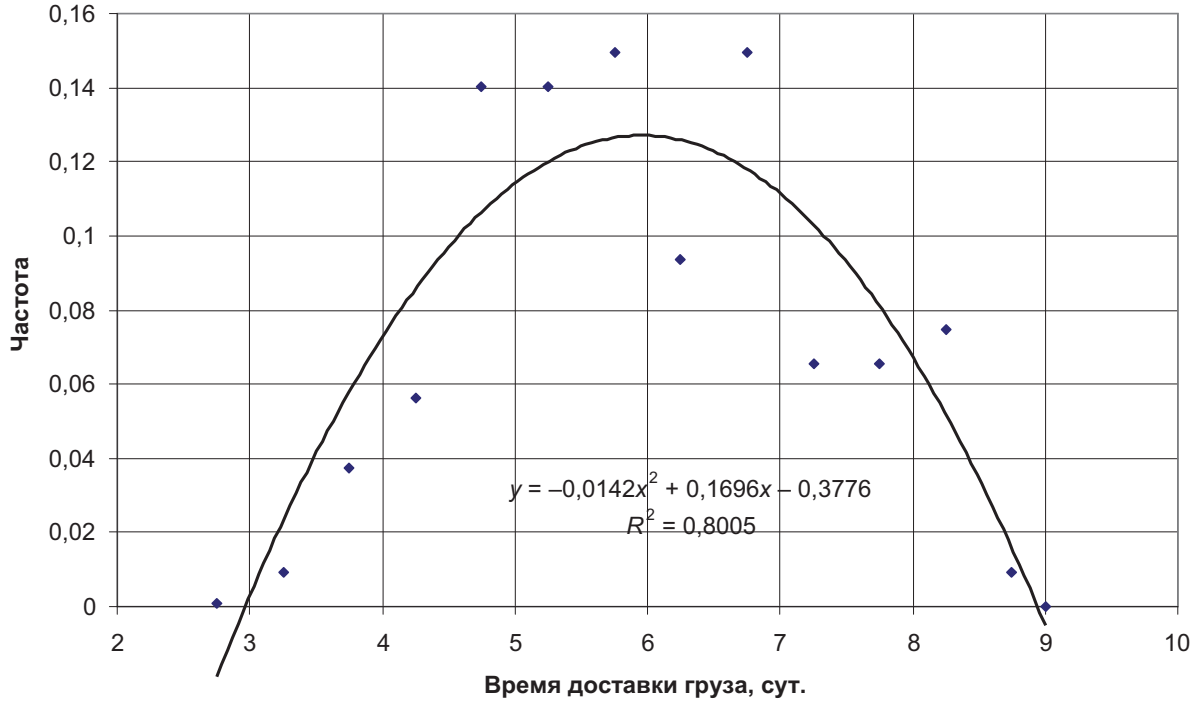


Рис. 3. Теоретическая зависимость и опытные значения

Легко показать, что плотность распределения вероятности времени доставки груза, вычисляемая по формуле (*), можно представить в следующей форме:

$$f(x) = \frac{6 \cdot (x - 2{,}92) \cdot (8{,}97 - x)}{(8{,}97 - 2{,}92)^3}$$

или

$$f(x) = \frac{6 \cdot (x - x_1) \cdot (x_2 - x)}{(x_2 - x_1)^3}.$$

В полученном соотношении, которое носит название параболическое распределение, x_1 и x_2 – границы области возможных значений времени доставки.

Тогда по функции распределения для планируемого времени доставки x_0 легко вычислить вероятность своевременной доставки груза по формуле

$$F'(x) = \int_{x_1}^{x_0} \frac{6 \cdot (x - x_1) \cdot (x_2 - x)}{(x_2 - x_1)^3} \cdot dx =$$

$$= \int_{x_1}^{x_0} (-0{,}027 \cdot x^2 + 0{,}321 \cdot x - 0{,}707) dx.$$

На рис. 4 представлена функция распределения планируемого времени доставки груза (ряд 1) и риск несвоевременной доставки (ряд 2), вычисленный следующим образом:

$$R(x) = 1 - F(x).$$

Зная функцию распределения планируемого времени доставки груза и величину планируемого времени, легко установить вероятность несвоевременной доставки груза.

Применительно к рассматриваемой доставке на расстояние 1700 км, согласно «Правилам исчисления сроков доставки грузов», среднее плановое время составляет 6 сут. В этом случае вероятность доставки груза за плановое время составляет 0,512. Полученный результат подтверждает, что доставка груза относится к транспортным операциям с высоким риском [15].

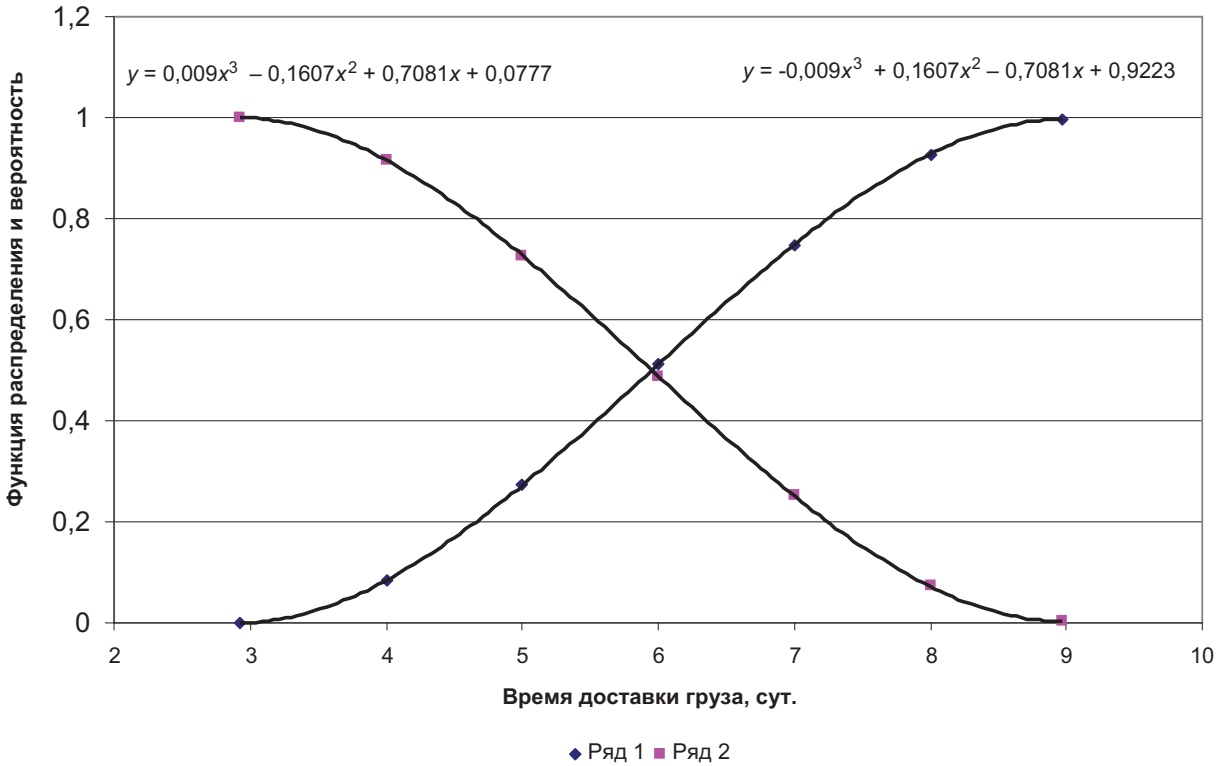


Рис. 4. Функция распределения и вероятность несвоевременной доставки груза

Заключение

В работе изложены методологические и методические аспекты оценивания риска, который всегда связан с субъектом. Субъект не только осуществляет выбор решения на начало транспортной операции, но и оценивает вероятности возможных событий транспортировки и связанные с ними потери. Показатели риска включают как оценки вероятностей реализации принятия решений, так и количественные характеристики его последствий. Рискуя, субъект выбирает альтернативу, являющуюся результатом принятого им решения, хотя возможный результат в точности ему неизвестен. Ключевым является вопрос об оценивании риска, поскольку нельзя осуществлять разумное решение из возможных, пока риск не оценен.

Необходимо отметить, что риск является вектором, компоненты которого – оценки как вероятности реализации возможных решений, так и его последствий (потери, ущерб, выигрыш). Риск целесообразно измерять с помощью обобщенного показателя – коэффициента риска, под которым следует понимать отношение взвешенной доли возможного отклонения результирующего показателя от планируемого к средневзвешенному значению этого показателя.

Практическое приложение изложенной методологии проиллюстрировано решением задачи прогнозирования и оценивания показателей риска по своевременной доставке груза железной дорогой. Полученный результат подтверждает, что доставка груза относится к транспортным операциям с высоким риском.

Библиографический список

1. Диев В. С. Неопределенность как атрибут и фактор принятия решений / В. С. Диев // Вестн. Новосибирск. гос. ун-та. – Сер. Философия. – 2010. – Т. 8, № 1. – С. 3–8.

2. Альгин С. П. Риск и его роль в общественной жизни / С. П. Альгин. – М. : Мысль, 1989. – 187 с.

3. Найт Ф. Х. Риск, неопределенность и прибыль / Ф. Х. Найт ; пер. с англ. М. Я. Каждан ; науч. ред. В. Г. Гребенников. – М. : Дело, 2003. – 359 с.

4. Вітлінский В. В. Економічний ризик системній аналіза, менеджмент. – Киев : КДЕУ, 1994. – 245 с.

5. Бачкаи Т. Хозяйственный риск и методы его измерения / Т. Бачкаи, Д. Месена, Д. Мико и др. ; пер. с венгр. – М. : Экономика, 1979. – 183 с.

6. Ястремський О. І. Моделювання економічного ризику. – Київ : Либідь, 1992. – 176 с.

7. Герасименко П. В. Обобщение основных положений методологии оценивания риска / П. В. Герасименко // Инновационная экономика и промышленная политика региона (ЭКОПРОМ–2015). Труды Междунар. науч.-практич. конференции / под ред. А. В. Бабкина. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – С. 665–671.

8. Герасименко П. В. Теория риска / П. В. Герасименко. – СПб. : ПГУПС, 2015. – 51 с.

9. Герасименко П. В. Метод моделирования риска при повышении стоимости услуг / П. В. Герасименко // Изв. Междунар. Академии наук высшей школы. – 2011. – Вып. 2 (56). – С. 64–70.

10. Герасименко П. В. Методика моделирования риска при прогнозировании результатов инвестирования производственной деятельности предприятия / П. В. Герасименко // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2012. – Вып. 2 (31). – С. 142–147.

11. Герасименко П. В. Оценка показателей управленческого риска при прогнозировании результатов производственной деятельности предприятия / П. В. Герасименко // Вестн. Приднестровск. ун-та. – Сер. физико-математических и технических наук. – 2012. – № 3 (42). – С. 134–141.

12. Герасименко П. В. Моделирование производственно-экономической деятельности филиала АО «Федеральная пассажирская компания» / П. В. Герасименко, Г. Б. Стасишина // Государство и бизнес. Современные проблемы экономики : материалы VII Междунар. науч.-практич. конференции. – СПб. : Северо-Западный институт управления РАНХиГС при Президенте РФ, Факультет экономики и финансов, 2015. – С. 111–116.

13. Титов Г. Б. Методика оценки вероятности своевременной доставки груза железнодорожным транспортом / Г. Б. Титов // Изв. Петерб. ун-та путей

сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2013. – Вып. 2 (35). – С. 81–86.

14. Герасименко П. В. Прогнозирование сроков доставки грузов железнодорожным транспортом / П. В. Герасименко, Г. Б. Титов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2014. – Вып. 3 (40). – С. 162–169.

15. Герасименко П. В. Оценивание рисков необеспечения своевременной доставки груза железнодорожным транспортом / П. В. Герасименко, Г. Б. Титов // Материалы 8-й Междунар. науч.-практич. конференции. – Киев : Гос. эконом.-технологич. ун-т транспорта, 2013. – С. 293–295.

References

1. Diev V. S. Neopredelennost kak atribut i faktor prinyatiya resheniy [Uncertainty as attribute and decision-making factor]. *Bulletin of Novosibirsk State University. Series Philosophy,* 2010, vol. 8, no. 1, pp. 3–8. (In Russian)

2. Algin S. P. *Risk i ego rol v obshchestvennoy zhizni* [*Risk and its role in public life*]. Moscow, Thought Publ., 1989, 187 p. (In Russian)

3. Nayt F. Kh. *Risk, neopredelennost i pribyl.* Per. s angl. M. Ya. Kazhdan; nauchnaya red. V. G. Grebennikov [*Risk, uncertainty and profit*]. Ttr. from English by M. Ya. Kazhdan; scientific ed. of V. Grebennikov. Moscow, Affairs Publ., 2003, 359 p. (In Russian)

4. Vitlinsky V. V. *Ekonomichniy rizik sistemniy analiz, menedzhment* [*Ecomic risk of system's analysis, menedzhment*]. Kiev, KDEU Publ., 1994, 245 p.

5. Bachkai T., Mesena D., Miko D. et al. *Khozyajstvennyj risk i metody ego izmereniya* [*Economic risks and methods of its measurement*]. Tr. from Hungarian. Moscow, Economics Publ., 1979, 183 p. (In Russian)

6. Yastremsky O. I. *Modelirovaniye ekonomicheskogo riska* [*Modelling economic risk*]. Kiev, Lybid Publ., 1992,176 p.

7. Gerasimenko P. V. Obobshchenie osnovnykh polozheniy metodologii otsenivanie riska. Innovatsionnaya ekonomika i promyshlennaya politika regiona (EKOPROM–2015) [Generalization of main provisions of methodology for assessing risk. Innovative economy and industrial policy of the region (ECOPROM–2015)]. *Transactions of International scientific-practical conference.* Ed. by A. Babkina. Saint Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2015, pp. 665–671. (In Russian)

8. Gerasimenko P. V. *Teoriya riska* [*Risk theory*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2015, 51 p. (In Russian)

9. Gerasimenko P. V. Metod modelirovaniya riska pri povyshenii stoimosti uslug [Method of risk modelling in increasing the cost of services]. *Bulletin of International Academy of higher school sciences,* 2011, issue 2 (56), pp. 64–70. (In Russian)

10. Gerasimenko P. V. Metodika modelirovaniya riska pri prognozirovanii rezultatov investirovaniya proizvodstvennoy deyatelnosti predpriyatiya [Technique of modelling risk in predicting investment results of production enterprise activity]. *Bulletin of PGUPS*, 2012, issue 2 (31), pp. 142–147. (In Russian)

11. Gerasimenko P. V. Otsenka pokazateley upravlencheskogo riska pri prognozirovanii rezultatov proizvodstvennoy deyatelnosti predpriyatiya [Evaluating management risk indices in predicting results of production enterprise activity]. *Bulletin of Pridnestrovsky University. Series Physical-mathematical and technical sciences*, 2012, no. 3 (42), pp. 134–141. (In Russian)

12. Gerasimenko P. V. & Stasishina G. B. Modelirovanie proizvodstvenno-ekonomicheskoy deyatelnosti filiala AO "Federalnaya passazhirskaya kompaniya". Gosudarstvo i biznes [Modelling productive and economic activity of JSC affiliation "Federal passenger company". State and business]. *Modern problems of economy: Proceedings of the VIIth International scientific-practical conference.* Saint Petersburg, Northwest management institute of RANChiGS under the President of the Russian Federation Publ., Faculty of economics and finance Publ., 2015, pp. 111–116. (In Russian)

13. Titov G. B. Metodika otsenki veroyatnosti svoevremennoy dostavki gruza zheleznodorozhnym transportom [Procedure of evaluating probability of timely cargo delivery by railway]. *Bulletin of PGUPS*, 2013, issue 2 (35), pp. 81–86. (In Russian)

14. Gerasimenko P. V. & Titov G. B. Prognozirovanie srokov dostavki gruzov zheleznodorozhnym transportom [Predicting cargo delivery time by railway].

Bulletin of PGUPS, 2014, issue 3 (40), pp. 162–169. (In Russian)

15. Gerasimenko P. V. & Titov G. B. Otsenivanie riskov neobespecheniya svoevremennoy dostavki gruza zheleznodorozhnym transportom [Evaluating risks of failure to provide timely cargo delivery by railway]. *Proceedings of the VIIIth International scientific-practical conference.* Kiev, State economic-technological transport University Publ., 2013, pp. 293–295. (In Russian)

ГЕРАСИМЕНКО Петр Васильевич – доктор техн. наук, профессор, pv39@mail.ru; БЛАГОВЕЩЕНСКАЯ Екатерина Анатольевна – доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующая кафедрой; ЯКОВЛЕВ Валентин Васильевич – доктор техн. наук, профессор, jakovlev@pgups.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); ВЕРТЕШЕВ Сергей Михайлович – доктор техн. наук, профессор (Псковский государственный университет).

УДК 004.056

**А. А. Корниенко, Д. Н. Бирюков, М. Л. Глухарев,
А. П. Глухов, С. В. Диасамидзе**

МОДЕЛЬ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОВ И МЕТОД СИНТЕЗА СПЕЦИФИКАЦИЙ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ РИСК–ОРИЕНТИРОВАННОГО УПРЕЖДАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ [1]

Дата поступления: 09.10.2017
Решение о публикации: 08.11.2017

Аннотация

Цель: Обеспечение гарантированной информационной безопасности критической информационной инфраструктуры железнодорожного транспорта и построение интеллектуальной системы управления информационной безопасностью (СУИБ) на основе риск-ориентированного и интеллектуального проактивного (упреждающего) подходов. **Методы:** Применяются системный подход, методы теории рисков и искусственного интеллекта. **Результаты:** Разработаны модель онтологического представления процессов и метод синтеза функциональных спецификаций возможных ситуаций и сценариев упреждающего поведения перспективной интеллектуальной СУИБ критических систем. **Практическая значимость:** Предложены пути построения элементов СУИБ критической информационной инфраструктуры с интеллектуальным упреждающим поведением и инструментарий для моделирования информационно-технических конфликтов.

Ключевые слова: Информационная безопасность, интеллектуальная система управления информационной безопасностью железнодорожного транспорта, предотвращение рисков информационной безопасности, риск-ориентированное управление, проактивное (упреждающее) управление, метод синтеза функциональных спецификаций.

Anatoliy A. Kornienko, D. Eng. Sci., professor, head of chair, kaa.pgups@ya.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University); **Denis N. Biryukov**, D. Eng. Sci., chief of chair, Biryukov.D.N@yandex.ru (A. F. Mozhaisky Military-space academy); **Mikhail L. Glukharev**, Cand. Eng. Sci., associate professor, mlgluharev@yandex.ru; **Aleksandr P. Glukhov**, Cand. Eng. Sci., associate professor, gluhovap@gvc.rzd.ru; * **Svetlana V. Diasamidze**, Cand. Eng. Sci., associate professor, sv.diass99@ya.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) ONTOLOGICAL MODEL OF PROCESS REPRESENTATION AND METHOD OF SYNTHESIS OF SPECIFICATIONS FOR INTELLECTUAL SYSTEM OF RISK-ORIENTED ANTICIPATORY INFORMATION SECURITY MANAGEMENT

Summary

Objective: Providing assured information security of critical information infrastructure in railway transport and constructing (ISMS) intellectual information security management system on the base of risk-oriented and intellectual proactive (anticipatory) approaches. **Methods:** A system approach, methods of risk theory and artificial intelligence are applied. **Results:** A model of ontological process representation and a method of functional specification synthesis of possible situations and scenarios of anticipatory behaviour of perspective intellectual ISMS of critical systems are developed. **Practical importance:** The

[1] Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-20-03048.

ways of constructing elements of critical information infrastructure ISMS with intellectual anticipatory behavior and a toolset for modelling information-technical conflicts are suggested.

Keywords: Information security, intellectual information security management system of railway transport, information security risk prevention, risk-oriented control, proactive (anticipatory) control, method of functional specification synthesis.

Введение

Одним из национальных интересов в информационной сфере в соответствии с положениями Доктрины информационной безопасности Российской Федерации является обеспечение устойчивого и бесперебойного функционирования критической информационной инфраструктуры (КИИ) РФ. Федеральным законом РФ от 26 июля 2017 г. № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры» к субъектам КИИ отнесены информационные системы, информационно-телекоммуникационные сети, автоматизированные системы управления, в том числе функционирующие в сфере транспорта.

В результате принятия и реализации «Концепции развития цифровой модели бизнеса в холдинге “РЖД” (цифровая железная дорога)» и «Стратегии развития информационных технологий ОАО “РЖД” на период до 2020 года» и с учетом распределенного характера информационной инфраструктуры железнодорожного транспорта, широкого использования сети Интернет, различных, в том числе беспроводных, каналов связи, увеличения внутрихолдинговых и внешних связей усиливаются возможности по реализации деструктивных информационно-технических воздействий (инцидентов информационной безопасности и компьютерных атак) на КИИ со стороны как внутренних, так и внешних нарушителей.

С учетом этих факторов важным направлением обеспечения гарантированного уровня (приемлемого риска) информационной безопасности КИИ, автоматизированных и информационно-телекоммуникационных систем (АИТС) и особенно автоматизированных систем критического применения (АС КП) железнодорожного транспорта является совершенствование системы управления информационной безопасностью на основе риск-ориентированного и проактивного (упреждающего) подходов [1–6]. Риск-ориентированное планирование и управление рисками и инцидентами информационной безопасности КИИ и АС КП должны быть в значительной мере направлены на принятие превентивных мер и действий (наряду с корректирующими), т. е. на интеллектуальное упреждающее управление информационной безопасностью критических систем управления железнодорожного транспорта в рамках принятого концептуального подхода (рис. 1).

Это требует разработки и развития подходов к снижению и предотвращению рисков (и обеспечению приемлемого риска) информационной безопасности критически важных объектов и систем железнодорожного транспорта (КИИ и АС КП) на основе разработки моделей и методов интеллектуализации риск-ориентированного упреждающего управления. Решаемые нами задачи базируются на концептуальной модели риск-ориентированной системы управления информационной безопасностью (СУИБ) с интеллектуальным упреждающим поведением, рассмотренной в работах [7–13].

Интеллектуальное упреждающее управление информационной безопасностью – основное направление предотвращения риска информационной безопасности

Основная задача интеллектуальной СУИБ КИИ ОАО «РЖД» – предотвратить риск информационной безопасности. Согласно [14],

Цель – *повышение результативности управления и обеспечение гарантированной информационной безопасности транспортной системы*

Сочетание подходов	Принципы и процессы
• *Верификационно-факторный* • *Риск-инцидентный* • *Интеллектуальный проактивный* • *Ситуационный*	***В соответствии с*** *ГОСТ Р ИСО/МЭК 2700Х; СТО РЖД 1.18.002–2009; Положений ОАО «РЖД», …*
	Принципы управления рисками КИИ и АС КП: *равной устойчивости; выделения и управления критическим ресурсом; интеграции факторов риска*
Показатели и критерии результативности управления	
Концептуальная модель оценивания и управления рисками АС КП	
Подход к предотвращению рисков на основе интеллектуализации упреждающего управления	

Рис. 1. Подход к риск-ориентированному и интеллектуальному упреждающему управлению информационной безопасностью КИИ

решение по предотвращению риска означает невозможность вовлечения в рискованную ситуацию. Понятие «Предотвращение» не является тривиальным и не всегда истолковывается однозначно. Поэтому необходимо декомпозировать рассматриваемое понятие на составляющие (рис. 2).

Можно полагать, что понятие «Предотвращение» (устранение ранними мерами) является агрегирующим понятием и основывается на понятиях «Обнаружение», «Предупреждение» и «Пресечение» [10]. При этом в рамках «Обнаружения» можно выделить «Узнавание» (распознавание) и «Открытие» (рассуждение с заключением), а в рамках «Предупреждения» – «Уведомление» (оповещение) и «Упреждение» (предварение).

Анализ возможностей средств обеспечения информационной безопасности элементов КИИ позволяет сделать вывод о том, что в настоящий момент наибольшее развитие получили средства, способные осуществлять

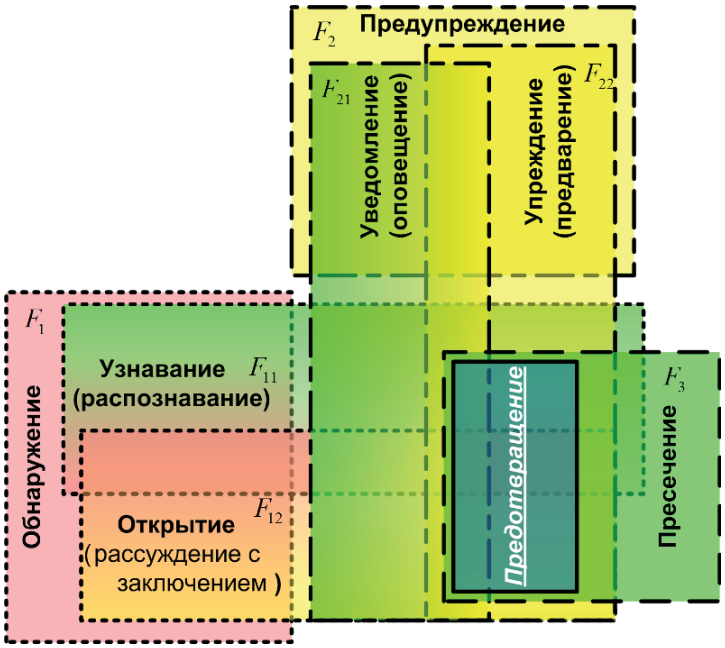


Рис. 2. Декомпозиция понятия «Предотвращение»

распознавание известных компьютерных атак, оповещение ответственных лиц о факте их совершения и пресечения. Значительно меньше развиты средства, способные осуществлять накопление и интеллектуальную обработку данных, приводящую к возможности порождения спецификаций упреждающего поведения в конфликте.

Можно предположить, что способность СУИБ КИИ к упреждению в конфликте может основываться на способности к манипулированию имеющимися у системы знаниями и способности к порождению новых знаний (см. «Открытие» на рис. 2). Очевидно, что пополнять собственную базу знаний СУИБ КИИ можно либо информацией, которая предоставляется ей экспертами и программными (аппаратно-программными) средствами из ее состава, либо порожденными ею самой знаниями, тем самым сокращая время пополнения базы знаний, а следовательно, и время выработки решений по обеспечению защищенности КИИ.

Следовательно, можно утверждать, что упреждающее поведение СУИБ КИИ как киберсистемы в конфликте сводится к синтезу такого сценария поведения, в ходе которого она способна изменить ход запланированного к реализации нарушителем процесса, приводящего к негативным для КИИ последствиям. Для этого такая киберсистема должна быть способной изменить ход одного из мероприятий, являющегося составной частью процесса, который может быть завершен с неприемлемым для КИИ результатом. Изменение выполнения одного из мероприятий должно приводить к изменению процесса, а именно – к переходу к такой последовательности мероприятий (к траектории/трассе процесса), которая завершается допустимым для КИИ исходом.

Исходя из приведенных выше рассуждений, можно сделать вывод о том, что повысить результативность противодействия компьютерным атакам при обеспечении и управлении защищенностью КИИ можно путем увеличения:

1) количества обнаруженных и моделируемых уязвимостей КИИ, составляющих основу гибридной модели угроз;

2) глубины прогнозирования (увеличив интервал упреждения);

3) интеллектуальности проектируемой системы информационной безопасности, проявляющейся через повышение объема порожденных знаний и сокращение времени выработки решений по противодействию возможным компьютерным атакам.

Модель онтологического представления процессов упреждающего поведения системы

Решение задач упреждения в информационно-техническом конфликте опирается на результаты решения задач, связанных с обнаружением процессов, которые в ближайшей или отдаленной перспективе могут привести к негативным последствиям для защищаемого информационно-технического ресурса. Ввиду этого по итогам наблюдений необходимо иметь возможность раннего обнаружения подобных процессов.

Среди основных задач для обработки результатов наблюдений за процессами, проходящими в киберпространстве, важнейшее место занимают следующие:

• выявление и идентификация наблюдаемого процесса по данным наблюдения, получаемым от системы сенсоров;

• определение текущего состояния, а также хода наблюдаемого процесса в прошлом;

• прогнозирование развития наблюдаемого процесса в будущем и определение возможных негативных последствий для защищаемых критических АИТС и КИИ.

Только в результате успешного решения вышеперечисленных задач можно приступить к разработке стратегии упреждающего поведения, приводящей к снижению и предотвращению возможных рисков.

Наиболее сложно указанные задачи решаются при наблюдении целенаправленных

процессов, представляющих собой комплексы большого количества разнообразных мероприятий (операций, действий) и мер по обеспечению информационной безопасности с большим числом связей между ними. При этом входящие в комплексы мероприятия сами, в свою очередь, могут быть представлены в виде комплексов большого числа различных и взаимосвязанных между собой мероприятий (см. порядок иерархического представления информации о процессах в виде онтологии [16]). Такая декомпозиция комплексов может быть доведена до любого требуемого уровня детализации декомпозируемых комплексов. Комплексы, обладающие указанными выше свойствами, называют сложными [15].

Трудности решения задач обработки результатов наблюдения сложных комплексов обусловлены как природой самих комплексов, так и свойствами системы наблюдения, определяющими полноту и достоверность данных наблюдения, а также оперативность их получения и обработки.

Одним из способов обеспечения требуемого качества решения перечисленных выше задач обработки результатов наблюдений мероприятий, проводимых в рамках процессов управления информационной безопасностью в ходе информационно-технического конфликта, особенно при недостаточной полноте и достоверности информации, получаемой от распределенной системы сенсоров и содержащейся в результатах наблюдений, является использование структурных моделей, а именно сетевых моделей наблюдаемых комплексов.

Применение сетевых моделей при обработке результатов наблюдений сложных комплексов позволяет за счет учета структуры таких комплексов более полно извлекать содержащуюся в них информацию, отбраковывать недостоверные и выявлять наиболее информативные, а также определять те недостающие результаты наблюдений, которые могут нести информацию, необходимую в последующем для решения задач по построению спецификаций упреждающего поведения в ходе конфликта.

Очевидно, что наблюдаемый комплекс мероприятий потенциально может иметь различный состав включаемых мероприятий и связей между ними. Это означает, что данный комплекс обладает переменной структурой. Каждый возможный состав мероприятий, включенный в комплекс, а также связи между ними характеризуют конкретный вариант структуры комплекса, а точнее – конкретную возможную реализацию того или иного наблюдаемого процесса. Множество таких вариантов, известных гиромату [11] и представленных в его памяти в виде фрагментов онтологии [12], не более чем счетно. Если для каждого варианта структуры можно задать вероятность его осуществления, то такие структуры называют вероятностными [15], а комплексы, обладающие ими, – комплексами мероприятий с вероятностной структурой.

По нашему мнению, полезно рассмотреть комплексы мероприятий с вероятностной структурой более подробно, поскольку процессы, информация о которых хранится в базе знаний гиромата, представлены в онтологии в виде сетевых моделей, в которых две последовательно выполняемые операции соединены ребром «Следует за...» [16], а каждое ребро характеризуется пропускной способностью [17], которая, в свою очередь, напрямую связана с вероятностью (возможностью) перехода по нему от одного концепта, характеризующего конкретное мероприятие (действие), к другому.

Для каждого варианта структуры комплекса мероприятий с вероятностной структурой можно построить свою сетевую модель (сеть). Так как при этом любой вариант имеет детерминированную структуру, то сетевые модели вариантов комплекса с вероятностной структурой будут сетями с детерминированной структурой. Потому, хотя полная сетевая модель комплекса мероприятий с вероятностной структурой, включающая все варианты структуры комплекса, будет сетью с вероятностной структурой, при ее построении и анализе возможно использование способов построения и анализа детерминированных сетей в качестве

базовых элементов. Следует учесть, что сетевые модели не должны содержать детерминированные петли и контуры (детерминированный контур – это контур сетевой модели, включающий только неслучайные дуги).

Метод синтеза функциональных спецификаций возможных ситуаций и сценариев упреждающего поведения

Для решения задач, связанных с синтезом функциональных спецификаций возможных ситуаций и сценариев предотвращения компьютерных атак, использован метод обработки результатов наблюдений комплекса мероприятий с вероятностной структурой на основе сетевой модели наблюдаемого комплекса [15]. Сущность данного метода состоит в том, что с помощью сетевой модели сначала необходимо выявить осуществляемый вариант (сценарий) комплекса мероприятий по реализации атакующих воздействий на КИИ и АС КП, а затем для выявленного сценария определить состояние и ход осуществления комплекса, оценить временные параметры мероприятий, входящих в него, и сам комплекс в целом. При этом следует производить сопоставление мероприятий, выявленных непосредственно по данным наблюдения через систему сенсоров, с мероприятиями, включенными в сетевую модель и представленными в базе знаний киберсистемы. Если возникнет необходимость, то полученные данные либо модель требуется уточнить. Данные, противоречащие модели и не получившие подтверждения, не нужно рассматривать, но их следует занести в базу знаний. По расположению в сетевой модели мероприятий, выявленных по результатам наблюдений и прошедших проверку на непротиворечивость (подтвержденных опытным путем), можно судить об осуществляемом варианте комплекса, и для него далее можно получить искомые оценки параметров.

При рассмотрении различных мероприятий следует различать элементарные мероприятия и сложные операции.

Предположение об элементарности мероприятий, составляющих комплекс, означает, что проведение любого мероприятия, входящего в комплекс, а следовательно, и в сетевую модель, может быть выявлено непосредственно по результатам наблюдений, осуществляемых через систему сенсоров, функционирующих в гетерогенной сетевой инфраструктуре.

В общем случае для прогнозирования возможных негативных последствий для защищаемых АС КП и КИИ необходимо осуществить:

- выявление проводимых мероприятий по результатам наблюдений через систему сенсоров за процессами, протекающими в киберпространстве;
- проверку непротиворечивости выявленных мероприятий комплекса и его сетевой модели, представленной в базе знаний гиромата в виде соответствующего фрагмента онтологии;
- определение потенциально реализуемых вариантов наблюдаемого комплекса мероприятий и отбор тех из них, которые завершаются с негативными последствиями для защищаемого ресурса и/или самой киберсистемы;
- вычисление оценок сетевых параметров отобранных вариантов наблюдаемого комплекса мероприятий;
- определение текущего состояния и оценивание хода и возможных результатов выполнения наблюдаемого комплекса мероприятий.

После того, как установлены возможные негативные последствия от возможно реализуемых комплексов мероприятий, гиромат должен осуществить построение спецификаций комплексов мероприятий, которые могут нейтрализовать (снизить) возможные риски. При этом исходными данными уже будут являться:

- информация о уже проведенных мероприятиях;
- модели возможно реализуемых киберпротивником комплексов мероприятий, приводящих к негативным последствиям для КИИ;
- оценки темпа осуществления мероприятий, проводимых киберпротивником.

Учитывая указанную выше информацию, гиромат должен на основе знаний о потенциально реализуемых процессах указать перечень мероприятий (действий), способных изменить ход развития потенциально реализуемых негативных процессов. Также он должен представить перечень спецификаций, которые состоят из комплекса мероприятий, ранее наблюдаемого (через систему сенсоров) и далее потенциально реализуемого и приводящего к более приемлемым последствиям. Причем порожденная спецификация может быть не одна. Количество порожденных решений зависит от полноты базы знаний.

Заключение

Показано, что интеллектуальное упреждающее управление информационной безопасностью КИИ железнодорожного транспорта – это основное направление предотвращения ее рисков. В рамках данного подхода обоснована модель онтологического представления процессов и разработан метод синтеза функциональных спецификаций возможных ситуаций и сценариев упреждающего поведения перспективной интеллектуальной СУИБ железнодорожного транспорта.

Библиографический список

1. Ададуров С. Е. Информационная безопасность и защита информации на железнодорожном транспорте. Ч. 1. Методология и система обеспечения информационной безопасности на железнодорожном транспорте: учебник / С. Е. Ададуров, А. П. Глухов, А. А. Корниенко ; под ред. А. А. Корниенко. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. – 440 с.

2. СТО РЖД 1.18.002–2009. Управление информационной безопасностью. Общие положения. – М. : ОАО «РЖД», 2009. – 30 с.

3. Положение по оценке рисков информационной безопасности ОАО «РЖД». – М. : ОАО «РЖД», 2015. – 47 с.

4. Положение по управлению инцидентами информационной безопасности в ОАО «РЖД». – М. : ОАО «РЖД», 2014. – 33 с.

5. Корниенко А. А. Модели управления рисками и ресурсами автоматизированных систем критического применения железнодорожного транспорта с учетом экономического фактора / А. А. Корниенко, С. Е. Ададуров, А. П. Глухов, С. В. Диасамидзе, В. Н. Кустов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2017. – Т. 14, вып. 4. – С. 15–23.

6. Глухов А. П. Особенности обеспечения информационной безопасности информационной инфраструктуры железнодорожной транспортной системы / А. П. Глухов, С. Е. Ададуров, С. В. Диасамидзе, А. А. Корниенко, А. А. Сидак // Естественные и технические науки. – 2017. – № 11. – С. 258–267.

7. Глухов А. П. Модели и методы риск-ориентированного управления информационной безопасностью железнодорожной транспортной системы : автореф. дис. … докт. техн. наук : 05.13.19 / А. П. Глухов. – СПб. : ПГУПС, 2017. – 42 с.

8. Корниенко А. А. Концептуальная модель интеллектуальной системы риск-ориентированного упреждающего управления информационной безопасностью железнодорожного транспорта / А. А. Корниенко, А. П. Глухов, С. В. Диасамидзе, М. А. Поляничко, Д. Н. Бирюков // Естественные и технические науки. – 2017. – № 11. – С. 268–274.

9. Глухов А. П. Многомодельное представление знаний и модель интеллектуальной системы для задач ситуационного упреждающего управления информационной безопасностью / А. П. Глухов // Естественные и технические науки. – 2016. – № 6. – С. 194–202.

10. Бирюков Д. Н. Облик антиципирующих систем предотвращения рисков реализации киберугроз / Д. Н. Бирюков, А. Г. Ломако, Ю. Г. Ростовцев // Труды СПИИРАН. – 2015. – № 2 (39). – С. 5–25.

11. Бирюков Д. Н. Абдуктивный синтез структур функциональных типов сценариев для установления аналогий в многомодельной концептуально-онтологической системе знаний / Д. Н. Бирюков, А. Г. Ломако, Т. Р. Сабиров // Труды СПИИРАН. – 2017. – № 4 (53). – С. 140–159.

12. Бирюков Д. Н. Порождение сценариев предупреждения компьютерных атак / Д. Н. Бирюков,

А. Г. Ломако, С. А. Петренко // Информ.-метод. журн. «Защита информации. Инсайд». – 2017. – № 4 (76). – С. 70–78.

13. Бирюков Д. Н. Модель упреждающего поведения в условиях компьютерных атак на основе антиципации / Д. Н. Бирюков, А. Г. Ломако, С. А. Петренко, Д. Д. Ступин // Труды IV Всерос. науч.-технич. конференции «РТИ Системы ВКО–2016». – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – С. 758–768.

14. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27005–2010. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент риска информационной безопасности. – М. : Стандартинформ, 2011. – 51 с.

15. Юсупов Р. М. Научно-методологические основы информатизации / Р. М. Юсупов, В. П. Заболотский. – СПб. : Наука, 2000. – 455 с.

16. Бирюков Д. Н. Пополнение онтологических систем знаний на основе моделирования умозаключений с учетом семантики ролей / Д. Н. Бирюков, А. Г. Ломако, Р. Б. Жолус // Труды СПИИРАН. – 2016. – № 4 (47). – С. 105–129.

17. Бирюков Д. Н. Модель изменения доступности знаний, представленных в памяти киберсистемы, обеспечивающей нейтрализацию деструктивных воздействий на объекты критической информационной инфраструктуры / Д. Н. Бирюков, Т. Р. Сабиров, С. В. Пилькевич, А. П. Глухов // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. – 2016. – Т. 8, вып. 4. – С. 56–63.

References

1. Adadurov S. E., Glukhov A. P. & Kornienko A. A. *Informatsionnaya bezopasnost i zashchita informatsii na zheleznodorozhnom transporte. Ch. 1. Metodologiya i sistema obespecheniya informatsionnoi bezopasnosti na zheleznodorozhnom transporte.* Pod red. A. A. Kornienko [*Information security and data protection in railway transport. Pt 1. Methodology and system of information safety assurance in railway transport*]. Ed. by A. A. Kornienko. Moscow, Educational-methodical center in education at railway transport Publ., 2014, 440 p. (In Russian)

2. *STO "RZhD" 1.18.002–2009. Upravlenie informatsionnoi bezopasnostyu. Obshchie polozheniy* [*Information security management. General provisions*]. Moscow, OJSC "RZhD" Publ., 2009, 30 p. (In Russian)

3. *Polozhenie po otsenke riskov informatsionnoy bezopasnosti OAO "RZHD"* [*Provision of information security risk evaluation of OJSC "RZhD"*]. Moscow, OJSC "RZhD" Publ., 2015, 47 p. (In Russian).

4. P*olozhenie po upravleniyu intsidentami informatsionnoy bezopasnosti v OAO "RZhD"* [*Provision of information security incident management in OJSC "RZhD"*]. Moscow, OJSC "RZhD" Publ., 2014, 33 p. (In Russian)

5. Kornienko A. A., Adadurov S. E., Glukhov A. P., Diasamidze S. V., & Kustov V. N. Modeli upravleniya riskami i resursami avtomatizirovannykh sistem kriticheskogo primeneniya zheleznodorozhnogo transporta s uchetom ekonomicheskogo faktora [Risk and resource management models of automated systems for critical application in railway transport with regard to economic factor]. *Bulletin of PGUPS*, 2017, vol. 14, issue 4, pp. 15–23. (In Russian)

6. Glukhov A. P., Adadurov S. E., Diasamidze S. V., Kornienko A. A. & Sidak A. A. Osobennosti obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti informatsionnoy infrastruktury zheleznodorozhnoi transportnoy sistemy [Features of infrastructure information security assurance of railway transport system]. *Natural and technical sciences*, 2017, no. 11, pp. 258–267. (In Russian)

7. Glukhov A. P. *Modeli i metody risk-orientirovannogo upravleniya informatsionnoy bezopasnostyu zheleznodorozhnoi transportnoi sistemy.* Avtoref. dis. … dokt. tekhn. nauk [*Models and methods of risk-oriented information security management of railway transport system*]. Author's abstract of D. Eng. Sci. Thesis. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2017, 42 p. (In Russian)

8. Kornienko A. A., Glukhov A. P., Diasamidze S. V., Polyanichko M. A. & Biryukov D. N. Kontseptualaya model intellektualnoi sistemy risk-orientirovannogo uprezhdayushchego upravleniya informatsionnoy bezopasnostyu zheleznodorozhnogo transporta [A conceptual model of intellectual system of risk-oriented anticipatory management of railway transport information security]. *Natural and technical sciences*, 2017, no. 11, pp. 268–274. (In Russian)

9. Glukhov A. P. Mnogomodelnoe predstavlenie znaniy i model intellektualnoi sistemy dlya zadach

situatsionnogo uprezhdayushchego upravleniya informatsionnoy bezopasnostyu [Many-model knowledge representation and a model of intellectual system for situational anticipatory management problems of information security]. *Natural and technical sciences*, 2016, no. 6, pp. 194–202. (In Russian)

10. Biryukov D. N., Lomako A. G. & Rostovtsev Yu. G. Oblik antitsipiruyushchikh sistem predotvrashcheniya riskov realizatsii kiberugroz [Appearance of anticipatory risk prevention systems of cyber threat implementation]. *Transactions of SPIIRAN*, 2015, no. 2 (39), pp. 5–25. (In Russian)

11. Biryukov D. N., Lomako A. G. & Sabirov T. R. Abduktivnyi sintez struktur funktsiona'nykh tipov stsenariev dlya ustanovleniya analogiy v mnogomodelnoy kontseptualno-ontologicheskoy sisteme znaniy [Abductive synthesis of functional scenario type structures for establishing analogies in many-model conceptual-ontological knowledge system]. *Transactions of SPIIRAN*, 2017, no. 4 (53), pp. 140–159. (In Russian)

12. Biryukov D. N., Lomako A. G. & Petrenko S. A. Porozhdenie stsenariev preduprezhdeniya kompyuternykh atak [Generating scenarios of computer attack prevention]. *Information-methodical journal "Information security. Inside"*, 2017, no. 4 (76), pp. 7–78. (In Russian)

13. Biryukov D. N., Lomako A. G., Petrenko S. A. & Stupin D. D. Model uprezhdayushchego povedeniya v usloviyakh kompyuternykh atak na osnove antitsipatsii [Anticipatory behavior model in conditions of computer-based attacks in anticipation]. *Proceedings of the IVth All-Russian scientific-technical conference "RTI System EKO–2016"*. Moscow, Bauman N. E. MGTU Publ., 2017, pp. 758–768. (In Russian)

14. GOST R ISO/MEK 27005–2010. Informatsionnaya tekhnologiya. Metody i sredstva obespecheniya bezopasnosti. Menedzhment riska informatsionnoi bezopasnosti [*State Standard Specification R ISO/MEK 27005–2010. Information technology. Methods and facilities of ensuring security. Information security risk management*]. Moscow, StandardInform Publ., 2011, 51 p. (In Russian)

15. Yusupov R. M. & Zabolotskiy V. P. *Nauchno-metodologicheskie osnovy informatizatsii* [*Scientific-methodological bases of informatisation*]. Saint Petersburg, Science Publ., 2000, 455 p. (In Russian)

16. Biryukov D. N., Lomako A. G. & Zholus R. B. Popolnenie ontologicheskikh sistem znaniy na osnove modelirovaniya umozaklyuchenii s uchetom semantiki roley [Completion of ontological knowledge systems based on modelling deductionswith regard to role semantics]. *Transactions of SPIIRAN*, 2016, no. 4 (47), pp. 105–129. (In Russian)

17. Biryukov D. N., Sabirov T. R., Pilkevich S. V. & Glukhov A. P. Model izmeneniya dostupnosti znaniy, predstavlennykh v pamyati kibersistemy, obespechivayushchey neytralizatsiyu destruktivnykh vozdeystviy na obekty kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury [Model of changing knowledge availability presented in memory of cybersystem providing neutralisation of destructive impact on critical information infrastructure objects]. *High tech in space studies of the Earth*, 2016, vol. 8, issue 4, pp. 56–63. (In Russian)

КОРНИЕНКО Анатолий Адамович – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, kaa.pgups@ya.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); БИРЮКОВ Денис Николаевич – доктор техн. наук, начальник кафедры, Biryukov.D.N@yandex.ru (Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского); ГЛУХАРЕВ Михаил Леонидович – канд. техн. наук, доцент, mlgluharev@yandex.ru; ГЛУХОВ Александр Петрович – канд. техн. наук, доцент, gluhovap@gvc.rzd.ru; *ДИАСАМИДЗЕ Светлана Владимировна – канд. техн. наук, доцент, sv.diass99@ya.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 621.391.28

А. А. Привалов, Ю. С. Карабанов, А. О. Кравцов, С. И. Сидоров

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ XSS–АТАКИ

Дата поступления: 06.09.2017
Решение о публикации: 15.11.2017

Аннотация

Цель: Проведение моделирования компьютерной атаки на элементы инфо-телекоммуникационной системы. **Методы:** Топологическое преобразование стохастических сетей. В настоящее время происходит активное внедрение унифицированных элементов в исходный код сайтов с целью упрощения и ускорения работы Web-приложений. **Результаты:** Из-за массовости данного способа интеграции данных между сайтами, а также наличия в нем достаточно большого числа уязвимостей благодаря POST-GET запросам, возник особый тип атак, позволяющий получить несанкционированный доступ к ресурсам пользователей. Абонентами инфо-телекоммуникационной системы являются автоматизированные рабочие места должностных лиц, осуществляющих разработку сайтов с использованием Cross-Site-Scripting (CSS). ИТКС функционирует в условиях реализации нарушителем компьютерных атак. **Практическая значимость:** Сформирована математическая модель процесса проведения XSS-атаки, позволяющая выявить объекты сети, включая пользователей, наиболее подверженные атаке злоумышленника.

Ключевые слова: XSS, CSS-технологии, стохастическая сеть, компьютерная атака, математическая модель, неполная гамма-функция.

Andrei A. Privalov, D. Milit. Sci., professor, aprivalov@inbox.ru; *** Yurii S. Karabanov**, postgraduate student, karabanov1994@yandex.ru; **Anton O. Kravtsov**, postgraduate student, kravcovanton@mail.ru (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University); **Sergei I. Sidorov**, postgraduate student, 4idisa@gmail.com (National research nuclear University “NRSI”). MATHEMATICAL MODEL OF XSS ATTACKS

Summary

Objective: Performing modeling computer attack on elements of info-telecommunication system. **Methods:** Topological transformation of stochastic networks. At present active introduction of unified elements into an initial website code in order to simplify and increase the work of Web-applications takes place. **Results:** Because of large-scale involvement of the given mode of data integration between sites, as well as the presence of a sufficiently large number of vulnerabilities due to POST-GET inquiries there appeared a special type of attack allowing to get unauthorized access to user’s resources. Subscribers of info-telecommunication systems are automated workplaces of officials developing websites with the use of Cross-Site-Scripting (CSS). ITKS operates in conditions of realizing computer attack by a violator. **Practical importance:** The mathematical model of XSS attack process allowing to identify network objects, including users most prone to violator attack is formed.

Keywords: XSS, CSS-technologies, stochastic network, computer attack, mathematical model, incomplete gamma-function.

Введение

В настоящее время происходит активное внедрение унифицированных элементов в исходный код сайтов с целью упрощения и ускорения работы Web-приложений. Для организации взаимодействия между сайтами было решено организовать кроссайтовую передачу данных (данные погоды, торгов, текст чата). Причем объединение этих данных происходит на стороне клиента. Такой процесс и был назван Cross-Site Scripting (CSS) [1]. Он может увеличить доступность документа, предоставить бóльшую гибкость и возможность управления его представлением, а также уменьшить сложность и повторяемость в структурном содержимом.

Однако из-за массовости CSS, а также наличия в нем достаточно большого числа уязвимостей, благодаря POST-GET запросам, возник особый тип атак, позволяющий получить несанкционированный доступ к ресурсам пользователей.

Атака на CSS называется так же, как и ее объект, но чтобы избежать путаницы, была введена новая аббревиатура, XSS, которая расшифровывается, как и CSS. XSS представляют собой не атаки на сам сайт, а на пользовательские его приложения. XSS предполагает наличие некоторой недоработки в фильтре или Web-приложении. Например, опасность XSS-атаки существует в тегах из-за недостаточной фильтрации, когда пользователем оставляется сообщение на форуме или чате, который будет всегда активен при каждом обновлении.

Атаки данного типа делятся на два основных типа: пассивные и активные. Наибольший интерес представляют активные атаки, так как пассивные блокируются практически всеми современными антивирусами и файерволами. XSS-атаки не требуют никаких дополнительных действий со стороны жертвы. Достаточно лишь открыть страницу с XSS и Java-код выполнится автоматически.

Высокая опасность XSS-атак актуализирует задачу количественной оценки уязвимости автоматизированных рабочих мест (АРМ) пользователей, осуществляющих верстку (редактирование) сайтов с использованием языка разметки, CSS.

Постановка задачи

Пусть имеется инфо-телекоммуникационная система (ИТКС) [2], абонентами которой являются АРМ должностных лиц, осуществляющих разработку сайтов с применением CSS. Указанная ИТКС функционирует в условиях реализации нарушителем компьютерных атак [3].

Положим, что для успешной реализации компьютерных атак нарушитель применяет сканирование ИТКС и нахождение Web-сервера за некоторое время $t_{скан}$ с функцией распределения $W(t)$.

Затем нарушителем производится поиск полей, обеспечивающих прием входных данных от пользователя за случайное время $t_{пр}$ с функцией распределения $B(t)$. С вероятностью $P_{пр}$ такое поле находится. В противном случае повторяется процесс сканирования Web-сервера.

За случайное время $t_{нв}$ с функцией распределения $V(t)$ и вероятностью $P_{нв} = \frac{n}{N}$ (где N – множество запросов, n – запросы, приводящие к уязвимости) определяется вектор атаки. В случае отсутствия параметров, приводящих к возможности осуществления XSS-атак, производится переход к другому процессу, обеспечивающему прием входных данных на Web-сервере.

С вероятностью P_s найденный вектор позволяет злоумышленнику реализовать stored XSS-атаку за время t_{stx} с функцией распределения $C(s)$, в ходе которой вредоносный код внедряется на атакуемый Web-сервер.

Пользователь переходит на страницу с вредоносным кодом с вероятностью P_w, в ходе чего вредоносный код выполняется в браузере пользователя в контексте атакуемого Web-сервера с вероятностью P_e.

С вероятностью P_{rfx} за время t_{rfx} с функцией распределения $R(s)$ найденный вектор позволяет реализовать reflected XSS-атаку, с вероятностью P_{db} за время t_{db} с функцией распределения $D(s)$ – DOM-based атаку. В ходе данных атак вредоносный код внедряется в POST или GET запрос на атакуемый Web-сервер.

С вероятностью $P_у$ произойдет успешная попытка убеждения пользователя обратиться по ссылке с внедренным вредоносным кодом или по ссылке, ведущей на ресурс, перенаправляющий пользователя на атакуемый Web-сервер с внедрением уязвимого кода для выполнения вредоносного кода в браузере пользователя в контексте атакуемого Web-сервера с вероятностью $P_в$ за время $t_в$ с функциями распределения $K(s)$, $M(s)$, $N(s)$ для каждой из атак соответственно.

Требуется определить функцию распределения и среднее время, затрачиваемое нарушителем для успешной реализации XSS-атаки [4].

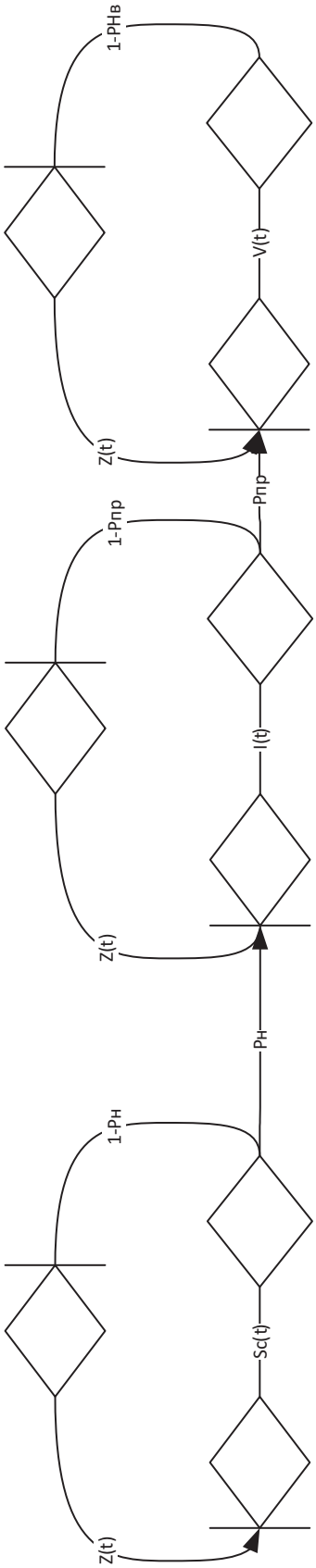


Рис. 1. Левая часть стохастической сети, соответствующая этапу подготовки нарушителя к XSS-атаке

Решение

Для решения поставленной задачи будем использовать метод топологического преобразования стохастических сетей [5], для чего представим процесс компьютерной атаки в виде сети. Она является достаточно сложной. Поэтому целью упрощения решения рассмотрим левую (рис. 1) и правую части стохастической сети отдельно.

Используя уравнения Мейсона [6] для замкнутых цепей, определим эквивалентную функцию стохастической сети, с учетом возможности ее аппроксимации изображением по Лапласу неполной гамма-функции [7], для уменьшения громоздкости математических выражений. В результате получим

$$h_{11}(s)=\frac{P_1 w(z+s)}{s^2+s(z+b)+sbP_1}\approx\left(\frac{\mu_{11}}{\mu_{11}+s}\right)^{\alpha_{11}},$$

$$h_{12}(s)=\frac{P_2 b(z+s)}{s^2+s(z+b)+sbP_2}\approx\left(\frac{\mu_{12}}{\mu_{12}+s}\right)^{\alpha_{12}},$$

$$h_{13}(s)=\frac{P_3 v(z+s)}{s^2+sv+svP_3}\approx\left(\frac{\mu_{13}}{\mu_{13}+s}\right)^{\alpha_{13}},$$

$$h_1(s)=\left(\frac{\mu_{11}}{\mu_{11}+s}\right)^{\alpha_{11}}\left(\frac{\mu_{12}}{\mu_{12}+s}\right)^{\alpha_{12}}\times$$
$$\times\left(\frac{\mu_{13}}{\mu_{13}+s}\right)^{\alpha_{13}}=\left(\frac{\mu_1}{\mu_1+s}\right)^{\alpha_1}, \quad (1)$$

где $w=\frac{1}{T_w}$; $z=\frac{1}{T_z}$; $b=\frac{1}{T_b}$; $v=\frac{1}{T_v}$; T_w, T_z, T_b, T_v – среднее время реализации сканирования ИТКС, повторного выполнения сканирования, поиска полей и определения вектора атаки соответственно;

$$\mu_{11}=T_{11}/D_{11};\ \mu_{12}=\frac{T_{12}}{D_{12}};\ \mu_{13}=T_{13}/D_{13};$$

$$\mu_1=(T_{11}+T_{12}+T_{13})/(D_{11}+D_{12}+D_{13});$$

$$\alpha_{11}={T_{11}}^2/D_{11};\ \alpha_{12}=\frac{{T_{12}}^2}{D_{12}};\ \alpha_{13}={T_{13}}^2/D_{13};$$

$$\alpha_1=\frac{(T_{11}+T_{12}+T_{13})^2}{(D_{11}+D_{12}+D_{13})};$$

$$T_{11}=-\frac{d}{ds}\left[\frac{P_1 w(z+s)}{s^2+s(z+w)+swP_1}\right]_{s=0},$$

$$D_{11}=\frac{d^2}{ds^2}\left[\frac{P_2 w(z+s)}{s^2+s(z+w)+swP_2}\right]_{s=0}-T_{11}^2-$$

среднее и дисперсия времени успешной реализации этапа сканирования ИТКС;

$$T_{12}=-\frac{d}{ds}\left[\frac{P_2 b(z+s)}{s^2+s(z+b)+sbP_2}\right]_{s=0},$$

$$D_{12}=\frac{d^2}{ds^2}\left[\frac{P_2 b(z+s)}{s^2+s(z+b)+sbP_2}\right]_{s=0}-T_{12}^2-$$

среднее и дисперсия времени успешной реализации этапа поиска полей;

$$T_{13}=-\frac{d}{ds}\left[\frac{P_3 v(z+s)}{s^2+s(z+v)+svP_3}\right]_{s=0},$$

$$D_{13}=\frac{d^2}{ds^2}\left[\frac{P_3 v(z+s)}{s^2+s(z+v)+svP_3}\right]_{s=0}-T_{13}^2-$$

среднее и дисперсия времени успешной реализации этапа определения вектора атаки.

Оригиналом [8] эквивалентной функции (1) является неполная гамма-функция с параметрами формы α_1 и масштаба μ_1, интегрирование которой с переменным верхним пределом позволяет определить функцию распределения времени успешной подготовки нарушителя к XSS-атаке, т. е.

$$F_1(t)=\int_0^t\frac{\mu_1^{\alpha}}{\Gamma(\alpha_1)}t^{\alpha_1-1}e^{-\mu_1 t}dt, \quad (2)$$

здесь Г (*) – гамма-функция [8].

Так как неполная гамма-функция встроена в большинство математических пакетов прикладных программ, то в дальнейших расчетах формула (2) будет представлена следующим образом:

$$F_1(t)=\mathrm{pgamma}(\mu_1 t,\alpha_1).$$

Соответственно среднее время успешной реализации этапа подготовки к XSS-атаки равно

$$T_1=(T_{11}+T_{12}+T_{13})=\frac{z+(1-P_1)w}{wzP_1}+$$
$$+\frac{z+(1-P_1)b}{bzP_1}+\frac{z+(1-P_1)v}{vzP_1}.$$

Вид функции распределения времени успешной подготовки нарушителя к XSS-атаке показан на рис. 2.

Аналогичным образом опишем правую половину стохастической сети, отображающую процесс реализации самой XSS-атаки (рис. 3).

Рассматриваемая часть стохастической сети состоит из трех параллельных ветвей, поэтому

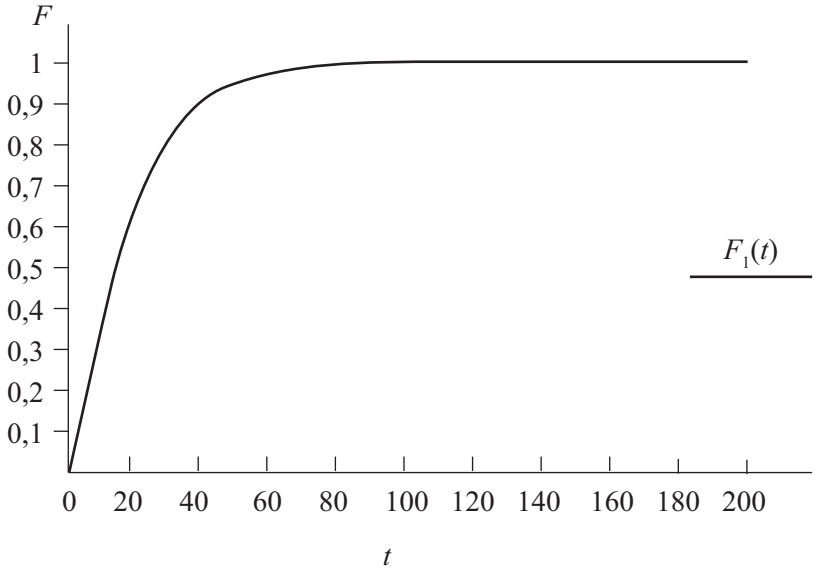


Рис. 2. Функция распределения времени подготовки к проведению XSS-атаки

определим эквивалентные функции каждой ветви, среднее время и дисперсию времени их реализации и аппроксимируем частные эквивалентные функции изображениями неполной гамма-функции:

$$T_{21} = \frac{\begin{matrix} k^2 z^2 P_u c + c^2 k^2 P_u + \\ + c^2 z^2 P_u^2 k - c^2 k^2 P_u^2 z \end{matrix}}{c^2 k^2 z^2 P_u^2} - \quad (3)$$

среднее время реализации stored XSS-атаки [9],– $k = \frac{1}{t_в}$, $z = \frac{1}{t_{повт}}$, $c = \frac{1}{t_{stx}}$;

$$T_{22} = \frac{\begin{matrix} m^2 z^2 P_u r + r^2 m^2 P_u + \\ + r^2 z^2 P_u^2 m - r^2 m^2 P_u^2 z \end{matrix}}{r^2 m^2 z^2 P_u^2} -$$

среднее время реализации reflected XSS-атаки [9], – $m = \frac{1}{t_в}$, $z = \frac{1}{t_{повт}}$, $r = \frac{1}{t_{rfx}}$;

$$T_{23} = \frac{\begin{matrix} n^2 z^2 P_u d + d^2 n^2 P_u + \\ + d^2 z^2 P_u^2 n - d^2 n^2 P_u^2 z \end{matrix}}{d^2 n^2 z^2 P_u^2} - \quad (4)$$

среднее время реализации DOM-based атаки [9], – $n = \frac{1}{t_в}$, $z = \frac{1}{t_{повт}}$, $k = \frac{1}{t_{db}}$.

Для нахождения дисперсии времени реализации указанных выше частных процессов определим их вторые начальные моменты:

$$M_{21} = \frac{\begin{matrix} k^2 \begin{pmatrix} 2c^2 - 2c^2 P_u + \\ + 2z^2 + c4z - c4P_u z \end{pmatrix} + \\ + k\left(2c^2 P_u z - 2c^2 P_u^2 z + 2z^2 P_u c\right) + \\ + 2c^2 z^2 P_u^2 \end{matrix}}{c^2 k^2 z^2 P_u^2}, \quad (5)$$

где $k = \frac{1}{t_в}$, $z = \frac{1}{t_{повт}}$, $c = \frac{1}{t_{stx}}$;

$$M_{22} = \frac{\begin{matrix} m^2\left(2r^2 - 2r^2 P_u + 2z^2 + r4z - r4P_u z\right) + \\ + m\left(2r^2 P_u z - 2r^2 P_u^2 z + 2z^2 P_u r\right) + 2r^2 z^2 P_u^2 \end{matrix}}{r^2 m^2 z^2 P_u^2},$$

где $m = \frac{1}{t_в}$, $z = \frac{1}{t_{повт}}$, $r = \frac{1}{t_{rfx}}$;

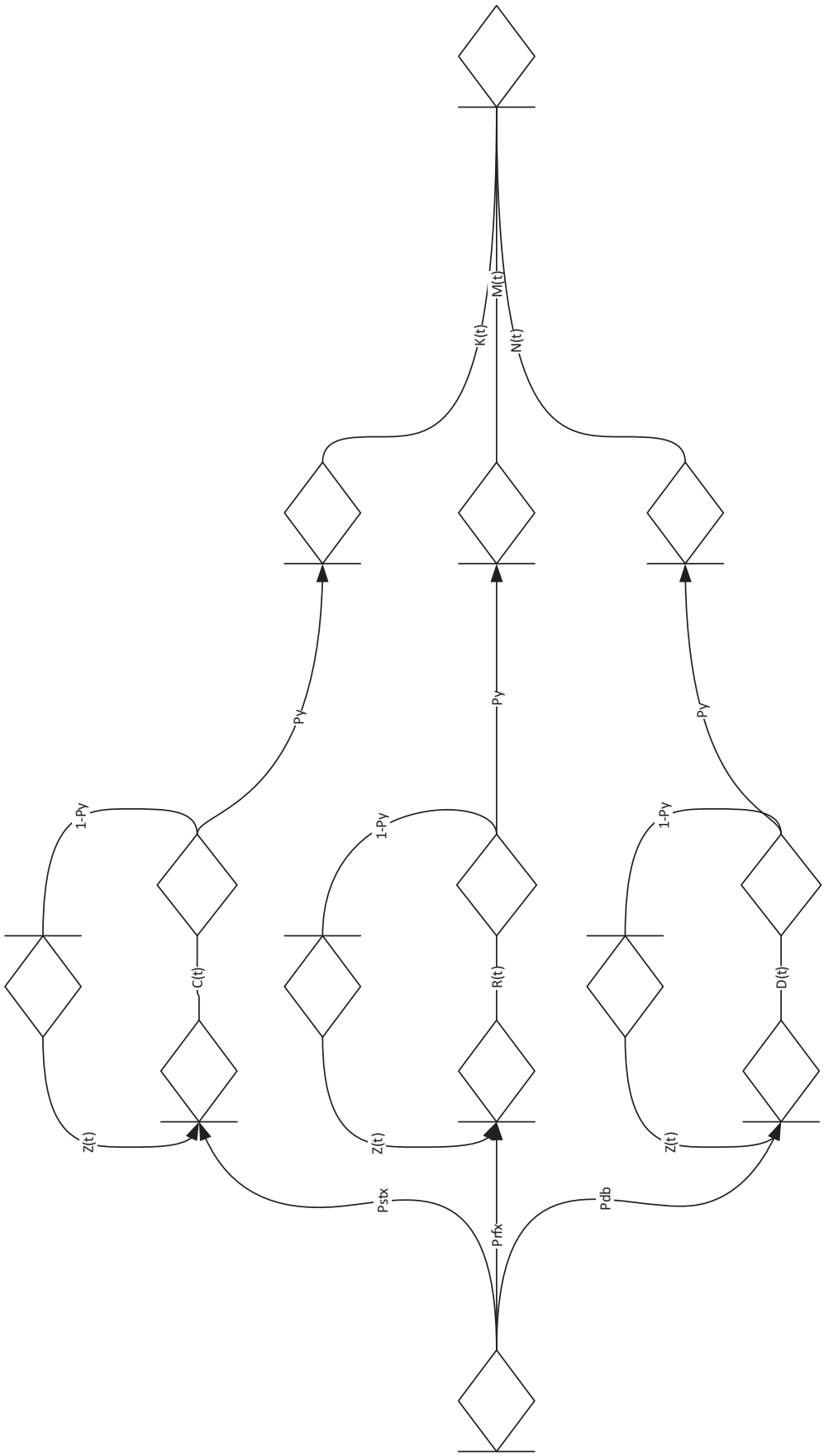


Рис. 3. Правая часть стохастической сети, соответствующая реализации нарушителем непосредственно XSS-атаки

$$M_{23} = \frac{n^2\left(2d^2 - 2d^2P_u + 2z^2 + d4z - d4P_uz\right) + n\left(2d^2P_uz - 2d^2P_u^2z + 2z^2P_ud\right) + 2d^2z^2P_u^2}{d^2n^2z^2P_u^2},$$

где $n = \frac{1}{t_в}$, $z = \frac{1}{t_{повт}}$, $k = \frac{1}{t_{db}}$.

Дисперсия времени реализации каждой из параллельных ветвей определяется как разница между первым моментом и квадратом среднего времени:

$$D_{21} = M_{21} - T_{21}{}^2, \quad (6)$$

$$D_{22} = M_{22} - T_{22}^2, \quad (7)$$

$$D_{23} = M_{23} - T_{23}^2. \quad (8)$$

Нахождение среднего времени реализации и дисперсии для каждой из параллельных ветвей стохастической сети (рис. 3) подстановкой (3)–(5) и (6)–(8) позволяет определить параметры формы и масштаба:

$$\alpha_{21} = \frac{T_{21}^2}{D_{21}},\ \alpha_{22} = \frac{T_{22}^2}{D_{22}},\ \alpha_{23} = \frac{T_{23}^2}{D_{23}},$$

$$\mu_{21} = \frac{T_{21}}{D_{21}},\ \mu_{22} = \frac{T_{22}}{D_{22}},\ \mu_{23} = \frac{T_{23}}{D_{23}}.$$

Это позволяет найти функции распределения времени реализации каждой из ветвей:

$$F_{21}(t) = \text{pgamma}(\mu_{21}t, \alpha_{21});$$

$$F_{22}(t) = \text{pgamma}(\mu_{22}t, \alpha_{22});$$

$$F_{23}(t) = \text{pgamma}(\mu_{23}t, \alpha_{23}).$$

Тогда функцию распределения времени успешной реализации нарушителем непосредственно XSS-атаки можно представить как

$$F_2(t) = P_sF_{21}(t) + P_rF_{22}(t) + P_dF_{23}(t). \quad (9)$$

Соответственно среднее время реализации данного процесса равно

$$T_1 = (T_{21} + T_{22} + T_{23}).$$

Вид функции распределения (9) показан на рис. 4.

Для получения функции распределения [10] всего процесса реализации XSS-атаки, включая этап подготовки (рис. 5), необходимо найти обобщенные параметры формы и масштаба α и μ, которые определяются как отношение

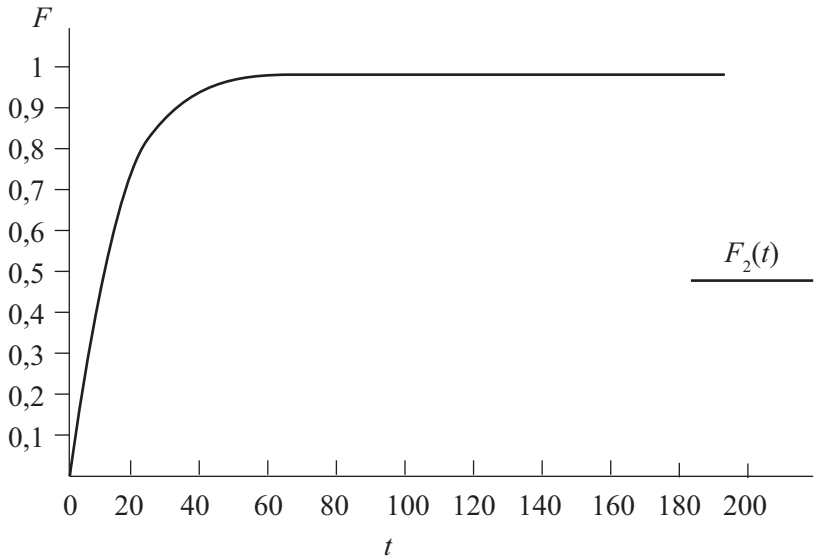


Рис. 4. Функция распределения времени успешной реализации непосредственно XSS-атаки

суммы средних времен правой и левой частей к сумме их дисперсий и отношение квадрата суммы средних времен правой и левой частей к сумме их дисперсий соответственно:

$$\alpha_{1S} = \frac{\left(T_{11}+T_{12}+T_{13}+T_{21}\right)^2}{D_{11}+D_{12}+D_{13}+D_{21}},$$

$$\mu_{1S} = \frac{T_{11}+T_{12}+T_{13}+T_{21}}{D_{11}+D_{12}+D_{13}+D_{21}},$$

$$\alpha_{2S} = \frac{\left(T_{11}+T_{12}+T_{13}+T_{22}\right)^2}{D_{11}+D_{12}+D_{13}+D_{22}},$$

$$\mu_{2S} = \frac{T_{11}+T_{12}+T_{13}+T_{22}}{D_{11}+D_{12}+D_{13}+D_{22}},$$

$$\alpha_{3S} = \frac{\left(T_{11}+T_{12}+T_{13}+T_{23}\right)^2}{D_{11}+D_{12}+D_{13}+D_{23}},$$

$$\mu_{3S} = \frac{T_{11}+T_{12}+T_{13}+T_{23}}{D_{11}+D_{12}+D_{13}+D_{23}}.$$

Отсюда суперпозиция функций распределения времени успешной реализации каждого из вариантов осуществления атаки:

$$F_{1S}(t) = \mathrm{pgamma}\left(\mu_{1S}t, \alpha_{1S}\right),$$

$$F_{2S}(t) = \mathrm{pgamma}\left(\mu_{2S}t, \alpha_{2S}\right),$$

$$F_{3S}(t) = \mathrm{pgamma}\left(\mu_{3S}t, \alpha_{3S}\right),$$

представляет собой искомую функцию распределения времени успешной реализации XSS-атаки:

$$F(t) = P_s F_{1S}(t) + P_r F_{2S}(t) + P_d F_{3S}(t).$$

Вид в зависимости от времени проведения каждого из трех типов атак показан на рис. 5.

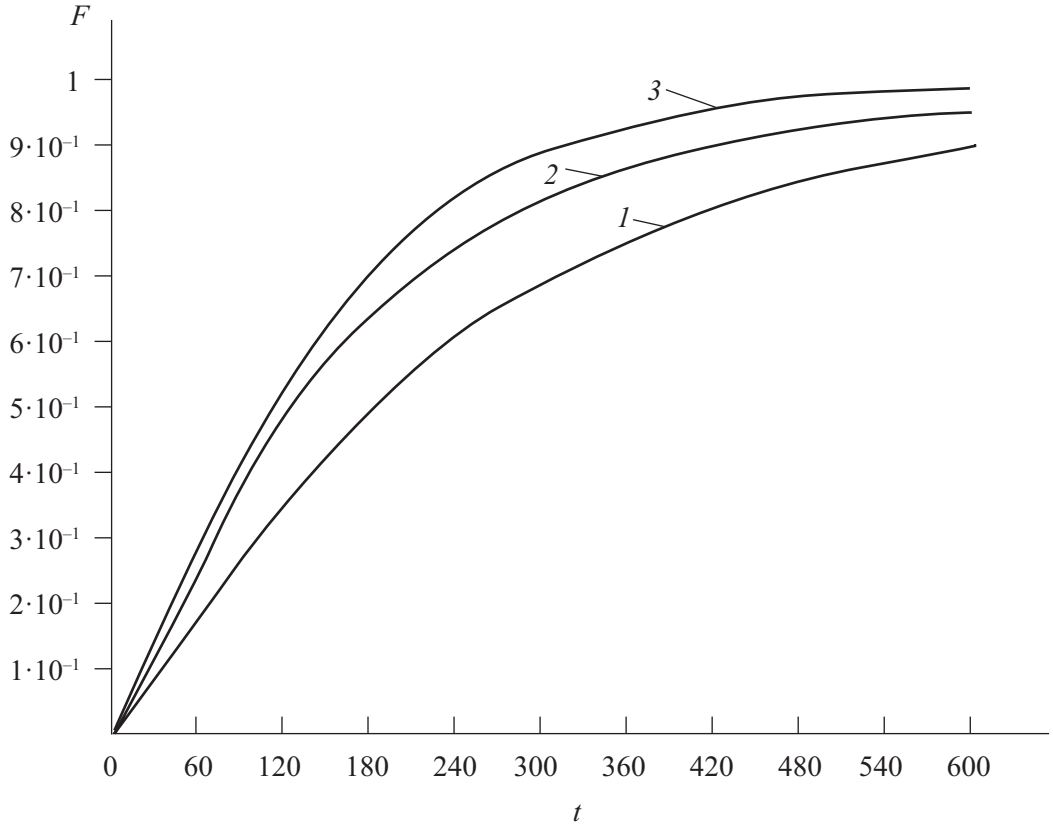


Рис. 5. Функция распределения времени проведения XSS-атаки (включая этап подготовки) для разных диапазонов времени выполнения каждого этапа: *1* – F_1, *2* – F_2, *3* – F_3

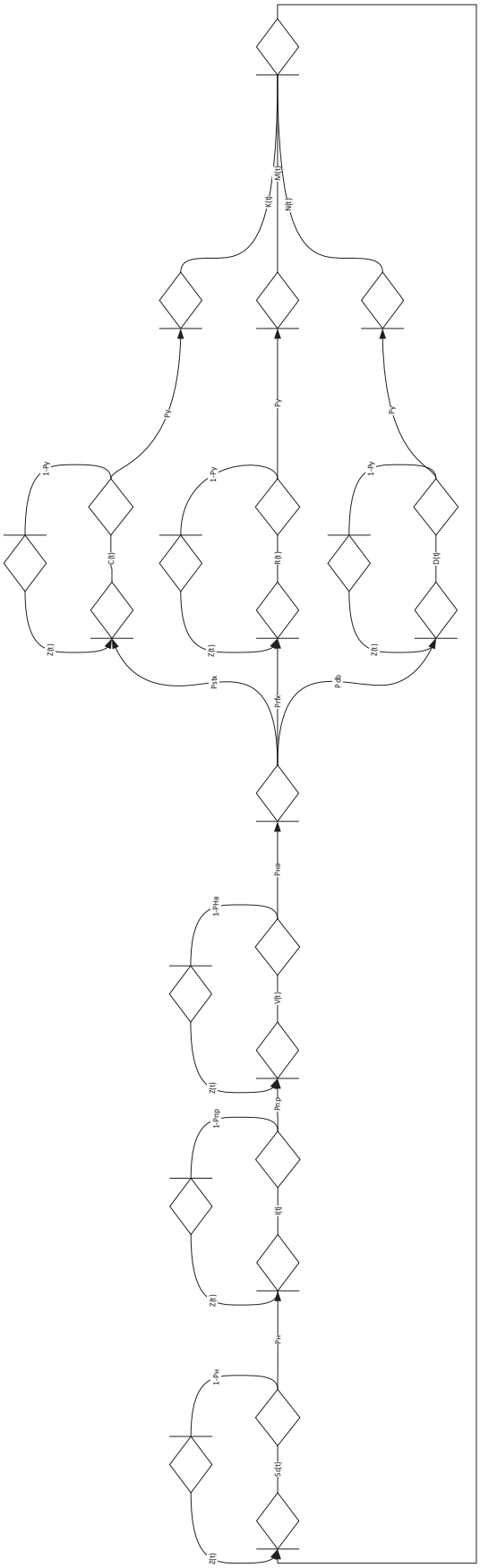


Рис. 6. Стохастическая сеть, соответствующая процессу подготовки реализации нарушителем XSS-атаки

При проведении расчетов полагалось [11], что время сканирования $t_{скан}$ = 20 мин, время приема $t_{пр}$ = 3 мин, время нахождения вектора $t_{нв}$ = 2 мин, время подготовки stored XSS-атаки t_{stx} = 8 мин, время подготовки dombased XSS-атаки t_{db} = 6 мин, время подготовки reflected XSS-атаки t_{rfx} = 7 мин, время выполнения каждого вида атак $t_{в}$ = 4 мин. Для каждого из процессов также определены вероятности: вероятность сканирования $P_{скан}$ = 0,2, вероятность приема $P_{пр}$ = 0,5, вероятность нахождения вектора $P_{нв}$ = 0,7, вероятность подготовки stored XSS-атаки P_{stx} = 0,33, вероятность подготовки dombased XSS-атаки P_{db} = 0,33, вероятность подготовки reflected XSS-атаки P_{rfx} = = 0,33, вероятность убеждения пользователя запуска вредоносного кода $P_{у}$ = 0,1. Для отображения зависимостей функций распределения от времени был взят диапазон времени от 0 до 600 мин [12].

Проведенный нами анализ результатов моделирования (рис. 6) показал, что ключевым моментом, влияющим на время реализации рассматриваемого вида атак, является этап проведения самой атаки в одном из трех направлений (stored, dombased или reflected). Однако стоит отметить, что, несмотря на очевидную зависимость времени проведения комплекса мероприятий по получению несанкционированного доступа к файлам объекта атаки, наибольшее влияние оказывают другие два этапа – сканирование телекоммуникационной сети и нахождение вектора атаки. Это позволяет утверждать, что одним из основных направлений защиты [13] является противодействие компьютерной разведке нарушителя, что обеспечит нарушение целевого характера [14] реализуемой им атаки.

Заключение

В статье предложена математическая модель процесса проведения XSS-атаки, позволяющая выявить объекты сети, включая пользователей, наиболее подверженные атаке злоумышленника. В общем случае эта модель может быть использована и для анализа защищенности любых IP-сетей при условии корректировки исходных данных, характеризующих анализируемую сеть [15].

Кроме того, при наличии требований к передаче сообщений со стороны АСУ перевозочным процессом полученные в ходе моделирования результаты позволяют оценить требуемое время, необходимое для восстановления сети после атаки злоумышленника [16].

Библиографический список

1. Вся правда об XSS или Почему межсайтовое выполнение сценариев не является уязвимостью. Positive Technologies. – URL : https://habrahabr.ru (дата обращения : 10.10.2017).

2. Будников С. А. Модели информационного конфликта средств поиска и обнаружения / С. А. Будников, А. И. Гревцев, А. В. Иванцов, В. М. Кильдюшевский, А. Ю. Козирацкий, Ю. Л. Козирацкий, С. С. Кущев, В. Ф. Лысиков, М. Л. Паринов, Д. В. Прохоров. – М. : Радиотехника, 2013. – 231 с.

3. Компьютерные атаки: кто нужен преступникам? KasperskyLab. – URL : http://www.kaspersky.ru (дата обращения : 10.10.2017).

4. Корниенко А. А. Информационная безопасность и защита информации на железнодорожном транспорте : в 2 ч. : учебник для студентов, обучающихся по специальности 090302.65 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» / А. А. Корниенко, М. А. Еремеев, В. Н. Кустов, В. В. Яковлев, М. Е. Бородулин, М. Л. Глухарёв, С. В. Диасамидзе ; под ред. А. А. Корниенко. – Ч. 2 : Программно-аппаратные средства обеспечения информационной безопасности на железнодорожном транспорте. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. – 447 с.

5. Карабанов Ю. С. Способы противодействия программам вымогателям / Ю. С. Карабанов, В. О. Кириленко, С. В. Диасамидзе // Транспорт : проблемы, идеи, перспективы : сб. трудов LXXVI Всерос. науч.-технич. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб. : ПГУПС, 2016. – С. 175.

6. Привалов А. А. Метод топологического преобразования стохастических сетей и его использование для анализа систем связи ВМФ / А. А. Привалов. – СПб. : ВМА, 2000. – 166 с.

7. Гамма-функция. Positive Technologies. – URL : https://ru.wikipedia.org (дата обращения : 10.10.2017).

8. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго ; пер. с фр. ; под ред. К. С. Шифрина. – 2-е изд. – М. : Наука, 1967. – 779 с.

9. CROSS SITE SCRIPTING (XSS) ATTACKS. Imperva Incapsula. – URL : https://www.incapsula.com (дата обращения : 10.10.2017).

10. Вентцель Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М. : Наука, 1991. – 383 с.

11. Глыбовский П. А. Подход к оцениванию и прогнозированию уровня защищенности информационных и телекоммуникационных систем / П. А. Глыбовский, А. П. Глухов, Ю. А. Пономарев, М. В. Шиленков // Труды СПИИРАН. – 2015. – № 5 (42). – С. 180–195.

12. Привалов А. А. Разработка структуры программного комплекса моделирования информационного конфликта системы безопасности телекоммуникационного объекта РЖД с подсистемой нарушителя / А. А. Привалов, Ю. С. Карабанов, А. И. Королев, В. О. Кириленко // Интеллектуальные системы на транспорте : материалы V Междунар. науч.-практич. конференции «ИнтеллектТранс–2015». – СПб. : ПГУПС, 2015. – С. 327–332.

13. Коцыняк М. А. Устойчивость информационно-телекоммуникационных сетей / М. А. Коцыняк, И. А. Кулешов, О. С. Лаута. – СПб. : СПГПУ, 2013. – 120 с.

14. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати ; пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. – М. : Радио и связь, 1989. – 314 с.

15. Глухов А. П. Полумарковские модели оценивания вероятностно-временных характеристик выполнения функциональных задач автоматизированными системами управления критического применения / А. П. Глухов // Естественные и технические науки. – 2015. – № 7 (85). – С. 101–110.

16. Привалов А. А. Структура программного комплекса моделирования информационного конфликта системы безопасности телекоммуникационного объекта РЖД с подсистемой нарушителя / А. А. Привалов, Ю. С. Карабанов, А. И. Королев // Интеллектуальные технологии на транспорте. – СПб. : ПГУПС, 2015. – С. 22–31 (см. URL : http://itt-pgups.ru (дата обращения : 10.10.2017)).

References

1. *Vsya pravda ob XSS ili pochemu mezhsaytovoe vypolnenie stsenariev ne yavlyaetsya uyazvimostyu* [*The whole truth about XSS or why cross-site scripting is not vulnerability*]. *Positive Technologies*. URL: https://habrahabr.ru (accessed: 10.10.2017). (In Russian)

2. Budnikov S. A., Grevtsev A. I., Ivantsov A. V., Kildyushevskii V. M., Koziratskii A. Yu., Koziratskii Yu. L., Kushchev S. S., Lysikov V. F., Parinov M. L. & Prokhorov D. V. *Modeli informatsionnogo konflikta sredstv poiska i obnaruzheniya* [*Information conflict models of search and discovery tools*]. Moscow, Radio engineering Publ., 2013, 231 p. (In Russian)

3. *Kompyuternye ataki: kto nuzhen prestupnikam?* [*Computer attacks: whom do criminals need?*]. KasperskyLab. URL: http://www.kaspersky.ru (accessed: 10.10.2017). (In Russian)

4. Kornienko A. A., Eremeev M. A., Kustov V. N., Yakovlev V. V., Borodulin M. E., Glukharev M. L. & Diasamidze S. V. *Informatsionnaya bezopasnost i zashchita informatsii na zheleznodorozhnom transporte:* v 2 ch. Pod red. A. A. Kornienko. *Pt 2: Programmno-apparatnye sredstva obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti na zheleznodorozhnom transporte* [*Information security and information security in railway transport*]. In 2 pt. Ed. by A. A. Kornienko. [*Pt 2: Hardware-software devices of ensuring information security in railway transport*]. Moscow, Educational-methodical center in education at railway transport Publ., 2014, 447 p. (In Russian)

5. Karabanov Yu. S., Kirilenko V. O. & Diasamidze S. V. Sposoby protivodeystviya programmam vymogatelyam [Means of counteracting blackmailer programmes]. *Transport: problems, ideas, perspectives: Transactions of the LXXVIth All-Russian scientific-technical conference of students, postgraduates and young scientists.* Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2016, pp. 175. (In Russian)

6. Privalov A.A. *Metod topologicheskogo preobrazovaniya stokhasticheskikh setey i ego ispolzovanie dlya analiza sistem svyazi VMF* [*Method of topological transformation of stochastic networks and its application for analysis of communication systems of MNF*]. Saint Petersburg, VMA Publ., 2000, 166 p. (In Russian)

7. *Gamma-funktsiya* [*Gamma function*]. *Positive Technologies.* URL: https://ru.wikipedia.org/ (accessed: 10.10.2017). (In Russian)

8. Ango A. *Matematika dlya elektro- i radioinzhenerov.* Pod red. K. S. Shifrina. 2-e izd. [*Mathematics for electrical and radio engineers*]. Tr. from French by K. S. Shifrin, the 2nd ed. Moscow, Science Publ., 1967, 779 p. (In Russian)

9. *Cross site scripting (XSS) attacks. Imperva Incapsula*. URL: https://www.incapsula.com (accessed: 10.10.2017).

10. Venttsel E. S. & Ovcharov L. A. *Teoriya sluchaynykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya* [*Theory of stochastic processes and its engineering applications*]. Moscow, Science Publ., 1991, 383 p. (In Russian)

11. Glybovskii P.A., Glukhov A.P., Ponomarev Yu.A. & Shilenkov M. V. Podkhod k otsenivaniyu i prognozirovaniyu urovnya zashchishchennosti informatsionnykh i telekommunikatsionnykh system [Approach to evaluation and prediction of the level of information and telecommunication systems security]. *Transactions of SPIIRAN*, 2015, no. 5 (42), pp. 180–195. (In Russian)

12. Privalov A.A., Karabanov Yu. S., Korolev A. I. & Kirilenko V. O. Razrabotka struktury programmnogo kompleksa modelirovaniya informatsionnogo konflikta sistemy bezopasnosti telekommunikatsionnogo obekta RZHD s podsistemoy narushitelya [Designing the structure of program complex of modeling information conflict of security system of telecommunication "RZhD" object with violator subsystem]. *Intellectual transport systems: transactions of the 5th International scientific-practical conference "IntellectTrans–2015"*. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2015, pp. 327–332. (In Russian)

13. Kotsynyak M.A., Kuleshov I.A. & Lauta O.S. *Ustoychivost informatsionno-telekommunikatsionnykh setei* [*Information and telecommunication networks stability*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2013, 120 p. (In Russian)

14. Saati T. *Prinyatie reshenii. Metod analiza ierarkhii.* Per. s angl. R. G. Vachnadze [*Decision making. Hierarchy analysis method*]. Tr. from English by R. G. Vachnadze. Moscow, Radio and communication Publ., 1989, 314 p. (In Russian)

15. Glukhov A. P. Polumarkovskie modeli otsenivaniya veroyatnostno-vremennykh kharakteristik vypolneniya funktsionalnykh zadach avtomatizirovannymi sistemami upravleniya kriticheskogo primeneniya [Semi-Markov models for evaluating probabilistic-temporal characteristics of performing functional problems by automated systems of critical application control]. *Natural and technical sciences*, 2015, no. 7 (85), pp. 101–110. (In Russian)

16. Privalov A.A., Karabanov Yu. S. & Korolev A. I. Struktura programmnogo kompleksa modelirovaniya informatsionnogo konflikta sistemy bezopasnosti telekommunikatsionnogo obekta RZhD s podsistemoi narushitelya [The structure of program complex of modeling information conflict of security system of telecommunication "RZhD" object with violator subsystem]. *Intellectual transport technologies,* 2015, pp. 22–31. (In Russian) (see: URL: http:itt-pgups.ru (accessed: 10.10.2017)).

ПРИВАЛОВ Андрей Андреевич – доктор военных наук, профессор, aprivalov@inbox.ru; *КАРАБАНОВ Юрий Сергеевич – аспирант, karabanov1994@yandex.ru; КРАВЦОВ Антон Олегович – аспирант, kravcovanton@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I); СИДОРОВ Сергей Игоревич – аспирант, 4idisa@gmail.com (Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»).