НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ, том 15, выпуск 2, 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
Ю. А. Фаттахова

Верстка
А. А. Стуканова

Редактор сайта
А. В. Степанова

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 20.06.2018.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать МФУ.
Усл. печ. л. 18,75. Установочный тираж 300 экз.
Заказ . 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 2, 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
Yu. Fattakhova

Layout
A. Stukanova

Online content editor
A. Stepanova

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

Андреев В. М.

Проблемы прохода устройств контактной сети в искусственных сооружениях 177

Говоров В. В., Дороничева С. А., Чусовитин М. С.

Увеличение срока службы деревянных шпал 183

Ефименко Ю. И., Четчуев М. В., Филиппов А. Г., Губарь М. В.

Проблемы оптимизации этапности развития станций при использовании альтернативных вариантов проектных решений 194

Кузнецова И. О., Сабирова О. Б., Уздин А. М., Чанг Юань

Оценка коэффициентов сочетаний сейсмической и подвижной нагрузок для мостов с совмещенным движением 206

Романов А. В., Мухаммадиев Н. Р.

К вопросу о развитии высокоскоростного движения в Республике Узбекистан 215

Смелянский И. В., Бржезовский А. М., Толмачев С. В.

Балластировка грузонесущей балки транспортера 223

Стрелков А. К., Теплых С. Ю., Бухман Н. С., Горшкалев П. А., Иванов В. Г., Пономарев А. Б.

Воздействие железнодорожных транспортных комплексов на водные объекты Самарской области 229

Титова Т. С., Макарова Е. И., Изварин М. Ю., Опарина Е. В.

Электромагнитные процессы в тяговом электроприводе электровоза переменного тока серии ЭП1 при выходе из электрического рекуперативного торможения 240

Титова Т. С., Покровская О. Д.

Междисциплинарное положение теории терминалистики 248

Фоменко В. Н., Шварц М. А.

Анализ термического режима вентиляционной шахты метрополитена методом разделения переменных Фурье 261

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

Белошицкий Э. В., Мямлин С. С.

Совершенствование функционирования систем отопления пассажирских вагонов 271

Гофман М. В., Корниенко А. А., Мирончиков Е. Т.

Методика цифрового маркирования аудиосигналов для скрытой акустической связи через воздушный аудиоканал 280

Ким К. К., Полунин И. С.

К вопросу повышения эффективности работы электрогидроимпульсного разгрузочного комплекса для полувагонов 295

→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Альдреби З. А.

Мониторинг и паспортизация наиболее известных памятников архитектуры в Сирии 302

Ефанов Д. В., Костроминов А. М., Манаков А. Д., Макшанов А. В., Шаров В. А.

Модульно-модифицированные взвешенные коды с суммированием в эксперименте по организации систем функционального контроля тестовых комбинационных схем 311

УДК 625.3

В. М. Андреев

ПРОБЛЕМЫ ПРОХОДА УСТРОЙСТВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ В ИСКУССТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЯХ

Дата поступления: 27.12.2017
Решение о публикации: 12.03.2018

Аннотация

Цель: Рассмотреть ряд преимуществ жесткой контактной подвески перед традиционной контактной подвеской в малогабаритных местах под искусственными сооружениями. **Методы:** В связи с невозможностью реконструкции искусственных сооружений требуется искать способы модернизации контактной сети в малогабаритных сооружениях, которые должны соответствовать требованиям безопасного пропуска электроподвижного состава. **Результаты:** Выполнен сравнительный анализ эксплуатационно-технических параметров и основных характеристик устройств контактной сети, который показал преимущество жесткой контактной подвески по сравнению с традиционной. **Практическая значимость:** Результаты использования жесткой контактной подвески доказывают, что для токосъема с жестким токопроводом характерны: увеличение скоростей движения прохода электроподвижного состава в малогабаритных искусственных сооружениях, значительный рост токовых нагрузок, обеспечивающих надежную, экономическую и экологичную передачу электроэнергии на борт подвижного состава. Технические преимущества жесткого токопровода по сравнению с традиционной контактной подвеской делают применение такого решения перспективным.

Ключевые слова: Жесткая контактная подвеска, жесткий токопровод, традиционная контактная подвеска, искусственные сооружения, малая габаритность.

Vladislav M. Andereyev, postgraduate student, andreev.ech4@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) THE ISSUES OF CATENARY SUSPENSION CONSTRUCTION PASSAGE IN ENGINEERING STRUCTURES

Summary

Objective: To study a number of advantages of a rigid catenary over a standard overhead catenary in small-sized places under engineering structures. **Methods:** Due to impossibility of upgrading of engineering structures it is required to search for modernization methods of a catenary system in small-sized constructions, which are to comply with the electric stock safe passage requirements. **Results:** The comparative analysis of maintenance parameters and general properties of catenary suspension construction was carried out, which showed the advantage of a rigid catenary over a standard one. **Practical importance:** The results of rigid catenary application prove that current collection with a rigid conductor is characterized by: increase of electric stock passing speed in small-sized engineering structures, significant current load increase, providing reliable, economic and ecological electric energy transmission onto the

electric stock. Technological advantages of the rigid conductor over the standard catenary make application of such solution promising.

Keywords: Rigid catenary, rigid current distributor, standard catenary, engineering structures, small clearance.

Искусственные сооружения, пересекающие по верху железную дорогу и находящиеся в непосредственной близости от устройств контактной сети, должны содержаться в исправном состоянии и обеспечивать безопасный пропуск электропоездов с наибольшими установленными скоростями под ними [1, 2]. Объекты старой постройки вызывают наибольшие трудности для размещения устройств контактной сети в связи с небольшим пространством и малой габаритностью.

Общую проблему, касающуюся электрификации в искусственных сооружениях, представляет собой выбор минимально допустимых зазоров. При этом в одних странах в результате проводимых исследований установили единые значения как для постоянных (статических), так и для кратковременных (динамических) зазоров. В других странах были разработаны дифференцированные нормы для статического и динамического положения контактной сети [1, 3].

Искусственные сооружения должны соответствовать основным требованиям для безопасного движения электроподвижного состава в соответствии с инструкцией ЦЭ-868 «Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог» от 11 декабря 2001 г. [4].

Высота подвески контактного провода над уровнем верха головки рельса должна быть минимальной на перегонах и железнодорожных станциях 5,75 м [4, 5]. В исключительных случаях в пределах искусственных сооружений, расположенных на путях железнодорожных станций, на которых не предусматривается стоянка подвижного состава, а также на перегонах она может быть уменьшена до 5,55 м при постоянном токе [4, 5].

В соответствии п. 5 приложения № 4 к «Правилам технической эксплуатации железных дорог» [4, 5] расстояние от токоведущих элементов токоприемника и частей контактной сети, находящихся под напряжением, до заземленных частей сооружений и железнодорожного подвижного состава должно быть не менее 200 мм на линиях, электрифицированных на постоянном токе, и не менее 270 мм – на переменном токе.

Контактная сеть в искусственных сооружениях [1, 4] должна удовлетворять двум основным требованиям:

– обеспечить возможность взаимодействия с токоприемником без соприкосновения его с отбойниками, установленными на искусственном сооружении;

– конструктивное выполнение ее должно быть таким, чтобы при любом нажатии токоприемника зазоры между находящимися под напряжением частями электроподвижного состава или контактной сети и заземленными частями искусственных сооружений не были меньше минимально допустимых электрических зазоров.

В настоящее время разработан ряд конструкций контактных подвесок для применения в условиях стесненных габаритов тоннелей. Можно выделить несколько схем контактных подвесок, спроектированных специально для тоннелей как в нашей стране, так и за рубежом [3]:

1) простые и малогабаритные цепные контактные подвески;

2) упругие шарнирно соединенные токопроводы на жестких и пружинных подвесах;

3) упругие жестко соединенные токопроводы;

4) жесткие шарнирно соединенные токопроводы.

В искусственных сооружениях старой постройки возникает проблема расположения устройств традиционной контактной подвески.

Поэтому в ряде стран вместо них используют жесткий токопровод [3].

В Швейцарии история применения контактной подвески жесткого типа началась в конце XX в., когда железные дороги этой страны согласились провести испытания такой подвески на станции Опфикон городской железной дороги Цюриха. Тогда было доказано, что непосредственный переход от обычной подвески с контактным проводом, используемой на наземных участках, к подвеске с алюминиевой контактной шиной, применяемой в тоннелях, возможен при внедрении переходной шины специальной конструкции.

Дальнейшие работы, способствующие расширению сферы применения контактной подвески жесткого типа, велись в следующих направлениях:

1) разработка подвески специальной конструкции для тоннелей с особо стесненным габаритом [5];

2) создание контактной шины, способной выдерживать большие токи, для линий с высокой интенсивностью движения, электрифицированных на постоянном токе [6].

Положительный опыт сооружения и эксплуатации контактной подвески жесткого типа, начиная с 1991 г., накоплен также на участках подземной части станции Цюрих–Главный. Кроме того, испытания, проведенные с использованием высокоскоростного электропоезда ICE при скорости 260 км/ч, показали применимость такой подвески при движении поездов со скоростью по меньшей мере до 250 км/ч. На станции Берлин–Главный монтаж контактной сети общей протяженностью примерно 50 км получила компания «Spitzke». Монтаж подвески с контактной шиной на подземных участках общей длиной около 20 км был передан компании «Furrer+Frey» [6].

Жесткая контактная сеть обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными контактными подвесками:

1) отсутствие компенсирующего устройства контактной сети для контактного провода и несущего троса [3, 5];

2) высокая проводимость тока [7];

3) снижение падения напряжения [3, 5];

4) значительная стойкость при коротких замыканиях [3, 5];

5) простота конструкции, основанная на небольшом количестве компонентов [3, 5];

6) увеличение жизненного цикла контактного провода вследствие возможности износа до 43 % [3, 5];

7) отсутствие необходимости в применении дополнительных усиливающих проводов [3];

8) закрепление контактного провода в жестком токопроводе по всей длине без деталей и удержание его за счет упругости токопровода [7];

9) возможность установки контактного провода в жесткий токопровод как без натяжения, так и при натяжении, что существенно упрощает процесс монтажа [7];

10) упрощение системы защиты и заземления контактной сети [3];

11) технологичность и возможность высокого уровня механизации монтажных работ [3].

На рисунке показана конструкция жесткой контактной подвески. Она представляет собой контактный рельс, состоящий из профилей алюминиевого сплава. Контактный провод крепится между профилями и передает электрическую энергию подобно обычному контактному проводу традиционной подвески [7].

Приведем основные характеристики жесткой контактной шины, разработанной компанией «Siemens» [7]:

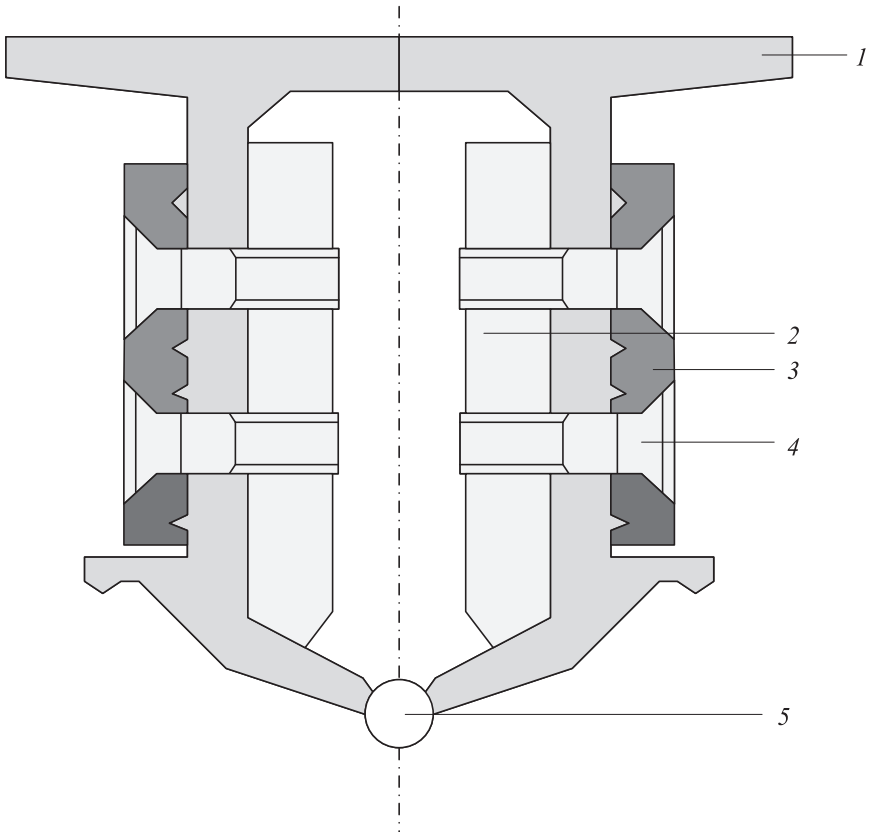
Номинальное напряжение:	
переменный ток, AC, кВ	25
постоянный ток, DC, В	750–3000
Максимальный постоянный ток, А	2900
Ток короткого замыкания, кА	45
Температура ОС, °С	Более –40
Максимальная температура провода, °С	90
Расстояние между точками подвеса, м	До 12

Максимальная скорость движения, км/ч	140
Сечение контактного рельса, мм^2	2300
Материал контактного рельса	Al
Сечение контактного провода, мм^2	До 150
Максимальная длина половины анкерного участка, м	500
Масса контактного рельса, кг/м	6,2

Жесткая контактная подвеска отличается высокой степенью стабильности. Она не подвержена отклонениям и колебаниям, вызываемым боковым ветром, и вертикальному смещению под воздействием силы контактного нажатия токоприемника, а также не требует применения компенсирующих устройств, как контактная подвеска традиционного типа [8]. Еще в 1984 г. испытания, проведенные на Федеральных железных дорогах Швейцарии (SBB), показали, что даже при разрушении изолятора алюминиевая шина оказывается достаточно прочной, чтобы оставшиеся части консоли не повредили полоз токоприемника [9].

Контактная подвеска жесткого типа требует весьма незначительного технического обслуживания. Соответствующие операции ограничиваются чисткой изоляторов в местах загрязненной окружающей среды [10] и регулировкой высоты и зигзага шины, которую следует осуществлять только при изменении положения пути [10].

Проверка и регулировка компенсирующих устройств не требуются, ввиду их отсутствия. Подвеска состоит из массивных и прочных элементов. Благодаря отсутствию натяжных устройств допустимый износ контактной шины по критериям прочности может достигать 50%



Конструкция контактной подвески:
1 – U-образный профиль контактного рельса; *2* – внутренняя накладка; *3* – внешняя накладка; *4* – болтовое соединение; *5* – контактный провод

и даже более, а износ обычного контактного провода не должен превышать 25–30%.

Контактная шина способна выдерживать воздействия поврежденных токоприемников электроподвижного состава. Когда на локомотиве происходит короткое замыкание, контактная шина может подвергаться локальному перегреву или расплавлению. Но при данных факторах она остается на своем месте, поскольку надежно прикреплена к алюминиевому профилю.

В случае контактной подвески традиционного типа оборванные провода под воздействием усилий, создаваемых компенсирующими устройствами, могут скручиваться и выходить за пределы полосы отвода. При этом ширина зоны контактной сети может увеличиться до 5 м в каждую сторону от оси пути, а с внутренней стороны кривой – даже больше. В случае же ослабления контактной шины единственное, что может произойти, – это ее излом или падение вниз только в вертикальной плоскости, без отклонений по горизонтали. Поэтому ширина зоны жесткой контактной сети в таком случае может быть ограничена шириной зоны токоприемника.

Жесткая контактная подвеска – это наиболее подходящее устройство для применения в малогабаритных местах, которым требуется небольшое пространство для размещения устройств контактной сети.

Она обеспечит стабильную высоту контактного провода над уровнем головки рельса, тем самым уменьшая плановую периодичность ремонта и регулировку; не требует дополнительного усиливающего провода для увеличения сечения контактной подвески, благодаря своей конструктивной особенности, и обеспечит безопасность движения как пассажирских, так и грузовых поездов в сложных эксплуатационных условиях.

Тем не менее эксплуатация жесткой контактной подвески на железных дорогах сталкивается с некоторыми проблемами:

1) сложностью конструкции крепления жесткой контактной подвески к несущим элементам;

2) сложностью конструкции крепления в месте перехода с жесткой контактной подвески на традиционную контактную подвеску;

3) необходимостью обучения квалифицированного персонала для обслуживания данных устройств;

4) ограничению скорости движения, что не позволяет применить эту подвеску для высокоскоростного электроподвижного состава.

Библиографический список

1. Комментарии к Правилам технической эксплуатации метрополитенов Российской Федерации. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2002. – 279 с.

2. Правила технической эксплуатации железных дорог. – Утв. приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 21 декабря 2010 г. № 286.

3. Евразия вести : Расширение области ЖКС на Российских железных дорогах. – М. : Элтранс, 2013.

4. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог (ЦЭ-868). – Департамент электрификации и электроснабжения Министерства путей сообщения Российской Федерации. – М. : Трансиздат, 2002. – 184 с.

5. Rigid overhead catenary. High-performance feeding system for urban and main-line rail transport. – Italy : Alstom, 2015. – 2 с.

6. Sicat SR Overhead conductor rail system for mass transit and main-line» railways. – Germany : Siemens, 2016. – 12 p.

7. Система жесткой контактной подвески Sicar SR. – М. : ООО «Сименс», 2012. – 4 с.

8. Rigid catenary. – Italy : Cariboni, 2012. – 12 p.

9. Overhead contact lines. Rigid Overhead conductor-rail systems. – United Kingdom : Furrey+Frey, 2015. – 20 p.

10. Жесткая контактная подвеска на Российских железных дорогах. – М. : ОАО «ВНИИЖТ», 2008. – 19 с.

References

1. *Kommentarii k Pravilam tekhnicheskoy ekspluatatsii metropolitenov Rossiyskoy Federatsii* [*Commentaries on underground technical regulations of the Russian Federation*]. Moscow, IKTs “Akademkniga” Publ., 2002, 279 p. (In Russian)

2. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog* [*Railroad standard operating rules*]. Utv. prikazom Ministerstva transporta Rossiyskoy Federatsii ot 21 dekabrya 2010 g. no. 286 [Approved by the order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated December the 21st 2010 N 286]. (In Russian)

3. *Evraziya vesty:* Rasshireniye oblasty ZhKS na Rossiyskikh dorogakh [*Eurasia news:* Rigid overhead system area extension on Russian railroads]. Moscow, Eltrans Publ., 2013. (In Russian)

4. *Pravila ustroistva i tekhnicheskoy ekspluatatsii kontaktnoy sety elektrifitsirovannikh zheleznykh dorog (TsE-868)* [*Rules for the design and operation of electrified railroad catenary system (TsE-868)*]. Departament elektrifikatsii i elektrosnabzheniya Ministerstva putey soobsheniya Rossiyskoy Federatsii [The department of electrification and power supply of the Ministry of railways of the Russian Federation]. Moscow, Transizdat Publ., 2002, 184 p. (In Russian)

5. *Rigid overhead catenary. High-performance feeding system for urban and main-line rail transport.* Italy, Alstom Press, 2015, 2 p.

6. *Sicat SR Overhead conductor rail system for mass transit and main-line railways.* Germany, Siemens Publ., 2016, 12 p.

7. *Sistema zhestkoy kontaktnoy podvesky Sicar SR* [*The system of Sicar SR rigid catenary*]. Moscow, OOO "Siemens" Publ., 2012, 4 p. (In Russian)

8. *Rigid catenary.* Italy, Cariboni Publ., 2012. 12 p.

9. *Overhead contact lines. Rigid Overhead conductor-rail systems.* United Kingdom, Furrey+Frey Publ., 2015, 20 p.

10. *Zhestkaya kontaktnaya podveska na Rossiyskikh zheleznikh dorogakh* [*Rigid catenary on Russian railroads*]. Moscow, VNIIZhT Publ., 2008, 19 p. (In Russian)

АНДРЕЕВ Владислав Михайлович – аспирант, andreev.ech4@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 625.14

В. В. Говоров, С. А. Дороничева, М. С. Чусовитин

УВЕЛИЧЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ДЕРЕВЯННЫХ ШПАЛ

Дата поступления: 22.01.2018
Решение о публикации: 25.03.2018

Аннотация

Цель: Подтвердить увеличение срока службы деревянных шпал при использовании специальной конструкции рельсовой подкладки, способствующей снижению механического износа. **Методы:** Изготовлен опытный образец рельсовой подкладки с учетом рекомендаций ПромтрансНИИпроекта. Произведен теоретический расчет прогибов опытного образца рельсовой подкладки на деревянной шпале. Проведено лабораторное испытание опытного образца рельсовой подкладки на деревянной шпале с помощью испытательной машины INSTRON SATEC 1200 KN. **Результаты:** Определены зависимости прогибов опытного образца рельсовой подкладки на деревянной шпале от применяемой нагрузки. Получено подтверждение о влиянии конструкции рельсовой подкладки, способствующей уменьшению механического износа и увеличению срока службы деревянных шпал. **Практическая значимость:** Применение специальной конструкции рельсовой подкладки позволяет снизить механический износ деревянных шпал и повысить их срок службы. На железнодорожных путях с повышенными осевыми нагрузками (например, на предприятиях черной металлургии) наиболее перспективным становится внедрение двухкомпонентных рельсовых подкладок.

Ключевые слова: Деревянная шпала, рельсовая подкладка, прогиб, прочность, срок службы.

Vadim Vl. Govorov, D. Eng. Sci., professor, vv.govorov@yandex.ru; **Svetlana A. Doronicheva,** postgraduate student, 92.lana@mail.ru; *** Maksim S. Chusovitin**, postgraduate student, chusmaksimus@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) WOODEN SLEEPERS SERVICE LIFE INCREASE

Summary

Objective: To justify service life increase of wooden sleepers when using special structures of rail chair, promoting mechanical wear reduction. **Methods:** A rail chair prototype was made taking into account PromtransNIIproekt recommendations. Theoretical calculation of deflections of the rail chair prototype was carried out on a wooden sleeper. Laboratory testing of the rail chair prototype on a wooden sleeper was conducted by means of INSTRON SATEC 1200 KN testing machine. **Results:** The dependencies of deflections of the rail chair prototype on a wooden sleeper on the load applied were determined. It was confirmed that the influence of rail chair construction facilitates the reduction of mechanical wear and the increase of wooden sleepers' service life. **Practical importance:** Application of rail chair special structure makes it possible to reduce mechanical wear of wooden sleepers and improve service life of the latter. On the track with increased axle loading (for instance, at iron and steel industry enterprises) the implementation of two-component rail chairs becomes the most promising.

Keywords: Wooden sleeper, rail chair, deflection, strength, service life.

В процессе эксплуатации железнодорожных путей промышленных предприятий, особенно на путях металлургических заводов, рельсовые подкладки подвержены воздействию высоких осевых нагрузок, в 2,5 раза превышающих нагрузки на железнодорожных путях общего

пользования. Такие осевые нагрузки увеличивают интенсивность образования углублений на верхнем пласте под рельсовой подкладкой и приводят к развитию трещин от воздействия прикрепителей и подкладок на деревянных шпалах, что вызывает изгиб рельсовых подкладок и преждевременный выход из эксплуатации деревянных шпал по причине механического износа [1, 2].

Можно выделить следующие направления по продлению срока службы деревянных шпал:

1) соблюдение правильной технологии по транспортировке, хранению, укладке шпал, при производстве работ по текущему содержанию железнодорожного пути (перешивка, укладка карточек, поправка шпал, подбивка балласта под шпалами), которое приведет к уменьшению механических повреждений деревянных шпал;

2) применение технологий по ремонту развивающихся дефектов деревянных шпал на ранних стадиях, например, таких как:

- удаление изношенной древесины с зачисткой заусенцев и антисептирование зачищенных мест,
- постановка во время перешивок пути пластинок-закрепителей при костыльном скреплении и втулок при шурупном,
- антисептирование отверстий от прикрепителей и трещин на верхней пласти,
- установка П-образных скоб в количестве не менее 6 штук на расстоянии 40 мм от нижней пласти на торце,
- заполнение трещин специальным компаундом;

3) разработка и внедрение специальных конструкций в узле крепления рельса к деревянным шпалам для защиты от механического износа.

Наиболее перспективным направлением, позволяющим значительно увеличить срок службы деревянных шпал, является разработка специальных конструкций рельсовых скреплений. На протяжении многих лет предлагались те или иные варианты более эффективных конструкций, позволяющих снизить износ деревянных шпал в различных условиях их эксплуатации, однако такие конструкции так и не были внедрены. Большая часть решений осталась на «бумаге». Почему так происходит?

Ответ на данный вопрос рассмотрим на примере конструкции рельсовой подкладки, предложенной в 1973 г. Ленинградским отделением ПромтрансНИИпроекта [3]. Она отличается тем, что имеет значительную площадь опирания на поверхность шпалы и бóльшую толщину, чем обычная рельсовая подкладка (рис. 1).

Для оценки влияния конструкции рельсовой подкладки на механический износ деревянных шпал на основе рекомендаций ПромтрансНИИпроекта был изготовлен опытный образец рельсовой подкладки (рис. 2).

Для полноты оценки результатов лабораторного испытания опытного образца рельсовой подкладки проведем теоретические расчеты по схеме, указанной на рис. 3, по методике расчета прогибов рельсовой подкладки [4]. Расчет будет произведен для нагрузки 5, 10 и 15 т.

Итак, взяв за основу следующие данные: расчетная нагрузка $P = 5$ т, коэффициент постели шпал $k(x) = 100$ кг/см^3, модуль продольной упругости стали $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, воспользуемся следующими известными формулами [5–7]: поперечной силы $Q_i = \int_0^i q dx$, изгибающего момента $M_i = \int_0^i Q dx$, угла поворота $\Theta_i = \int_0^i \frac{M dx}{EI(x)}$, прогиба $Y_i = \int_0^i \frac{\Theta dx}{EI(x)}$.

Используя указанные дифференциальные зависимости, рассчитаем:

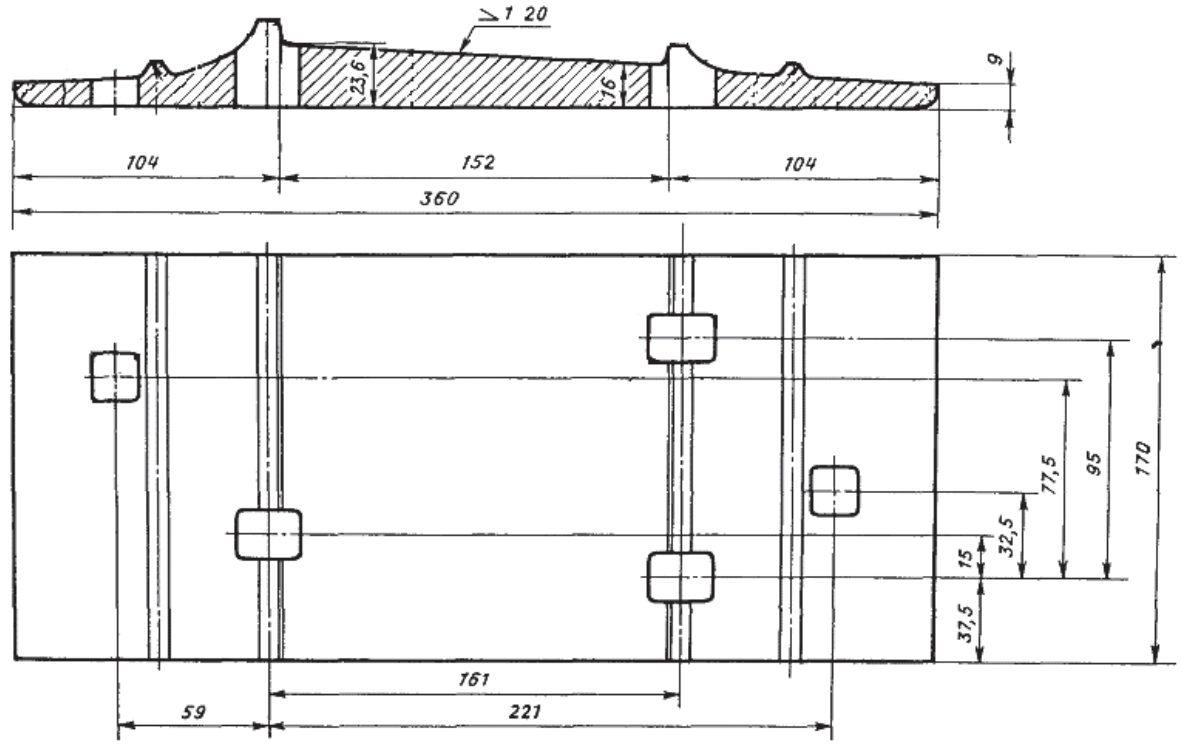
1) поперечные силы, сечение подкладки $i = 0{,}04575$ м:

$$Q_i = \int_0^i q dx = \int_0^{0{,}04575} 136\,250\, dx =$$

$$= 136\,250 \cdot (0{,}04575 - 0) = 6233{,}4 \text{ н},$$

2) значение момента сил, сечение $i = 0{,}04575$ м:

а



б

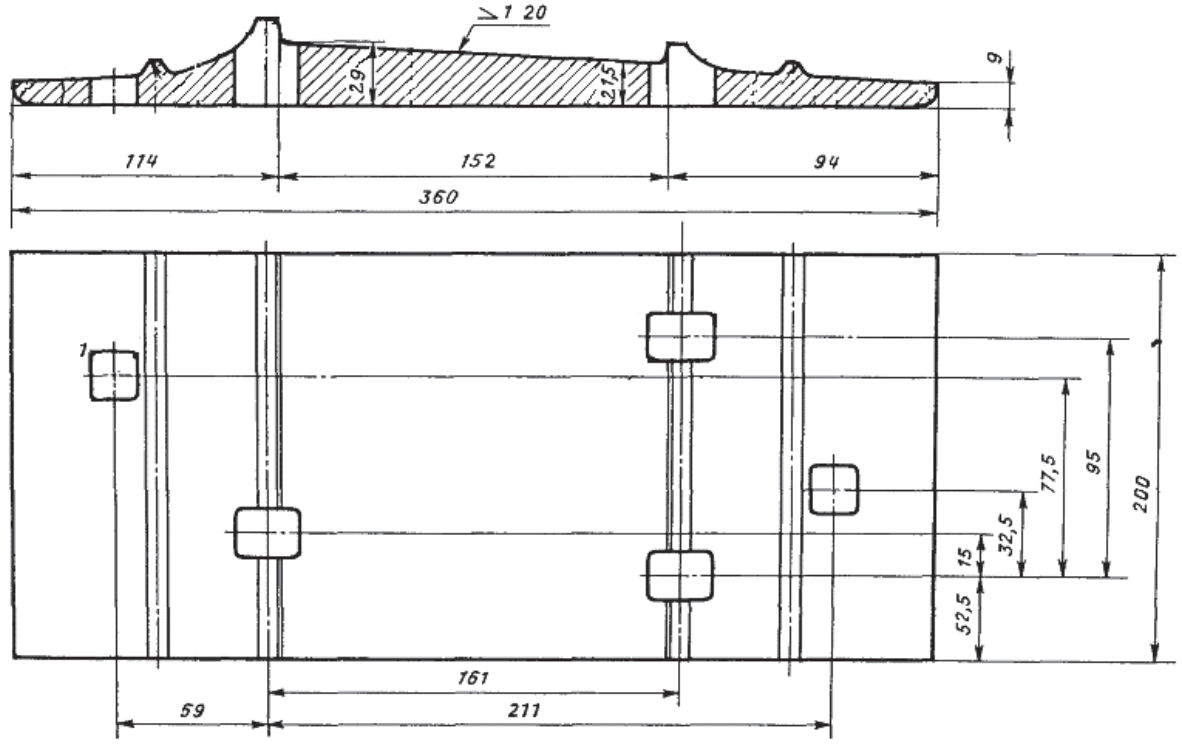


Рис. 1. Рельсовая подкладка костыльного скрепления на деревянной шпале:
а – типовая; *б* – рекомендуемая ПромтрансНИИпроектом
(размеры даны в мм (то же для рис. 2, 3, 6))

$$M_i = \int_0^i Q dx = \int_0^{0,04575} qx dx = 136\,250 \cdot 0,04575^2 /$$

$$/2 - 136\,250 \cdot 0^2 / 2 = 142,59 \text{ н} \cdot \text{м},$$

3) угол поворота, сечение $i = 0,142$ м:

$$\Theta_i = \int_0^i \frac{M dx}{EI(x)} = \int_{-0,0915}^{0} \frac{qx^2}{2EI(x)} =$$

$$= \frac{136\,250 \cdot (-0,0915)^3}{2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 3,454453 \cdot 10^{-8}} -$$

$$- \frac{136\,250 \cdot (0)^3}{2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 3,454453 \cdot 10^{-8}} =$$

$$= -0,001445 \text{ рад},$$

4) значение прогиба подкладки, сечение $i = 0,04575$ м:

$$Y_i = \int_0^i \frac{\Theta dx}{EI(x)} = \int_0^{0,04575} \frac{qx^3}{6 \cdot EI(x)} =$$

$$= \frac{136\,250 \cdot (0,04575)^4}{6 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 3,454453 \cdot 10^{-8}} -$$

$$- \frac{136\,250 \cdot (0)^4}{6 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 3,454453 \cdot 10^{-8}} =$$

$$= 0,0000819 \text{ м}.$$

Таким образом, определили параметры для каждого сечения. Аналогично проведем расчеты для нагрузок 10 и 15 т (табл. 1). Результаты теоретического расчета прогибов опытного образца рельсовой подкладки в сечениях подкладки 0,08275, 0,165 и 0,24725 м для рассматриваемых видов нагрузки приведены в табл. 2.

Лабораторные исследования проводились в 2017 г. в «Механической лаборатории им. проф. Н. А. Белелюбского» Петербургского государственного университета путей сообщения. Эта лаборатория специализируется на испытаниях элементов железнодорожного пути, деталей машин, металлических и железобетонных элементов и других конструкций [8, 9]. При разработке программы испытаний использовались рекомендации [10, 11].

При лабораторных испытаниях опытного образца рельсовой подкладки вертикальные перемещения измерялись следующим образом: абсолютная линейная деформация фиксировалась испытательной машиной INSTRON SATEC 1200 KN (рис. 4) с отображением данных на графике зависимости нагрузки от удлинения (рис. 5). Также измерялось расстояние между подошвой рельсовой подкладки

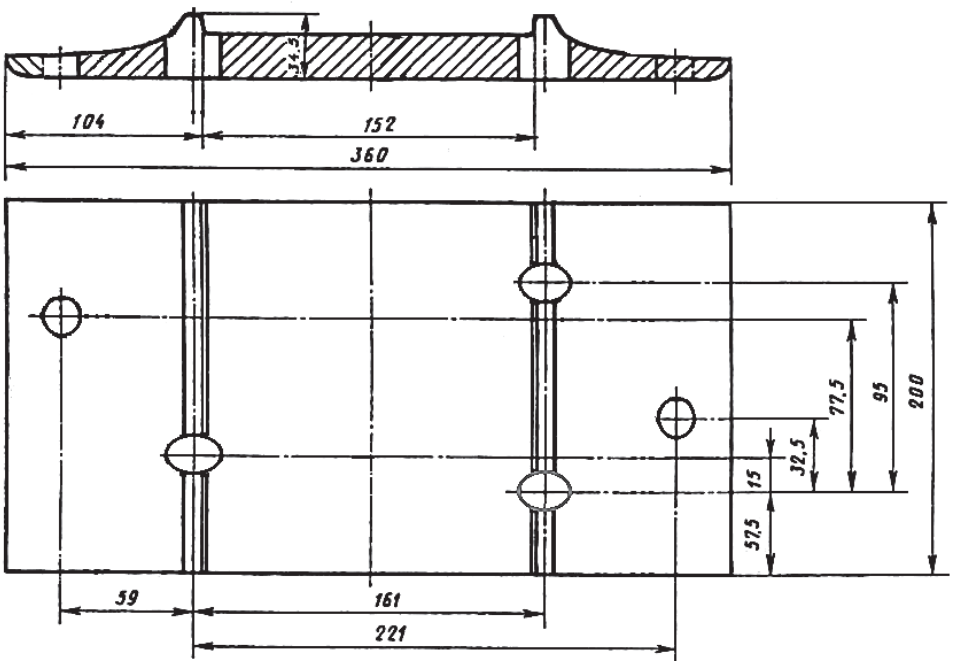


Рис. 2. Опытный образец рельсовой подкладки костыльного скрепления на деревянной шпале

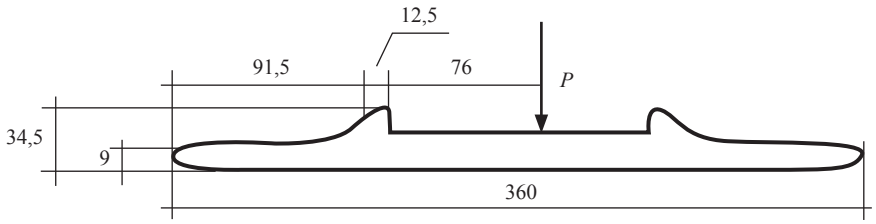


Рис. 3. Расчетная схема опытного образца рельсовой подкладки

ТАБЛИЦА 1. Расчет прогибов опытного образца рельсовой подкладки

X_i, м	Q_i, н	M_i, н·м	$J(x)$, см	Θ_i, рад	Y_i, м
При нагрузке 5 т при q_i = 136 250,0 н/м					
0	0	0	0,151875	–0,058716	0,0000000
0,04575	6 233,4	142,5898828		–0,008604	0,0000819
0,0915	12 466,9	570,3595313		–0,001445	0,0013101
0,09775	13 318,4	650,9386328	8,554922	–0,001443	0,0013101
0,104	14 170,0	736,84		–0,001443	0,0013101
0,104	14 170,0	736,84	3,454453	–0,001443	0,0013101
0,142	19 347,5	1373,6725		–0,000180	0,0013118
0,18	24 525,0	2207,25		0,000000	0,0013375
0,18	–24 525,0	2207,25	3,454453	0,000000	0,0013375
0,218	–19 347,5	1373,6725		0,000180	0,0013118
0,256	–14 170,0	736,84		0,001443	0,0013101
0,256	–14 170,0	736,84	8,554922	0,001443	0,0013101
0,26225	–13 318,4	650,9386328		0,001443	0,0013101
0,2685	–12 466,9	570,3595312		0,001445	0,0013101
0,2685	–12 466,9	570,3595312	0,151875	0,001445	0,0013101
0,31425	–6 233,4	142,5898828		0,008604	0,0000819
0,36	0	0		0,058716	0,0000000
При нагрузке 10 т при q_i = 272 500,0 н/м					
0	0	0	0,151875	–0,117432	0,0000000
0,04575	12 466,9	285,1797656		–0,017209	0,0001638
0,0915	24 933,8	1140,719063		–0,002891	0,0026201
0,0915	24 933,8	1140,719063	8,554922	–0,002891	0,0026201
0,09775	26 636,9	1301,877266		–0,002886	0,0026201
0,104	28 340,0	1473,68		–0,002886	0,0026201
0,104	28 340,0	1473,68	3,454453	–0,002886	0,0026201
0,142	38 695,0	2747,345		–0,000361	0,0026236
0,18	49 050,0	4414,5		0,000000	0,0026750

Окончание табл. 1

X_i, м	Q_i, н	M_i, н·м	$J(x)$, см	Θ_i, рад	Y_i, м
0,18	–49 050,0	4414,5	3,454453	0,000000	0,0026750
0,218	–38 695,0	2747,345		0,000361	0,0026236
0,256	–28 340,0	1473,68		0,002886	0,0026201
0,256	–28 340,0	1473,68	8,554922	0,002886	0,0026201
0,26225	–26 636,9	1301,877266		0,002886	0,0026201
0,2685	–24 933,8	1140,719063		0,002891	0,0026201
0,2685	–24 933,8	1140,719063	0,151875	0,002891	0,0026201
0,31425	–12 466,9	285,1797656		0,017209	0,0001638
0,36	0	0		0,117432	0,0000000
При нагрузке 15 т при q_i = 408 750,0 н/м					
0	0	0	0,151875	–0,176148	0,0000000
0,04575	18 700,3	427,7696484		–0,025813	0,0002456
0,0915	37 400,6	1711,078594		–0,004336	0,0039302
0,09775	39 955,3	1952,815898	8,554922	–0,004329	0,0039302
0,104	42 510,0	2210,52		–0,004329	0,0039302
0,104	42 510,0	2210,52	3,454453	–0,004329	0,0039302
0,142	58 042,5	4121,0175		–0,000541	0,0039354
0,18	73 575,0	6621,75		0,000000	0,0040125
0,18	–73 575,0	6621,75	3,454453	0,000000	0,0040125
0,218	–58 042,5	4121,0175		0,000541	0,0039354
0,256	–42 510,0	2210,52		0,004329	0,0039302
0,256	–42 510,0	2210,52	8,554922	0,004329	0,0039302
0,26225	–39 955,3	1952,815898		0,004329	0,0039302
0,2685	–37 400,6	1711,078594		0,004336	0,0039302
0,2685	–37 400,6	1711,078594	0,151875	0,004336	0,0039302
0,31425	–18 700,3	427,7696484		0,025813	0,0002456
0,36	0	0		0,176148	0,0000000

Примечание. X_i – координата сечения подкладки, Q_i – поперечная сила, M_i – изгибающий момент, $J(x)$ – момент инерции, Θ_i – угол поворота, Y_i – прогиб подкладки, q_i – распределенная нагрузка.

ТАБЛИЦА 2. Результаты теоретического расчета прогибов опытного образца рельсовой подкладки для трех сечений (в мм)

Сечение подкладки, i, м	Приложенная нагрузка, P, т		
	5	10	15
0,09775	1,3101	2,6201	3,9302
0,180	1,3375	2,6750	4,0125
0,26225	1,3101	2,6201	3,9302

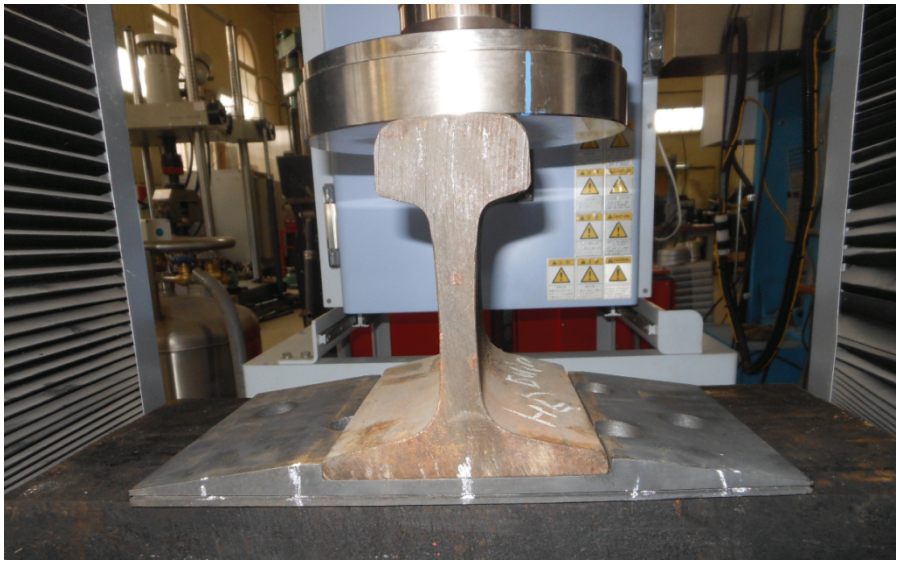


Рис. 4. Физическая модель железнодорожного пути

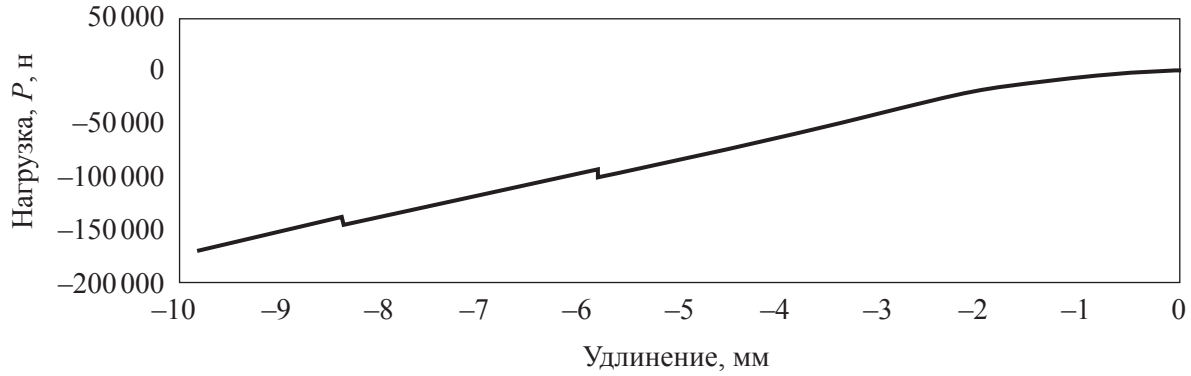


Рис. 5. Зависимость нагрузки от удлинения
(отображение данных испытательной машиной INSTRON SATEC 1200 KN)

и неподвижным основанием пресса испытательной машины штангенциркулем «ELECTRONIC DIGITAL CALIPER» в двух случаях: первый – без приложения нагрузки к рельсовой подкладке и второй – с соответствующей нагрузкой (5, 10 и 15 т). После определялась разница между двумя измерениями, которая и являлась искомой величиной прогиба рельсовой подкладки на деревянной шпале при приложении нагрузки. Средние значения измеренного прогиба опытного образца рельсовой подкладки для сечения 0,180 м после обработки результатов [12] приведены в табл. 3.

Теоретический метод расчета прогибов опытного образца рельсовой подкладки на деревянной шпале позволяет корректно описать процесс прогиба рельсовой подкладки на деревянной шпале, что было доказано при проведении лабораторных испытаний. По данной методике проведен аналогичный расчет для типовой рельсовой подкладки по расчетной схеме (рис. 6). Результаты теоретического

ТАБЛИЦА 3. Обобщение усредненных результатов лабораторных испытаний прогибов опытного образца рельсовой подкладки (в мм) для сечения 0,180 м

i = 0,180 м	P, т		
	5	10	15
Расчет	1,34	2,68	4,01
Эксперимент	1,4	2,7	3,8

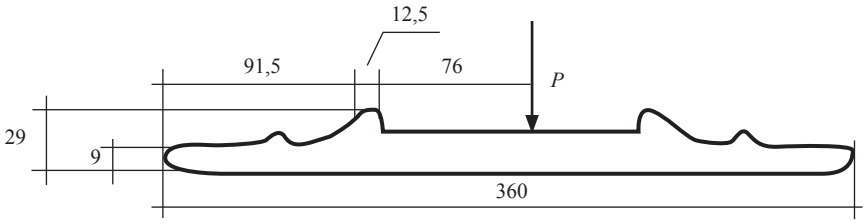


Рис. 6. Расчетная схема типовой рельсовой подкладки

расчета прогибов опытного образца рельсовой подкладки в сечениях 0,08275, 0,165 и 0,24725 м для рассматриваемых видов нагрузки приведены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Результаты теоретического расчета прогибов типовой рельсовой подкладки (в мм) для трех сечений

i, м	P, т		
	5	10	15
0,09775	1,5413	3,0825	4,6238
0,180	1,6081	3,2162	4,8244
0,26225	1,5413	3,0825	4,6238

Таким образом, теоретическими расчетами и лабораторными испытаниями было подтверждено, что конструкция рельсовой подкладки, имеющей формы, рекомендованные ПромтрансНИИпроектом, позволяет замедлить темпы механического износа деревянной шпалы под подкладкой, так как размеры рельсовой подкладки соответствуют действующим на путь повышенным осевым нагрузкам, что снижает (почти исключает) остаточный изгиб типовых рельсовых подкладок и их интенсивное врезание в шпалу.

И снова возникает вопрос: почему разработанная конструкция так и не была внедрена? Ведь ее эффективность установлена. В чем причина?

Она кроется в том, что в данной конструкции, как и во многих других, не менее эффективных, есть существенный недостаток, связанный с технологией производства рельсовых подкладок. Для производства предложенной рельсовой подкладки необходимо изготовить специальный механизированный стеллаж, рольганг, податчик, штамп, изменить настройки фрезерной машины. Количество рельсовых подкладок, необходимых для эксплуатации на технологических путях с повышенными осевыми нагрузками, очень невелико по сравнению с колоссальным объемом типовых подкладок, требуемых для эксплуатации на железнодорожных путях общего и необщего пользования. Для новой конструкции, с точки зрения технологии производства, нужны дополнительные финансовые вложения, поэтому она экономически не целесообразна.

Поэтому на железнодорожных путях с различными повышенными осевыми нагрузками (например, на предприятиях черной металлургии) наиболее перспективным направлением становится применение двухкомпонентных рельсовых подкладок [13–16]. Конструкция двухкомпонентной рельсовой подкладки, состоящая из типовой рельсовой подкладки и уложенной под ней металлической пластины, причем толщина и ширина пластины подбираются в зависимости от нагрузки, передаваемой подвижным железнодорожным составом на путь, обладает всеми преимуществами, рекомендованными ПромтрансНИИпроектом, и создает существенные предпосылки для снижения механического износа деревянной шпалы, в том числе растрескивания, за счет распределения нагрузки на большую площадь опирания. Это приводит к тому, что напряжения на поверхности шпалы минимальны. Для производства металлической пластины не требуются финансовые вложения для реорганизации технологического процесса,

что является весомым преимуществом перед конструкцией рельсовой подкладки, предложенной ПромтрансНИИпроектом. По выходу из эксплуатации деревянной шпалы металлическую пластину можно использовать вторично. В дальнейшем следует провести теоретические и экспериментальные исследования конструкции двухкомпонентных рельсовых подкладок с целью оценки эффективности снижения механического износа деревянных шпал в зоне рельсовых подкладок при различных условиях эксплуатации.

Библиографический список

1. Яковлев В. Ф. Путь и путевое хозяйство промышленных железных дорог / В. Ф. Яковлев, Б. А. Евдокимов, В. Е. Парунакян, А. Н. Перцев. – М. : Транспорт, 1990. – 3 с.

2. Басовский Д. А. Безостряковые стрелочные переводы для тяжеловесного движения поездов на дорогах необщего значения / Д. А. Басовский, В. В. Говоров // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2016. – Т. 9, № 9 (9). – С. 108–109.

3. Говоров В. В. К вопросу увеличения срока службы шпал и брусьев / В. В. Говоров, Ю. Ц. Глокман, Ю. П. Бойчевский // Реф. сб. «Проектирование промышленного транспорта». – 1974. – Сер. VI, вып. 2 (54). – С. 11–12.

4. Султанов Н. Н. Расчет прогибов рельсовой подкладки на деревянной шпале / Н. Н. Султанов, А. В. Колтаков // Транспорт : наука, техника, управление. – 2012. – Вып. 4. – С. 47–49.

5. Титов В. П. Перемещения и деформации в конструкциях железнодорожного пути / В. П. Титов // Вестн. ВНИИЖТ. – 1994. – Вып. 6. – С. 8–16.

6. Тихонов А. Н. Дифференциальные уравнения : учебник для вузов. – 4-е изд. / А. Н. Тихонов, А. Б. Васильева, А. Г. Свешников. – М. : Физматлит, 2005. – 253 с.

7. Говоров В. В. Универсальный метод оценки прочности элементов верхнего строения железнодорожного пути на основе расчетной модели балки на упругом основании / В. В. Говоров, Н. Н. Султанов, М. С. Чусовитин // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2017. – Т. 14, вып. 2. – С. 223–229.

8. Елизаров С. В. Механическая лаборатория им. проф. Н. А. Белелюбского (к 200-летию Петербургского государственного университета путей сообщения) / С. В. Елизаров, Ю. П. Каптелин, А. В. Бенин // Alma mater (Вестн. высшей школы). – 2009. – Вып. 9. – С. 58–64.

9. Чусовитин М. С. Испытание рельсовой подкладки на деревянной шпале / М. С. Чусовитин, К. С. Малышев // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2016. – Т. 13, вып. 3. – С. 388–395.

10. Бенин А. В. Планирование эксперимента / А. В. Бенин, В. В. Гарбарук. – СПб. : ПГУПС, 2010. – 89 с.

11. Бенин А. В. Экспериментальные методы контроля качества строительных материалов и конструкций / А. В. Бенин, А. П. Лейкин, С. В. Николаев. – СПб. : ПГУПС, 2015. – 227 с.

12. Рушимский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л. З. Рушимский. – М. : Наука, 1971. – 192 с.

13. Нашпальная прокладка промежуточного рельсового скрепления : патент 108454. Рос. Федерация : МПК[51] E01B 9/68 / В. В. Говоров, Н. Н. Султанов; заявитель и патентообладатель Петерб. гос. ун-т путей сообщения. – № 2011121088/11. – Заявл. 25.05.2011 г. ; опубл. 20.09.2011 г. – Бюл. № 26.

14. Шпала : патент 110378. Рос. Федерация : МПК[51] E01B 3/02 / В. В. Говоров, Н. Н. Султанов, А. В. Колтаков, Б. О. Креер ; заявитель и патентообладатель Петерб. гос. ун-т путей сообщения. – № 2011129454/11. – Заявл. 15.07.2011 г. ; опубл. 20.11.2011 г. – Бюл. № 32.

15. Шпала : патент 174782. Рос. Федерация : МПК[51] E01B 3/00 / В. В. Говоров, К. А. Смирнов, М. С. Чусовитин ; заявитель и патентообладатель Петерб. гос. ун-т путей сообщения. – № 2017124558. – Заявл. 10.07.2017 г. ; опубл. 01.11.2017 г. – Бюл. № 31.

16. Шпала : патент 175220. Рос. Федерация : МПК[51] E01B 3/02 / В. В. Говоров, М. С. Чусовитин; заявитель и патентообладатель Петерб. гос. ун-т путей сообщения. – № 2017117527. – Заявл. 19.05.2017 г. ; опубл. 28.11.2017 г. – Бюл. № 34.

References

1. Yakovlev V. F., Yevdokimov B. A., Parunakyan V. Y. & Pertsev A. N. *Put i putevoye khozyaistvo promyshlennykh zheleznykh dorog* [*Track and track facilities of industrial railroads*]. Moscow, Transport Publ., 1990, 3 p. (In Russian)

2. Basovskiy D. A. & Govorov V. V. Bezostryakoviye strelochniye perevody dlya tyazhelovesnogo dvizheniya poyezdov na dorogakh neobshchego znacheniya [Stub-switch turnouts for heavy-load traffic working on non-public railway lines]. *Vnedreniye sovremennykh konstruktsiy i peredovykh tekhnologiy v putevoye khozyaistvo* [*Implementation of modern constructions and advanced technologies into track facilities*], 2016, vol. 9, no. 9 (9), pp. 108–109. (In Russian)

3. Govorov V. V., Glokman Y. Ts. & Boichevskiy Y. P. K voprosu uvelicheniya sroka sluzhby shpal i brusyev [On the increase of service life of sleepers and skids]. *Ref. sb. "Proyektirovaniye promyshlennogo transporta"* [*Coll. of abstr. "Industrial transport design"*], 1974, series VI, issue 2 (54), pp. 11–12. (In Russian)

4. Sultanov N. N. & Koltakov A. V. Raschet progibov podkladky na derevyannoy shpale [Fishing plate deflection calculation on a timber sleeper]. *Transport: nauka*, *tekhnika*, *upravleniye* [*Transport: science*, *engineering*, *control*], 2012, issue 4, pp. 47–49. (In Russian)

5. Titov V. P. Peremeshcheniya i deformatsii v konstruktsiyakh zheleznodorozhnogo puty [Track design displacement and deformation]. *VNIIZhT Bull.*, 1994, issue 6, pp. 8–16. (In Russian)

6. Tikhonov A. N., Vasilyeva A. B. & Sveshnikov A. G. *Differentsialniye uravneniya:* uchebnik dlya vuzov [*Differential equations:* college textbook]. 4th ed. Moscow, Phismatlit Publ., 2005, 253 p. (In Russian)

7. Govorov V. V., Sultanov N. N. & Chusovitin M. S. Universalniy metod otsenky prochnosty elementov verkhnego stroyeniya zheleznodorozhnogo puty na osnove raschetnoy modely balky na uprugom osnovanii [Universal strength assessment method of track structure elements based on the beam on elastic foundation model]. *Izv. Peterb. gos. un-ta putey soobshcheniya* [*Proc. of Petersburg State Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2017, vol. 14, issue 2, pp. 223–229. (In Russian)

8. Elizarov S. V., Kaptelin Y. P. & Benin A. V. *Mekhanicheskaya laboratoriya im. prof. N. A. Belelyubskogo (k 200-letiyu Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya)* [*N. A. Belelyubskiy mechanical laboratory (in honor of the 200th anniversary of Petersburg State Transport University. Alma mater (University bulletin)*], 2009, issue 9, pp. 58–64. (In Russian)

9. Chusovitin M. S. & Malyshev K. S. Ispytaniye relsovoy podkladky na derevyannoy shpale [Rail chair testing on a wooden sleeper]. *Izv. Peterb. gos. un-ta putey soobshcheniya* [*Proc. of Petersburg State Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2016, vol. 13, issue 3, pp. 388–395. (In Russian)

10. Benin A. V. & Garbaruk A. V. *Planirovaniye eksperimenta* [*Experimental design*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2010, 89 p. (In Russian)

11. Benin A. V., Leikyn A. P. & Nikolayev S. V. *Eksperimentalniye metody kontrolya kachestva stroytelnykh materialov i konstruktsiy* [*Experimental methods of engineering materials and constructions quality control*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2015, 227 p. (In Russian)

12. Rushimskiy L. Z. *Matematicheskaya obrabotka rezultatov eksperimenta* [*Mathematical treatment of experimental results*]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 192 p. (In Russian)

13. *Nashpalnaya prokladka promezhutochnogo relsovogo skrepleniya: patent 108454 Ros. Federatsiya: MPK[51] E01V 9/68* [*Intermediate rail fastening pad: patent* 108454 *Rus. Federation: IPC[51] E01V 9/68*]. V. V. Govorov, N. N. Sultanov; patent applicant and patent holder Petersburg State Transport University, N 2011121088/11. Appl. 25.05.2011; publ. 20.09.2011. Bul. N 26. (In Russian)

14. *Shpala: patent 110378 Ros. Federatsiya: MPK[51] E01V 3/02* [Sleeper: patent 110378 Rus. Federation: IPC[51] E01V 3/02 / V. V. Govorov, N. N. Sultanov, A. V. Koltakov, V. O. Kreyer; patent applicant and patent holder Petersburg State Transport University, N 2011129454/11. Appl. 15.07.2011; publ. 20.11.2011. Bul. N 32. (In Russian)

15. *Shpala: patent 174782 Ros. Federatsiya: MPK[51] E01V 3/00* [*Sleeper: patent 174782 Rus. Federation: IPC[51] E01V 3/00*]. V. V. Govorov, K. A. Smirnov, M. S. Chusovitin; patent applicant and patent holder Petersburg State Transport University, N 2017124558. Appl. 10.07.2017; publ. 01.11.2017. Bul. N 31. (In Russian)

16. *Shpala: patent 174782 Ros. Federatsiya: MPK[51] E01V 3/02* [*Sleeper: patent 175220 Rus. Federation: IPC[51] E01V 3/02*]. V. V. Govorov, M. S. Chusovitin; patent applicant and patent holder Petersburg State Transport University, N 2017117527. Appl. 19.05.2017; publ. 28.11.2017. Bul. N 34. (In Russian)

ГОВОРОВ Вадим Владимирович – д-р техн. наук, профессор, vv.govorov@yandex.ru; ДОРОНИЧЕВА Светлана Андреевна – аспирант, 92.lana@mail.ru; *ЧУСОВИТИН Максим Сергеевич – аспирант, chusmaksimus@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 656.21

Ю. И. Ефименко, М. В. Четчуев, А. Г. Филиппов, М. В. Губарь

ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ЭТАПНОСТИ РАЗВИТИЯ СТАНЦИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ

Дата поступления: 20.02.2018
Решение о публикации: 19.03.2018

Аннотация

Цель: Решение задачи определения оптимальной этапности развития станции или узла при наличии альтернативных вариантов проектных решений. **Методы:** Эффективным инструментом для решения подобного рода задач является динамическое программирование. **Результаты:** Использование предложенного метода обоснования оптимальной этапности развития станции или узла дает возможность выполнить глубокий анализ проектных решений, в том числе при наличии альтернативных вариантов определить наиболее рациональную траекторию развития объекта железнодорожного транспорта. **Практическая значимость:** Применение изложенного метода в реальных проектах строительства, развития или реконструкции станций и узлов позволит обеспечить минимизацию затрат, связанных с их реализацией.

Ключевые слова: Железнодорожные станции, этапность развития, условно-оптимальный переход, альтернативные варианты, проектные решения.

Yuriy I. Efimenko, D. Eng. Sci., professor, zdsu@pgups.ru; ***Maksim Vl. Chetchuyev**, Cand. Eng. Sci., associate professor**,** maxetion@mail.ru; **Anton G. Filippov**, senior lecturer, tigropard10@mail.ru; **Marina V. Gubar**, Cand. Eng. Sci., associate professor, gubarmv@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) OPTIMIZATION PROBLEMS OF PHASES OF RAILROAD STATION DEVELOPMENT IN CASE OF USING ALTERNATIVES OF DESIGN SOLUTIONS

Summary

Objective: To solve the problem of determining optimum phases of development of a station or a junction involving alternatives of design solutions. **Methods:** An efficient tool for the solution of such tasks is dynamic programming. **Results:** Application of the suggested method of justification of optimal phases of railroad station or junction development makes it possible to perform an in-depth analysis of design solutions, as well as to determine the most efficient development path of rail transport facilities involving the alternatives.. **Practical importance:** Application of the stated method in feasible objects of construction, development and reconstruction of stations and junctions will make it possible to provide cost minimization, related to their implementation.

Keywords: Railway stations, development phases, conditionally optimal approach, alternatives, design solutions.

Введение

Для обеспечения эффективности капитальных вложений нормативными документами по проектированию железнодорожных станций и узлов, начиная с первых их изданий – «Технических условий проектирования станций» (ТУПС) 1926 и 1933 гг. [1, 2] и доныне действующих «Правил и технических норм проектирования станций и узлов на железных

дорогах колеи 1520 мм» [3], строительство железнодорожных узлов и крупных станций предусматривается по этапам.

При этом еще в середине XIX в. И. Ф. Рербергом было предложено разрабатывать детальные проекты развития станций и узлов на отдаленную перспективу, но реализовывать их постепенно (поэтапно) по мере увеличения размеров движения [4]. Этот принцип был поддержан С. Д. Карейшей [5] и Э. Л. Фишером [6], в дальнейшем наиболее четко были сформулированы требования к этапности развития в ТУПС-33, где уже конкретно указывалось, что отдельные этапы развития станции или узла должны получаться из проекта полного развития путем выбрасывания не требующихся на этих этапах путей и устройств. Последующее развитие, как правило, должно происходить без коренного переустройства, путем лишь постепенного добавления парков или отдельных путей и развития станционных обустройств.

Понятие оптимальной этапности развития станций и выбор критерия оптимальности

Поэтапное развитие означает, что первоначальная пропускная (перерабатывающая)[1] способность станции или узла предусматривает обеспечение бесперебойной работы только на определенный, начальный, период эксплуатации, после чего мощность необходимо наращивать. Наращивание осуществляют скачкообразно, что связано с дискретным увеличением пропускной способности при добавлении числа путей или улучшении технического оснащения станции.

Под оптимальным вариантом этапности развития железнодорожных станций понимают такую последовательность мероприятий по усилению их путевого развития и технического оснащения и таких сроков реализации этих мероприятий, которые в совокупности с прогрессивной технологией работы обеспечивают минимум критерия оптимальности (эффективности). Другими словами, оптимальная этапность характеризует собой оптимальную траекторию изменения наличной мощности станционных устройств в координатах «время–состояние».

Поскольку сравниваемые варианты этапности развития станций отличаются друг от друга только размерами и сроками капитальных вложений, а также эксплуатационными расходами, в качестве критерия оптимальности обычно рекомендуется использовать минимум приведенных строительно-эксплуатационных расходов, определяемых из выражений [7]

$$\mathcal{Э}_{\text{опт}} = \min\left(\sum_{t=0}^{T} K_t \frac{1}{(1+E)^t} + (1-\gamma)\sum_{t=0}^{T} C_t \frac{1}{(1+E)^t} \right), \quad (1)$$

где K_t, C_t – соответственно капиталовложения и эксплуатационные расходы на t-м шаге расчета; t – шаг расчета, равный одному году; T – горизонт расчета, равный продолжительности расчетного периода; E – норма дисконта; γ – доля налоговых отчислений от прибыли, которая при определении общественного эффекта принимается равной нулю.

Следует иметь в виду, что формула (1) справедлива лишь в том случае, если при любом варианте этапности в конце расчетного периода имеет место одинаковое техническое состояние объекта. Между тем определение этого состояния в любой год, в том числе и в конце расчетного периода, является одной из главных задач оптимизации этапности. Потому очень важно оценить варианты этапности с различным техническим состоянием в конце расчетного периода.

Для реализации такой возможности целесообразно использовать предложенный В. Н. Лившицем [8] способ учета различия между вариантами этапности непосредственно в момент T. Для этого из суммарных затрат

[1] В дальнейшем пропускную (перерабатывающую) способность будем именовать обобщенно «мощностью».

по каждому варианту технического состояния необходимо вычесть остаточную стоимость фондов, рассчитанную на момент T и приведенную к началу расчетного периода. В данном случае критерий оптимальности примет вид

$$\Э_{T,j}^{\text{опт}} = \min\left(\begin{array}{c}\sum\limits_{t=0}^{T} K_t \dfrac{1}{(1+E)^t} + \\ +\sum\limits_{t=0}^{T} C_t \dfrac{1}{(1+E)^t} - K_{T,j}^{\text{ост}} \dfrac{1}{(1+E)^T}\end{array}\right). \quad (2)$$

Входящая в выражение (2) остаточная стоимость представляет собой сумму остаточных стоимостей объектов, введенных до T-го года и прослуживших меньше установленного срока службы. Остаточная стоимость каждого объекта, проработавшего $\theta_{\text{лет}}(\theta \le t_{\text{сл}})$, может быть рассчитана, согласно [8], по формуле

$$K_{\theta j}^{\text{ост}} = \frac{(K_j - K_j^{\text{л}})((1+E)^{t_j^{\text{сл}}} - (1+E))}{(1+E)^{t_j^{\text{сл}}} - 1} - K_j^{\text{л}}, \quad (3)$$

в которой K_j и $K_j^{\text{л}}$ – соответственно первоначальная и ликвидная стоимость объекта.

Из выражения (3) следует, что при $\theta_j = t_j^{\text{сл}}$ $K_j^{\text{ост}} = K_j^{\text{л}}$, а при $\theta_j = 0$ $K_j^{\text{ост}} = K_j$.

Наличная мощность устройств станции определяется ее путевым развитием, техническим оснащением и технологией работы. Совокупность параметров, характеризующих уровень технического оснащения и технологического обеспечения станции (число путей в парках, схема их взаимного расположения, количество маневровых локомотивов, бригад пункта технического обслуживания (ПТО), пункта коммерческого обслуживания (ПКО) и смен их работы, число надвижных, спускных и обходных путей, а также средства автоматизации на сортировочной горке и др.), составляет вариант технического состояния станции. Изменение хотя бы одного параметра переводит станцию в другое состояние. Сочетание таких параметров должно быть не произвольным, а сбалансированным, т. е. таким, чтобы каждый элемент станции обеспечивал определенный, общий для всех элементов уровень пропускной способности.

В практике проектирования этапы развития станции или узла принято разграничивать моментами перехода из одного технического состояния в другое, совпадающими с вводом в эксплуатацию дополнительных путей, парков, новых устройств автоматики и др., что может быть реализовано с сохранением или изменением принципиальной схемы станции или узла. Если развитие станции или узла осуществляют в рамках одной принципиальной схемы, то каждый из вариантов технического состояния может быть потенциальным этапом развития, но становится он таковым, если будет установлено, что результат технико-экономических расчетов попадает на траекторию оптимальной стратегии изменения технического состояния объекта в координатах «время–состояние». Если же в проекте рассматривается целесообразность перехода от существующей принципиальной схемы к другим схемам, то тогда и возникают *альтернативные варианты* технического состояния, разрабатываемые *для одинаковых размеров и характера работы*, из которых потенциальным этапом будет лучший из изучаемых альтернативных вариантов.

Основными факторами, определяющими оптимальную этапность развития станций и узлов, являются: начальные значения, темпы роста, характер и возможные колебания прогнозируемых перспективных величин объемов работ, определяемые точностью прогноза; тенденции изменения во времени стоимостных показателей (удельных нормативов капитальных вложений) и эксплуатационных расходов; параметры неравномерности поступления и обработки поездов, составов или вагонов.

Выбор метода решения задачи

При обосновании этапности развития станций возникает большое число сочетаний значений их параметров, которое обусловливает

множество возможных вариантов технического состояния. Если же учесть, что переходы от одного состояния можно осуществлять к целому ряду других состояний и, кроме того, реализованность их в любой год расчетного периода T, то становится ясным, что число вариантов этапности развития крупных станций и, тем более, узлов представляет весьма большую, хотя и конечную величину. Естественно, что рассмотреть все варианты в реальных условиях проектирования невозможно и необходим метод, позволяющий свести размерность задачи к приемлемому значению.

Начиная с конца 1960-х годов в НИИЖТе, МИИТе, БелИИЖТе, ВНИИЖТе, ИКТП, ЛИИЖТе разрабатывают методы оптимизации этапности развития станций, преимущественно сортировочных, в которых используют различные методы, такие как сплошной перебор вариантов, метод итераций, динамическое программирование, метод ветвей и границ [9–21]. В большинстве разработок использован метод динамического программирования, предложенный Р. Беллманом [9], который основан на разбиении вычислительного процесса на отдельные шаги.

В пределах каждого шага вычислений сначала определяют набор условно-оптимальных управлений $U(t)$, в результате которых станция переходит из одного состояния в другое (U_j^i) или остается без изменения (U_i^i). Затем на последнем шаге наилучший вариант развития системы находят путем прохождения в обратном направлении по найденным условно-оптимальным переходам. Задача может решаться в прямом и обратном направлениях. Поскольку при проектировании станций и узлов чаще приходится иметь дело с развитием существующих объектов, начальное состояние которых известно, оптимизацию этапности их развития целесообразно решать в прямом направлении. При этом условно-оптимальные переходы на каждом шаге устанавливают с учетом всех предыдущих шагов от начала расчетного периода. Таким образом, задача оптимизации может быть разделена на три части: пошаговый расчет критерия эффективности и определение условно-оптимальных переходов; выбор оптимального варианта технического состояния в конце расчетного периода; выявление оптимального пути развития.

Методика определения условно-оптимальных переходов

Для поиска оптимального решения при обосновании этапности развития станций и узлов целесообразно использовать алгоритм «киевский веник», предложенный М. М. Моисеевым, который является одним из наиболее эффективных алгоритмов для решения аддитивных задач [10]. Алгоритм представляет собой многошаговый процесс, на каждом шаге которого производится «отметание» некоторого множества вариантов, о котором в процессе работы алгоритма становится известно, что оно не содержит оптимального варианта. Процесс «отметания» для случая устойчивого роста объемов работы во времени проиллюстрирован на рис. 1.

Пусть на шаге $t-1$ станция может иметь n состояний, обеспечивающих освоение заданных размеров работы:

$$S_{t-1,1},\ S_{t-1,2},\ldots,S_{t-1,i},\ S_{t-1,j},\ldots,\ S_{t-1,n}.$$

Каждому из этих состояний соответствуют значения общих приведенных строительно-эксплуатационных затрат от начала расчетного периода $Э_{t-1}^{\text{опт}}$, $Э_{t-1,2}^{\text{опт}},\ldots,$ $Э_{t-1,i}^{\text{опт}}$, $Э_{t-1,j}^{\text{опт}},\ldots,$ $Э_{t-1,n}^{\text{опт}}$. Переход станции на шаге t продолжительностью 1 год в состояние $S_{t,j}$ возможен из всех состояний от $S_{t-1,i}$ до состояния $S_{t-1,j}$ в результате управлений U_1^j, U_2^j, …, U_i^j, U_j^j. При этом в зависимости от управления критерий оптимальности будет принимать следующий вид:

$$\left.\begin{aligned}
Э_{t,j}(U_1^j) &= Э_{t-1,1}^{\text{опт}} + \Delta Э_{t,j}(U_1^j);\\
Э_{t,j}(U_2^j) &= Э_{t-1,2}^{\text{опт}} + \Delta Э_{t,j}(U_2^j);\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
Э_{t,j}(U_i^j) &= Э_{t-1,i}^{\text{опт}} + \Delta Э_{t,j}(U_i^j);\\
Э_{t,j}(U_j^j) &= Э_{t-1,j}^{\text{опт}} + \Delta Э_{t,j}(U_j^j).
\end{aligned}\right\}$$

В этой формуле $\Delta Э_{t,j}(U_1^j)$, $\Delta Э_{t,j}(U_2^j)$, $\Delta Э_{t,j}(U_i^j)$, $\Delta Э_{t,j}(U_j^j)$ – приращения критерия эффективности на шаге t для достижения состояния $S_{t,j}$ при переходных $U_1^j, U_2^j, \ldots, U_i^j, U_j^j$.

Приращение критерия эффективности в год t при переходе от состояния S_j определялось из выражения

$$\Delta Э_{t,j}(U_i^j) = K_{i \to j}\alpha_t + C_{t,i}\alpha_t.$$

Оптимальным переходом на шаге t для достижения состояния $S_{t,j}$ будет тот, который обеспечивает $\min Э_{t,j}$. Он запоминается, а все остальные переходы из дальнейшего рассмотрения исключаются (отметаются). Для следующего шага используется значение $Э_{t,j}^{опт} = \min Э_{t,j}$. Таким образом, для каждого варианта технического состояния на каждом шаге оптимизации существует единственный переход, который дает минимум критерия эффективности.

Результаты расчетов по выбору условно-оптимальных переходов, а на их основе и оптимальной этапности развития для наглядности и последующего анализа можно представлять в графической форме в трех вариантах в виде:

– полного графа переходов, в узлах которого проставляются величины $Э_{t,j}^{опт}$ $(t = 1, 2, \ldots, T; j = 1, 2, \ldots, n)$, а на соединяющих узлы дугах – приращения приведенных расходов на соответствующих шагах при соответствующих переходах значения $\Delta Э_{t,j}(U_i^j)$ $(t = 1, 2, \ldots, T; j = 1, 2, \ldots, n; i = 1, 2, \ldots, j)$. Дуги, соответствующие условно-оптимальным переходам, отметаются (см. рис. 2, крестики);

– графика условно-оптимальных переходов, построенного из графа переходов путем исключения всех переходов, кроме условно-оптимальных (рис. 3);

– графика оптимальной этапности развития, характеризующего оптимальную траекторию развития станций или узла в координатах

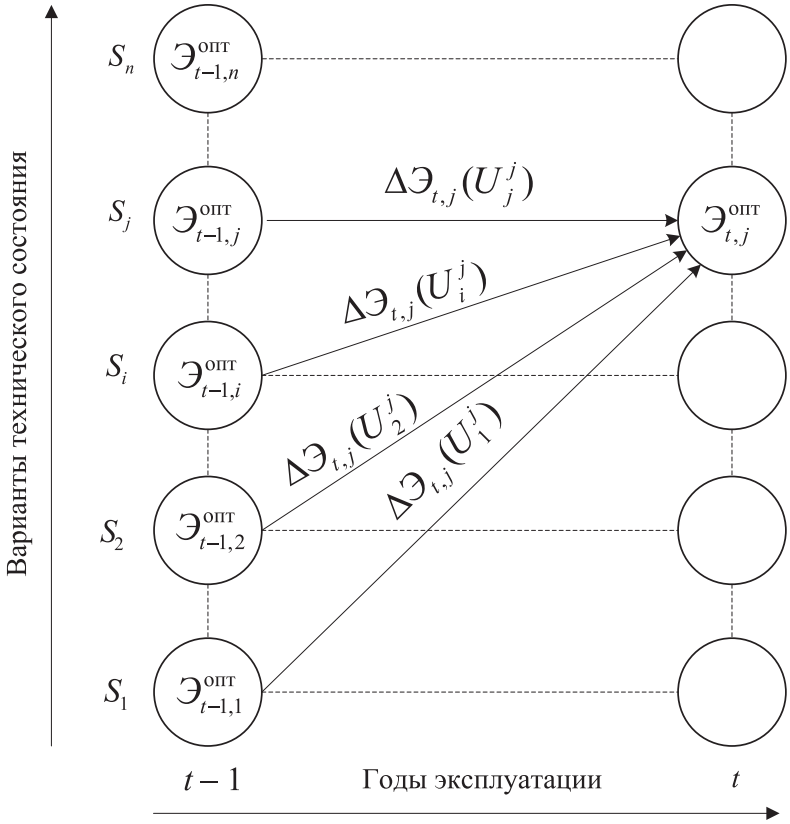


Рис. 1. Схема выбора условно-оптимальных переходов

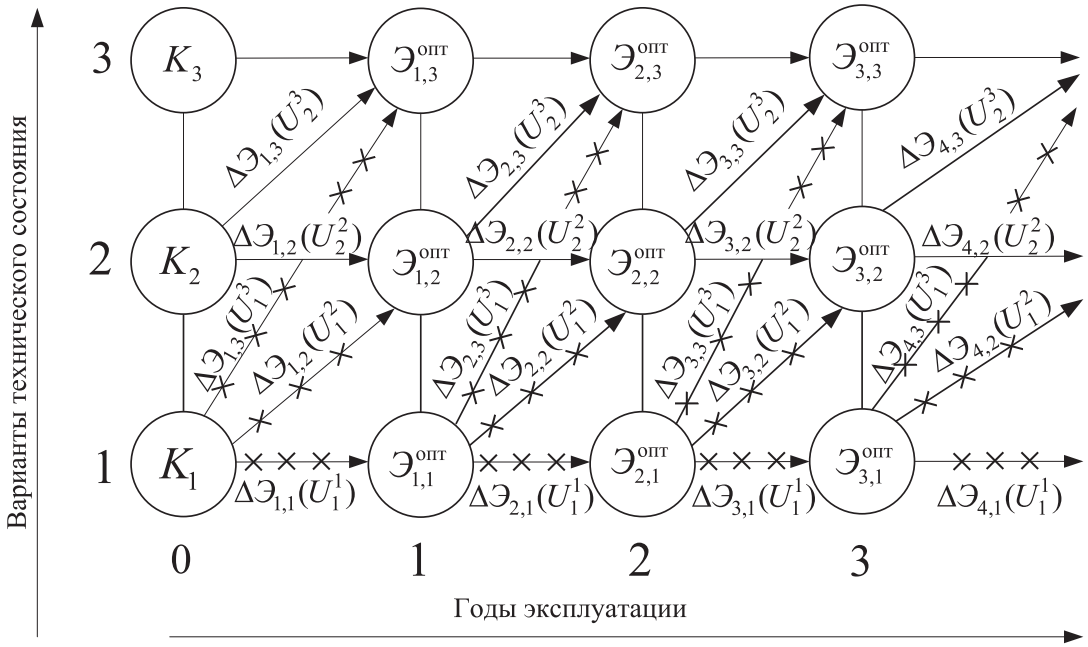


Рис. 2. Форма графа переходов

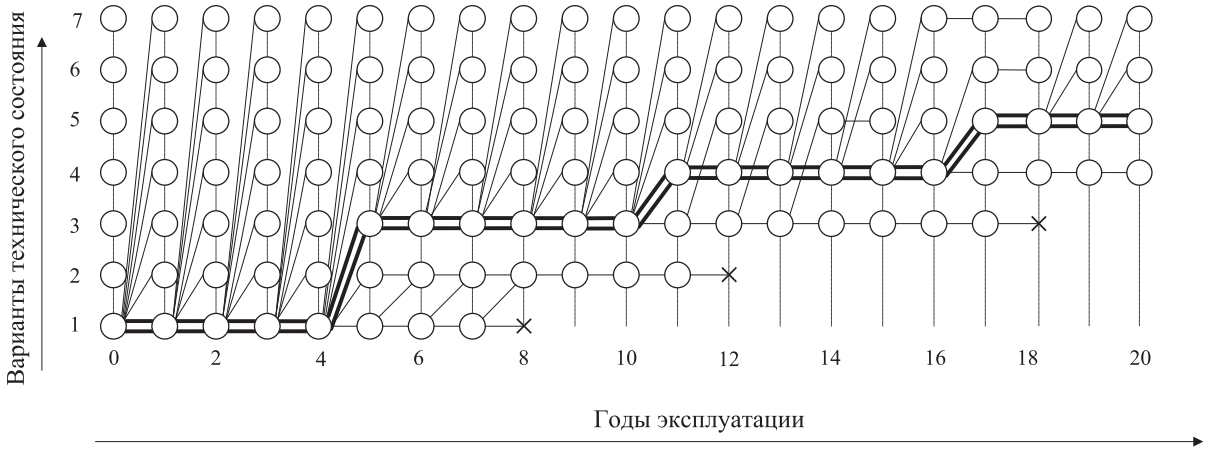


Рис. 3. Форма графика условно-оптимальных переходов

«время–состояние» (показан на рис. 3 двойной линией).

Полный граф переходов обычно необходим для принятия решений в случае наличия ограничений на реализацию оптимальной этапности развития. В остальных случаях достаточно иметь графики условно-оптимальных переходов (для выявления траекторий, близких к оптимальной) или график оптимальной этапности.

Подготовка исходных данных для выбора варианта этапности развития

Подготовка исходных данных для решения задачи оптимизации этапности развития каждой станции или узла представляет собой наиболее важную часть этой задачи, поскольку алгоритм и программа вычислительной процедуры оптимизации являются универсальными для любого проекта. Подготовка включает:

– формирование и разработку вариантов технического состояния проектируемого объекта и переходов между ними;

– определение объемов работы и капитальных вложений для реализации каждого из намеченных вариантов, представляемое в виде массива исходных капиталовложений $\{K_j\} = K_1, K_2, \ldots, K_n$;

– вычисление капитальных вложений для перехода от каждого варианта технического состояния ко всем возможным другим. При растущих объемах работы переходы возможны только в вариантах с большим уровнем пропускной способности, а при снижающихся объемах – к вариантам с меньшей пропускной способностью. Результаты расчетов заносят в матрицу капитальных вложений K_i^j, часть которой, лежащую выше диагонали с нулевыми значениями, используют для расчетов с растущими размерами работы, а лежащую ниже диагонали – для уменьшающихся объемов работы;

– определение годовых эксплуатационных расходов по вариантам технического состояния и годам расчетного периода для получения матрицы эксплуатационных расходов $C_{t,j}$.

В расчет стоимостных показателей, необходимых для обоснования рациональной этапности развития станций и узлов, следует включать только *учитываемые* капитальные вложения и эксплуатационные расходы, которые представляют собой часть общих затрат, предназначенных для усиления и эксплуатации основных устройств станций или узлов, без которых невозможно освоение растущих объемов работы.

Состав учитываемых капиталовложений и эксплуатационных расходов будет зависеть от вида проектируемой станции: участковая, пассажирская, сортировочная или грузовая. Установление состава учитываемых затрат должно предшествовать выполнению экономических расчетов и играет решающую роль для правильного определения наиболее рациональной этапности развития рассматриваемой станции или узла.

Наиболее сложной и трудоемкой задачей при подготовке исходных данных является разработка и оценка вариантов технического состояния проектируемого объекта, для каждого из которых нужно запроектировать масштабный план, на основе которого подсчитать объемы и стоимость строительства, которые войдут в массив исходных капиталовложений. Далее следует разработать проекты переустройства для реализации всех возможных переходов между вариантами технического состояния и подсчитать стоимости переустройства для матрицы капитальных вложений. Учитывая большой объем работ, необходимо стремиться к минимизации числа вариантов технического состояния.

Особенности решения задачи при наличии альтернативных вариантов технического состояния

В процессе развития станции или узла эффективным может стать переход от существующей к другой принципиальной схеме путевого развития, и момент целесообразности этого перехода должен быть установлен в процессе оптимизации этапности развития путем сравнения различных вариантов схемных решений, которые обычно именуют *альтернативными вариантами* технического состояния. Их разрабатывают для одинаковых размеров и характера работы.

Например, участковые станции могут быть поперечного, продольного и полупродольного типов. На однопутных линиях лучше технико-экономическими показателями обеспечиваются, как правило, участковые станции поперечного типа, а на двухпутных линиях более экономичными становятся схемы продольного или полупродольного типа. На сортировочных станциях основные парки в сортировочных схемах могут иметь параллельное, последовательное или комбинированное расположение, а сортировочных систем может быть одна или две. Аналогично можно привести вариант схем других крупных станций, на ко-

торых при оптимизации этапности развития целесообразно рассматривать альтернативные варианты технического состояния.

Наличие альтернативных вариантов характерно и для железнодорожных узлов, причем здесь варианты технического состояния могут отличаться не только взаимным расположением, но и числом станций и их специализацией, а также наличием или отсутствием обходов узла, предназначенных чаще всего для пропуска транзитных вагонопотоков в обход основных станций узла и отдаления за счет этого необходимости и сроков усиления существующих станций узла.

При развитии парков станции в рамках одной принципиальной схемы общее число вариантов технического состояния в течение расчетного периода должно быть не менее $\frac{(N_{\text{п}} - N_1)}{12}$, где $N_{\text{п}}$, N_1 – размеры движения последнего и первого годов расчетного периода; 12 – число поездов, приходящихся по действующим нормам проектирования на 1 приемоотправочный путь.

Если же оценивается целесообразность перехода в течение расчетного периода от существующей принципиальной схемы станции к другой, более прогрессивной, то число разрабатываемых вариантов технического состояния станции или узла увеличивается при рассмотрении двух принципиальных схем в 2 раза, а трех схем – в 3 раза.

Аналогично определяется и число вариантов технического состояния, если меняется не принципиальная схема станции, а схема развязки маршрутов при наличии двух и более подходов к парку. В этом случае для каждой градации размеров движения по каждому подходу $N_1, N_2, \ldots, N_{\text{п}}$ необходимо изучить три варианта развязок маршрутов:

– в одном уровне без устройств шлюзов;

– в одном уровне с сооружением шлюзов;

– в разных уровнях со строительством путепроводной развязки.

При этом каждый вариант технического состояния путевого развития парков узловой станции должен быть рассмотрен в сочетании с тремя указанными выше альтернативными вариантами развязки маршрутов.

Наличие альтернативных вариантов технического состояния станций требует особого порядка нумерации вариантов и контроля за переходами между вариантами. Например, для узловых станций все оцениваемые варианты необходимо разделить на группы по 3 варианта, в каждой из которых путевое развитие, а следовательно, и пропускная способность без учета развязок маршрутов будут практически одинаковыми. Группы следует располагать в порядке увеличения пропускной способности и пронумеровать варианты последовательно так, чтобы первый вариант в каждой группе относился к пересечениям маршрутов в одном уровне без шлюзов, второй – в одном уровне со шлюзами и третий – к пересечениям в разных уровнях. Учитывая трудоемкость разработки и оценки вариантов переходов от существующих к другим вариантам технического состояния, при наличии альтернативных вариантов необходимо выявить и отбросить нелогичные и заведомо нерациональные переходы, что позволит избавиться от ненужных расчетов.

Для участковых станций при растущих размерах работы следует исключать переходы от схем станций продольного или полупродольного типа к схемам поперечного типа, а для сортировочных станций – от двусторонних схем к односторонним.

Для узловых станций нужно исключать переходы от варианта с путепроводной развязкой к вариантам со значительным числом путей в парках (с большим номером), но с пересечением маршрутов в одном уровне без шлюзов или с ними, а от вариантов со шлюзом – к вариантам с пересечением маршрутов в одном уровне без шлюза. Отсечь нелогичные или неприемлемые по другим причинам переходы между вариантами легче всего заданием в матрице капитальных вложений для таких переходов заведомо завышенных значений капиталовложений.

Матрица капитальных вложений при устойчиво растущих объемах работы будет иметь

Капиталовложения, необходимые для перехода к вариантам технического состояния (млн руб.)

Исходный вариант технического состояния	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	…	$n-2$	$n-1$	n
1	0	K_{1-2}	K_{1-3}	K_{1-4}	K_{1-5}	K_{1-6}	…	$K_{1-(n-2)}$	$K_{1-(n-1)}$	K_{1-n}
2		0	K_{2-3}	99 999	K_{2-5}	K_{2-6}	…	99 999	$K_{2-(n-1)}$	K_{2-n}
3			0	99 999	99 999	K_{3-6}	…	99 999	99 999	K_{3-n}
4				0	K_{4-5}	K_{4-6}	…	$K_{4-(n-2)}$	$K_{4-(n-1)}$	K_{4-n}
5					0	K_{5-6}	…	99 999	$K_{5-(n-1)}$	K_{5-n}
6						0	…	99 999	99 999	K_{6-n}
. . .							… … …	. . .	. . .	. . .
$n-2$								0	$K_{(n-2)-(n-1)}$	$K_{(n-2)-n}$
$n-1$									0	$K_{(n-1)-n}$
n										0

вид, представленный в таблице. При этом алгоритм расчетов должен не допускать переходов к вариантам технического состояния с меньшим номером против исходного варианта.

Заключение

Использование альтернативных вариантов технического состояния железнодорожных станций и узлов при обосновании рациональной этапности их развития позволяет проводить более глубокий анализ возможных проектных решений, хотя и требует значительного увеличения подготовительной работы и объемов вычислений.

Для сокращения объемов масштабного проектирования и экономической оценки переходов между вариантами технического состояния необходимы особый порядок их нумерации и исключение нелогичных или заведомо нерациональных переходов.

В полном объеме задача оптимизации этапности развития железнодорожных станций и узлов может быть решена только при создании полноценной автоматизированной системы их проектирования.

Библиографический список

1. Технические условия проектирования станций для дорог нормальной колеи. – М. : Транспечать, 1926. – 39 с.

2. Технические условия проектирования станций для дорог нормальной колеи. – М. : Транспечать, 1933. – 128 с.

3. Правила и технические нормы проектирования станций и узлов на железных дорогах колеи 1520 мм. – М. : Техинформ, 2003. – 168 с.

4. Рерберг И. Ф. Правила для расположения путей, зданий и прочих принадлежностей при проектировании станций железных дорог / И. Ф. Рерберг. – СПб. : [Б. и.], 1868. – 28 с.

5. Карейша С. Д. О проектировании расположения путей и зданий на станциях железных дорог / С. Д. Карейша. – СПб. : Тип. Ю. Н. Эрлих, 1902. – 23 с.

6. Фишер Э. Л. Записка об упорядочении путевых устройств железнодорожных станций, в частности Петроградского узла / Э. Л. Фишер. – Пг. : [Б. и.], 1917. – 46 с.

7. Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов на железнодорожном транспорте. – Приложение к указанию МПС Рос-

сии от 31.08.98 № В–1024у/МПС РФ. – М. : МПС РФ, 1998. – 123 с.

8. Лившиц В. Н. Выбор оптимальных решений в технико-экономических расчетах / В. Н. Лившиц. – М. : Экономика, 1971. – 255 с.

9. Быкадоров А. В. К расчету оптимальных сроков развития железнодорожного объекта / А. В. Быкадоров // Вопросы проектирования и организация работы станций : труды НИИЖТ. – Новосибирск : Изд-во НИИЖТ, 1969. – С. 18–28.

10. Булавченко И. Д. Об этапности переустройства станций / И. Д. Булавченко // Вопросы эксплуатации железных дорог : труды НИИЖТ. – Новосибирск : Изд-во НИИЖТ, 1971. – Вып. 131. – С. 93–105.

11. Наяшков Ю. П. Особенности технико-экономических расчетов при многоочередном развитии сортировочных станций / Ю. П. Наяшков // Вопросы технологии проектирования и расчета технических средств железнодорожных и промышленных узлов : труды МИИТ. – М. : Изд-во МИИТ, 1973. – Вып. 447. – С. 90–101.

12. Архангельский Е. В. Выбор этапного развития станций / Е. В. Архангельский // Повышение эффективности использования технических средств на железных станциях : труды ВНИИЖТ. – М. : Транспорт, 1986. – С. 3–18.

13. Сотников Е. А. Развитие сортировочных станций при увеличении провозной способности / Е. А. Сотников // Железнодорожный транспорт. – 1975. – № 10. – С. 28–32.

14. Грунтов П. С. Прогнозирование оптимальной этапности развития сортировочных станций на перспективный период / П. С. Грунтов // Оптимизация технологических процессов на сортировочных станциях и участках : труды БелИИЖТ. – Гомель : Изд-во БелИИЖТ, 1976. – Вып. 152. – С. 3–23.

15. Правдин Н. В. Сортировочные станции (теория, практика, прогнозы). Ч. III : учеб. пособие / Н. В. Правдин, Т. С. Банеос, В. Я. Негрей. – Гомель : Изд-во БелИИЖТ, 1980. – 82 с.

16. Ефименко Ю. И. Обоснование этапности развития железнодорожных станций и узлов : дис. … д-ра техн. наук / Ю. И. Ефименко. – СПб. : ПИИТ, 1992. – 394 с.

17. Олейникова Л. А. Сферы применения односторонних и двусторонних сортировочных станций при росте и спаде объемов переработки вагонов : автореф. дис. … канд. техн. наук / Л. А. Олейникова. – СПб. : ПГУПС, 2006. – 26 с.

18. Губарь М. В. Обоснование параметров и рациональных схем пограничных передаточных станций : автореф. дис. … канд. техн. наук / М. В. Губарь. – СПб. : ПГУПС, 2007. – 24 с.

19. Куклев Д. Н. Обоснование целесообразности сооружения обходов железнодорожных узлов : автореф. дис. … канд. техн. наук / Д. Н. Куклев. – СПб. : ПГУПС, 2007. – 24 с.

20. Сугоровский А. В. Обоснование этапности развития пассажирских технических станций : автореф. дис. … канд. техн. наук / А. В. Сугоровский. – СПб. : ПГУПС, 2010. – 16 с.

21. Четчуев М. В. Обоснование этапности развития горловин железнодорожных станций : дис. … канд. техн. наук / М. В. Четчуев. – СПб. : ПГУПС, 2012. – 176 с.

References

1. *Tekhnicheskiye usloviya proyektirovaniya stantsiy dlya dorog normalnoy kolei* [*Technical requirements for constructing the stations for full gauge railways*]. Moscow, Transpechat Publ., 1926, 39 p. (In Russian)

2. *Tekhnicheskiye usloviya proyektirovaniya stantsiy dlya dorog normalnoy kolei* [*Technical requirements for constructing the stations for full gauge railways*]. Moscow, Transpechat Publ., 1933, 128 p. (In Russian)

3. *Pravila i tekhnicheskiye normy proyektirovaniya stantsiy i uzlov na zheleznykh dorogakh kolei 1520 mm* [*Rules and engineering standards of designing the stations and junctions for 1520 mm gauge railways*]. Moscow, Tekhinform Publ., 2003, 168 p. (In Russian)

4. Rerberg I. F. *Pravila dlya raspolozheniya putey, zdaniy i prochykh prinadlezhnostey pry proyektirovanii stantsiy zheleznykh dorog* [*Rules for arrangement of lines, buildings and other equipment in the process of railway stations design*]. Saint Petersburg, [B. i.], 1868, 28 p. (In Russian)

5. Kareisha S. D. *O proyektirovanii raspolozheniya putey i zdaniy na stantsiyakh zheleznikh dorog* [*On engineering design of lines and buildings arrangement at railway stations*]. Saint Petersburg, Y. N. Erlikh Typography Publ., 1902, 23 p. (In Russian)

6. Fisher E. L. *Zapiska ob uporyadochenii putevykh ustroystv zheleznodorozhnykh stantsiy*, *v chastnosty Petrogradskogo uzla* [*A report on ordering railway track side facilities*, *particularly the Petrograd junction*]. Petrograd, [B.i.], 1917, 46 p. (In Russian)

7. *Metodicheskiye rekomendatsii po otsenke investitsionnikh proyektov na zheleznodorozhnom transporte* [*Guidelines on the assessment of investment projects on railroad transport*]. Prilozheniye k ukazaniyu MPS Rossii ot 31.08.98 no. V [1024u/MPS RF – Supplement to recommendations of the Ministry of Railways of the Russian Federation dated 31.08.98 N V – 1024u/MPS RF]. Moscow, Ministry of Railways of the Russian Federation Publ., 1998, 123 p. (In Russian)

8. Livshits V. N. *Vybor optimalnykh resheniy v tekhniko-ekonomicheskykh raschetakh* [*The selection of optimal solutions in technical and economic calculations*]. Moscow, Ekonomika Publ., 1971, 255 p. (In Russian)

9. Bykadorov A. V. K raschetu optimalnykh srokov razvitiya zheleznodorozhnogo objekta [On computation of optimum development time-frame of railway objects]. *Voprosy proektirovaniya i organizatsii raboty stantsiy: trudy NIIZhTa* [*The issues of engineering design and organization of stations functioning: NIIZhT proceedings*]. Novosibirsk, NIIZhT Publ., 1969, pp. 18–28. (In Russian)

10. Bulavchenko I. D. Ob etapnosty pereustroistva stantsiy [On staging of stations modification]. *Voprosy ekspluatatsii zheleznykh dorog: trudy NIIZhTa* [*The issues of railway operation: NIIZhT proceedings*]. Novosibirsk, NIIZhT Publ., 1971, vol. 131, pp. 93–105. (In Russian)

11. Nayashkov Y. P. Osobennosty tekhniko-ekonomicheskykh raschetov pry mnogoocherednom razvitiii sortirovochnykh stantsiy [The specificities of technical and economic computations under multi-successive development of marshalling yards]. *Voprosy tekhnologii proektirovaniya i rascheta tekhnicheskykh sredstv zheleznodorozhnykh i promyshlennykh uzlov: trudy MIITa* [*The issues of design engineering practice and technical facilities of railway junctions and industrial hubs: MIIT proceedings*]. Moscow, MIIT Publ., 1973, vol. 447, pp. 90–101. (In Russian)

12. Arkhangelskiy Y. V. Vybor etapnogo razvitiya stantsiy [The selection of landmark development of stations]. *Povysheniye effektivnosty ispolzovaniya tekhnicheskykh sredstv na zheleznykh stantsiyakh: trudy VNIIZhTa* [*Efficiency upgrading of using technical facilities at railroad stations: VNIIZhT proceedings*]. Moscow, Transport Publ., 1986, pp. 3–18. (In Russian)

13. Sotnikov Y. A. Razvitiye sortirovochnykh stantsiy pry uvelichenii provoznoy sposobnosty [The development of classification yards in case of carrying capacity increase]. *Zheleznodorozhniy transport* [*Railroad transport*], 1975, no. 10, pp. 28–32. (In Russian)

14. Gruntov P. S. Prognozirovaniye optimalnoy etapnosty razvitiya sortirovochnykh stantsiy na perspektivniy period [Predicting future demand in optimum staging of marshalling yards development]. *Optimizatsiya tekhnologicheskikh protsessov na sortirovochnykh stantsiyakh i uchastkakh: trudy BelIIZhTa* [*Process optimization at classification yards and districts: BelIIZhT proceedings*]. Gomel, BelIIZhT (Belarusian State University of Transport) Publ., 1976, vol. 152, pp. 3–23. (In Russian)

15. Pravdin N. V., Baneos T. S. & Negrey V. Y. *Sortirovochniye stantsii (teoriya*, *praktika*, *prognozy)* [*Classification yards (theory*, *practice*, *predictions)*]. Gomel, BelIIZhT (Belarusian State University of Transport) Publ., 1980, 82 p. (In Russian)

16. Efimenko Y. I. *Obosnovaniye etapnosty razvitiya zheleznodorozhnikh stantsiy i uzlov: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [*Justification of phases of railway stations and junctions development: diss. ...D. Eng*]. Saint Petersburg, PIIT Publ., 1992, 394 p. (In Russian)

17. Oleynikova L. A. *Sphery prymeneniya odnostoronnikh i dvustoronnikh sortirovochnykh stantsiy pry roste i spade obyemov pererabotky vagonov: avtoref. ... kand. tekhn. nauk* [*Application spheres of one-way and dual-sided classification yards in case of growth and decline of yard operation volumes: abstr. of a thesis ...Cand. Eng.*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2006, 26 p. (In Russian)

18. Gubar M. V. *Obosnovaniye parametrov i ratsionalnykh skhem pogranichnykh peredatochnykh stantsiy: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk.* [*Justification of parameters and effective layouts of frontier transfer stations: abstr. of a thesis ...Cand. Eng.*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2007, 24 p. (In Russian)

19. Kuklev D. N. *Obosnovaniye tselesoobraznosty sooruzheniya obkhodov zheleznodorozhnykh uzlov: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [*Appropriateness*

justification of constructing bypasses of railway junctions: abstr. of a thesis …Cand. Eng.]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2007, 24 p. (In Russian)

20. Sugorovskiy A.V. *Obosnovaniye etapnosty razvitiya passazhirskikh tekhnicheskikh stantsiy: avtoref. dis. … kand. tekhn. nauk* [*Justification of phases of coach yards development: abstr. of a thesis …Cand. Eng.*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2010, 16 p. (In Russian)

21. Chetchuyev M.V. *Obosnovaniye etapnosty razvitiya gorlovin zheleznodorozhnykh stantsiy: dis. … kand. tekhn. nauk* [*Justification of phases of yard necks development: abstr. of a thesis …Cand. Eng.*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2012, 176 p. (In Russian)

ЕФИМЕНКО Юрий Иванович – д-р техн. наук, профессор, zdsu@pgups.ru; *ЧЕТЧУЕВ Максим Владимирович – канд. техн. наук, доцент, maxetion@mail.ru; ФИЛИППОВ Антон Геннадьевич – старший преподаватель, tigropard10@mail.ru; ГУБАРЬ Марина Васильевна – канд. техн. наук, доцент, gubarmv@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 624.042.7

И. О. Кузнецова, О. Б. Сабирова, А. М. Уздин, Юань Чанг

ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТОВ СОЧЕТАНИЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ И ПОДВИЖНОЙ НАГРУЗОК ДЛЯ МОСТОВ С СОВМЕЩЕННЫМ ДВИЖЕНИЕМ[1]

Дата поступления: 29.12.2017
Решение о публикации: 13.02.2018

Аннотация

Цель: Определение коэффициентов сочетаний сейсмической нагрузки с подвижной автомобильной и железнодорожной нагрузками на мост. **Методы:** Рассмотрено множество равновероятных троек нагрузки: сейсмическая, автодорожная, железнодорожная. Сейсмическая нагрузка описывалась в виде потока событий, распределенных по закону Пуассона. Параметры распределения задавались в зависимости от ситуационной сейсмичности на площадке строительства. Для автодорожной нагрузки принято логарифмически нормальное распределение. Вероятность для железнодорожной нагрузки определялась произведением вероятности нахождения поезда на мосту на вероятность того, что вес поезда превысит расчетное значение; вероятность нахождения поезда – в зависимости от грузонапряженности линии. Интервал между поездами принят распределенным по нормальному закону. Для веса поезда принят закон распределения Вейбула. **Результаты:** Получены зависимости коэффициента сочетаний к железнодорожной нагрузке от коэффициентов сочетаний к сейсмической и автодорожной нагрузкам. Приведены данные расчета коэффициентов сочетаний применительно к мостам на дорогах первой категории при ситуационной сейсмичности $I_A = 8$ баллов, $I_B = 9$ баллов, $I_C = 9$ баллов, соответственно по картам *A*, *B* и *C* карт общего сейсмического районирования ОСР-98. Пример расчета выполнен для проектного (ПЗ) и максимального расчетного (МРЗ) землетрясений. Повторяемость ПЗ принята раз в 300 лет, а МРЗ – раз в 1000 лет. **Практическая значимость:** Результаты исследований необходимы для проектирования совмещенных мостов под железную и автомобильную дороги. При этом оказывается возможным учесть грузонапряженность дорог и ситуационную сейсмичность в зоне мостового перехода. Задание единого коэффициента сочетаний для всех мостов и регионов не представляется возможным.

Ключевые слова: Железнодорожная нагрузка, автомобильная нагрузка, сейсмическая нагрузка, коэффициенты сочетаний.

Inna O. Kuznetsova, Cand. Eng. Sci., associate professor; ***Oyposhsha B. Sabirova**, student, sabirovaanna95@yandex.ru; **Alexander M. Uzdin**, D. Eng. Sci., professor, uzdin@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University); **Yuan Chang**, assosiate professor (China University of Petroleum) THE ASSESSMNET OF COMBINATION COEFFICIENTS OF SEISMIC AND LIVE LOADS FOR COMBINED BRIDGES

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 16-58-53095 «Развитие теории предельных состояний для обеспечения сейсмостойкости строящихся и эксплуатируемых железнодорожных мостов» (The study was carried out with financial support of research grants RFBR N 16-58-53095 “The development of the limit states theory for earthquake proofing of being built and operated railway bridges”).

Summary

Objective: To determine combination coefficients of seismic load with live motor and railway loads on the bridge. **Methods:** A set of equally probable triplets of loads was considered: seismic, motor, railway. Seismic load was described as flow of events, distributed according to the law of Poisson. Distribution parameters were set depending on the situational seismic activity at the construction site. Logarithmic lognormal distribution was assigned to motor load. Railway load probability was determined by the product probability of a train being on the bridge by the probability of the fact that the weight of train will exceed the estimated value. Probability of the train presence was determined depending on the freight traffic density of the line. Train interval was set normal. Weibull distribution law was assigned to the weight of train. **Results:** The dependencies of the combination coefficient to railway load from combination coefficients to seismic and motor loads were obtained. The data on calculation of combination coefficients were presented as applied to highway bridges of the first category with situational seismic activity of $I_A = 8$ points, $I_B = 9$ points, $I_C = 9$ points, correspondingly, by *A*, *B* and *C* maps of General Seismic Regionalization OSR-98. A sample calculation was performed for Strength Level Earthquake (PZ) and Maximum Credible Earthquake (MPZ). Occurrence frequency of PZ is accepted to be held once in 300 years, while MPZ – once every 1000 years. **Practical importance:** The research results are necessary for the construction of combined bridges for railways and highways. In this connection, it appears possible to take into account freight traffic density of roads and situational seismic activity in bridge crossing zone. Setting a single combination coefficient for all bridges and regions does not seem possible.

Keywords: Railway load, motor load, seismic load, combination factors.

Теоретические аспекты оценки коэффициентов сочетаний различных нагрузок описаны в литературе [1–5]. Такие задачи применялись и к сочетанию сейсмической и подвижных автомобильной [5] и железнодорожной [2–4, 6, 7] нагрузок. К сожалению, в нормативной базе этот вопрос крайне запутан. Так, при учете сейсмической и автомобильной нагрузок рассматривалось редкое землетрясение с повторяемостью раз в 1000–5000 лет. Это землетрясение можно относить к максимальным расчетным (МРЗ). Естественно, что соответствующий коэффициент сочетаний для автомобильной нагрузки оказался порядка 0,3 [5]. В СП «Транспортные сооружения в сейсмических районах. Правила проектирования» [6] он увеличен и принят равным 0,5. При этом коэффициент сочетаний для сейсмической нагрузки принят равным 0,8.

При учете железнодорожной нагрузки рассматривались относительно частое слабое воздействие (проектное землетрясение – ПЗ) с повторяемостью раз в 100 лет и мост небольшой длины до 100 м. При этом коэффициенты сочетаний для сейсмической и подвижной нагрузок оказались соответственно 0,7 и 0,8.

В [4] даны аккуратные рекомендации по назначению коэффициентов сочетаний сейсмической и железнодорожной нагрузок в зависимости от интенсивности движения и длины моста.

Прежде чем переходить к расчету коэффициентов сочетаний для мостов под совмещенную железнодорожную и автодорожную езду, отметим, что автомобильная нагрузка постоянно находится на мосту. Что касается железнодорожной нагрузки, то мост длиной менее 1 км значительную часть времени стоит пустой. Таким образом, вероятность $P_{\text{жд}}$ того, что железнодорожная нагрузка $Q_{\text{жд}}$ превысит расчетное значение $Q_{\text{жд}}^{(\text{расч})}$, определяется формулой

$$P_{\text{жд}} = P_{\text{П}} \cdot P(Q_{\text{жд}} > Q_{\text{жд}}^{(\text{расч})}),$$

где $P_{\text{П}}$ – вероятность нахождения поезда на мосту; $P(Q_{\text{жд}} > Q_{\text{жд}}^{(\text{расч})})$ – вероятность того, что при нахождении поезда на мосту его вес превысит величину $Q_{\text{жд}}^{(\text{расч})}$.

Далее обратимся к общему подходу определения коэффициента сочетаний трех нагрузок. Для этого будем рассматривать мно-

жество равновероятных троек (A_C, Q_C, G_C), где A_C – расчетное ускорение, Q_C – расчетная автомобильная нагрузка, G_C – расчетная железнодорожная нагрузка. Из этого множества троек выбирается наиболее опасная. Если обозначить $A_C = K_{eq}A_0$, $Q_C = K_cQ_0$, $G_C = K_cG_0$, то уравнение для определения коэффициентов сочетаний примет вид

$$P(Q > K_cQ_0) \cdot P(A > K_{eq}A_0) \times$$
$$\times P_{\text{tr}} \cdot P(G > K_cG_0) = [P].$$

Допустимую вероятность [P] возникновения события за срок службы сооружения согласно данным [8] можно принять равной 0,001 для ПЗ и 0,00001 для МРЗ. Далее можно поступать в соответствии с [8]. Задаваясь коэффициентами K_Q и K_G, коэффициент K_{eq} можно определить из уравнения

$$P(A > K_{eq}A_0) = \frac{[P]}{P(Q > K_cQ_0) \cdot P_{\text{tr}} \cdot P(G > K_cG_0)}. \quad (1)$$

Для дальнейших расчетов в соответствии с известными данными были использованы следующие методики вычисления значений вероятности, входящих в формулу (1):

– вероятность нахождения поезда на мосту P_{tr} оценена по методике [2–4,6], исходя из нормального закона распределения интервала движения поездов; на рис. 1 приведена полученная в [2] зависимость вероятности P_{tr} от длины моста L для двух значений грузопотока, соответствующих дорогам первой и второй категорий;

– для вероятности превышения поездом расчетной нагрузки распределение Вейбулла с функцией плотности распределения (ф. п.р.) имеет вид

$$p(Q > K_QQ_0) = \frac{1}{\alpha Q\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{\ln(Q_-\lambda}{\alpha}\right)^{\nu}};$$

– для вероятности превышения автодорожной нагрузкой расчетного значения принято логнормальное распределение

$$p(G > K_GG_0) = \frac{\nu \cdot (G)^{\nu-1}}{(\beta)^{\nu}} \cdot e^{-\left(\frac{G}{\beta}\right)^{\nu}},$$

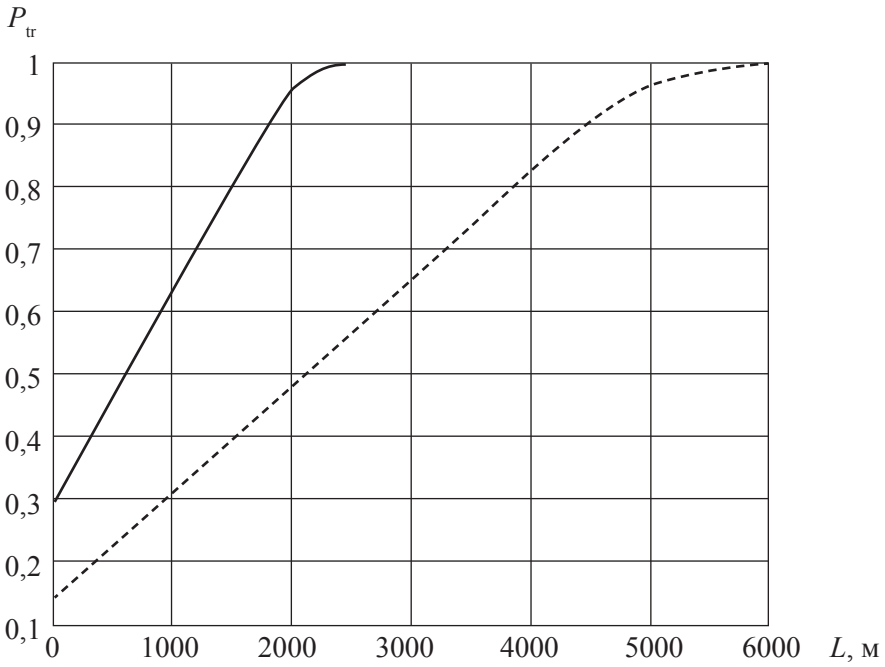


Рис. 1. Зависимость вероятности нахождения поезда на мосту P_{tr} от его длины L для вагонопотока 10 000 вагонов в сутки (сплошная линия) и 5000 вагонов в сутки (пунктирная)

где ν = 3,07 – параметр формы; β – параметр масштаба, равный 4,73 [4]; параметры распределения α = 1,099 и β = 0,5545 обеспечивают грузопоток с математическим ожиданием μ = 3,5 и σ = 2,1 т/м. Вид принятого распределения автодорожной нагрузки показан на рис. 2;

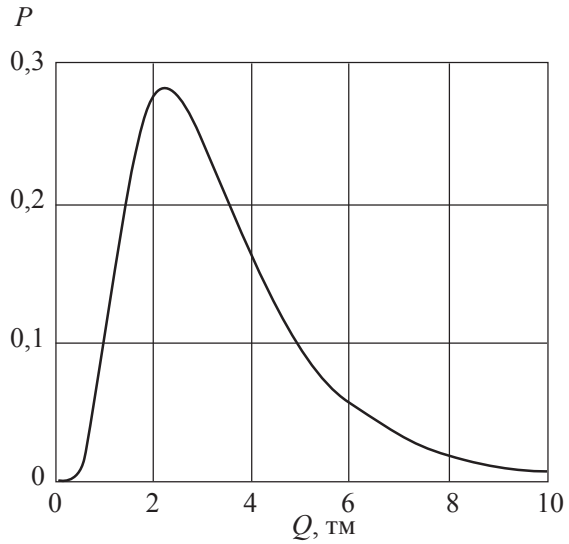


Рис. 2. Ф.п.р. для автодорожной нагрузки Q

– для сейсмической нагрузки принят закон Пуассона с ф.п.р. интервала между землетрясениями T в виде

$$p(T) = \frac{e^{-\frac{T}{\tau}}}{\tau},$$

при этом связь между силой землетрясения I и интервалом T принята в традиционной форме [9]

$$\log(T) = aI + b,$$

где a и b – константы, постоянные для данной площадки строительства.

В дальнейших расчетах нами была принята ситуационная сейсмичность I_A = 8 баллов, I_B = 9 баллов, I_C = 9 баллов. Для такого района a = 0,651 и b = –2,505 [10]. Сейсмичность может также характеризоваться расчетной амплитудой A (м/с^2), которая в соответствии со СНиП оценивается по формуле

$$A(I) = 2^{I-7}.$$

Сложность разработки нормативных рекомендаций на основе уравнения (1) заключается в том, что вероятность наличия поезда на мосту во время землетрясения зависит от длины моста и интенсивности движения. Этот факт отмечался ранее в [2, 4].

Обратимся к назначению коэффициентов сочетаний для МРЗ. По нашему мнению, все мосты можно разделить на следующие типы:

I тип (короткие мосты) – мосты длиной менее 1 км на дорогах второй категории и мосты длиной менее 500 м на дорогах первой категории;

II тип (длинные мосты) – мосты длиной более 5 км на дорогах первой категории и длиной более 7 км на дорогах второй категории;

III тип (средние мосты) – мосты, не отнесенные к типам I и II.

Мосты I типа. Для них вероятность поезда на мосту во время землетрясения пренебрежимо мала [3] и можно считать, что K_G = 0. Уравнение (1) вырождается и принимает вид

$$P(A > K_{eq}A_0) = \frac{[P]}{P(Q > K_c Q_0)}. \qquad (2)$$

Это уравнение порождает равновероятные пары (K_{eq}, K_Q). После подстановки в (2) соответствующих законов распределения получим

$$1 - e^{-\frac{T_e(K_{eq})}{T}} = \frac{[P]}{\Phi(K_Q, \bar{Q}, \sigma)}. \qquad (3)$$

Решение уравнения (3) зависит от сейсмической опасности территории, обусловливаемой повторяемостью расчетных землетрясений T_{eq}, и от категории дороги, определяющей параметры функции распределения автодорожной нагрузки. На рис. 3 приведены равновероятные пары (K_{eq}, K_Q) в виде зависимости K_{eq} (K_Q) для рассматриваемой ситуационной сейсмичности. Точка на рисунке соответствует упомянутым выше СП [10].

Мосты II типа. Для них вероятность нахождения поезда на мосту близка к 1, и уравнение (1) принимает вид

$$P(A > K_{eq} A_0) = \frac{[P]}{P(Q > K_c Q_0) \cdot P(G > K_c G_0)}.$$

Здесь уже приходится рассматривать равновероятные тройки (K_{eq}, K_Q, K_G).

Мосты III типа. Для них формулу (1) приходится применять в полной форме. В табл. 1 приведены результаты расчетов, а на рис. 4, *а* построены изолинии зависимости коэффициента сочетаний к железнодорожной нагрузке от коэффициентов сочетаний к сейсмической и автомобильной нагрузкам для моста на дороге первой категории протяженностью 1,2 км. В этом случае в соответствии с рис. 1 вероятность нахождения поезда на мосту для дороги первой категории составляет $P_{tr} = 0{,}7$.

Допустимая вероятность $[P]$ в расчетах по формуле (1) принята равной 0,00001, что соответствует расчетам на действие МРЗ. В расчетах на действие ПЗ $[P] = 0{,}001$. При этом, оставаясь в рамках существующих норм, в качестве расчетного землетрясения следует принимать землетрясение с пиковым ускорением 0,25 A, где A – нормативная величина ускорения по действующим СП. Полученные для ПЗ значения и изолинии коэффициентов сочетаний приведены в табл. 2 и на рис. 4, *б*. Для рассматриваемой ситуационной сейсмичности допустимой вероятности превышения ПЗ имеет повторяемость раз в 300 лет и пиковое ускорение около 1,5 м/с^2. По отношению к этой величине рассчитаны соответствующие коэффициенты сочетаний.

Выполненные исследования показывают, что во многих случаях необходим совместный учет автомобильной, железнодорожной и сейсмической нагрузок. Это особенно важно для длиннопериодных конструкций, у которых сейсмическая нагрузка не доминирует над остальными нагрузками.

Коэффициенты сочетаний существенно зависят от ситуационной сейсмичности на площадке строительства, длины моста и интенсивности движения. При ПЗ и МРЗ коэффициенты сочетаний существенно различаются, при этом отметим, что при МРЗ при принятых сочетаниях исключается обрушение конструкции, а при ПЗ обеспечивается работа конструкций в штатном режиме.

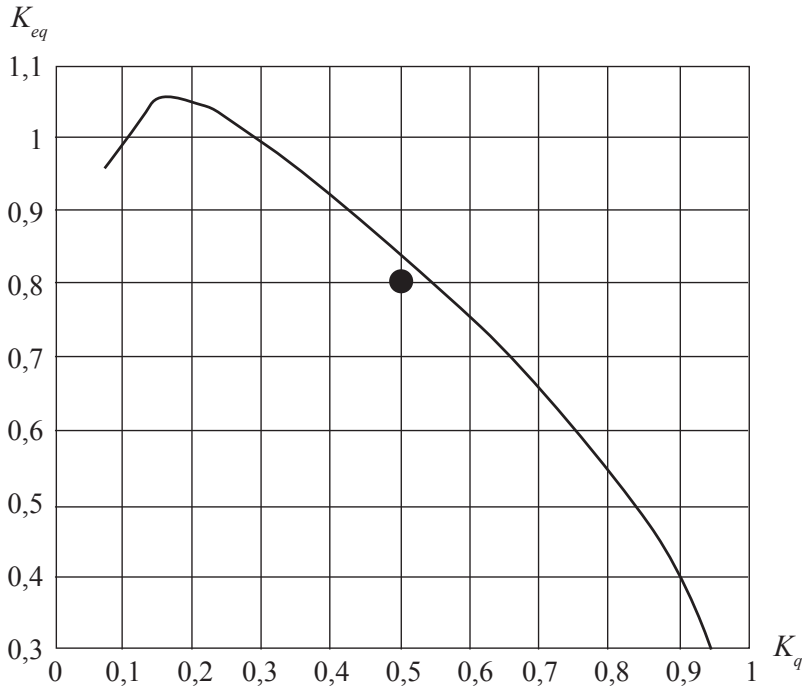


Рис. 3. Зависимость коэффициента сочетаний к сейсмической нагрузке от коэффициента сочетаний к автомобильной нагрузке

ТАБЛИЦА 1. Оценка коэффициентов сочетаний нагрузок для МРЗ

			K_{eq}	0,086	0,181	0,219	0,25	0,301	0,344	0,382	0,416	0,475	0,526	1
			A	0,327	0,689	0,831	0,95	1,146	1,309	1,451	1,579	1,804	2	3,799
			I	5,388	6,463	6,733	6,926	7,196	7,388	7,537	7,659	7,851	8	8,926
			T	10	50	75	100	150	200	250	300	400	500	$2 \cdot 10^3$
K_q	P_q	Q_i	P_{tr}	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	14
0,071	0,976	1	0	0,962	0,937	0,921	0,903	0,867	0,827	0,783	0,733	0,603	0,346	0
0,143	0,768	2	1	0,95	0,924	0,908	0,89	0,852	0,811	0,765	0,712	0,571	0,18	0
0,214	0,5	3	2	0,928	0,901	0,883	0,864	0,824	0,78	0,729	0,67	0,5	0	0
0,286	0,302	4	3	0,901	0,872	0,853	0,832	0,789	0,74	0,682	0,613	0,375	0	0
0,357	0,179	5	4	0,87	0,839	0,818	0,796	0,748	0,692	0,625	0,539	0	0	0
0,429	0,106	6	5	0,837	0,803	0,78	0,756	0,702	0,637	0,555	0,434	0	0	0
0,5	0,063	7	6	0,802	0,765	0,74	0,712	0,65	0,571	0,461	0,187	0	0	0
0,571	0,039	8	7	0,765	0,724	0,695	0,663	0,589	0,488	0,295	0	0	0	0
0,643	0,024	9	8	0,725	0,678	0,645	0,608	0,515	0,36	0	0	0	0	0
0,714	0,015	10	9	0,682	0,628	0,588	0,542	0.412	0	0	0	0	0	0
0,786	$9,58 \cdot 10^{-3}$	11	10	0,634	0,569	0,52	0,457	0,164	0	0	0	0	0	0
0,857	$6,221 \cdot 10^{-3}$	12	11	0,579	0,498	0,428	0,322	0	0	0	0	0	0	0
0,929	$4,1 \cdot 10^{-3}$	13	12	0,513	0,399	0,261	0	0	0	0	0	0	0	0
1	$2,74 \cdot 10^{-3}$	14	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ТАБЛИЦА 2. Оценка коэффициентов сочетаний нагрузок для ПЗ

			K_{eq}	0,206	0,435	0,526	0,600	0,723	0,826	0,918	1
			A	0,327	0,689	0,831	0,95	1,146	1,309	1,451	1,579
			I	5,388	6,463	6,733	6,926	7,196	7,388	7,537	7,659
			T	10	50	75	100	150	200	250	300
K_q	P_q	Q_i	P_{tr}	0	1	2	3	4	5	6	7
0,071	0,976	1	0	0,636	0,572	0,523	0,462	0,194	0	0	0
0,143	0,768	2	1	0,607	0,535	0,477	0,4	0	0	0	0
0,214	0,5	3	2	0,547	0,452	0,361	0,082	0	0	0	0
0,286	0,302	4	3	0,451	0,266	0	0	0	0	0	0
0,357	0,179	5	4	0,247	0	0	0	0	0	0	0
0,429	0,106	6	5	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	0,063	7	6	0	0	0	0	0	0	0	0
0,571	0,039	8	7	0	0	0	0	0	0	0	0
0,643	0,024	9	8	0	0	0	0	0	0	0	0
0,714	0,015	10	9	0	0	0	0	0	0	0	0
0,786	$9{,}58\cdot10^{-3}$	11	10	0	0	0	0	0	0	0	0
0,857	$6{,}221\cdot10^{-3}$	12	11	0	0	0	0	0	0	0	0
0,929	$4{,}1\cdot10^{-3}$	13	12	0	0	0	0	0	0	0	0
1	$2{,}74\cdot10^{-3}$	14	13	0	0	0	0	0	0	0	0

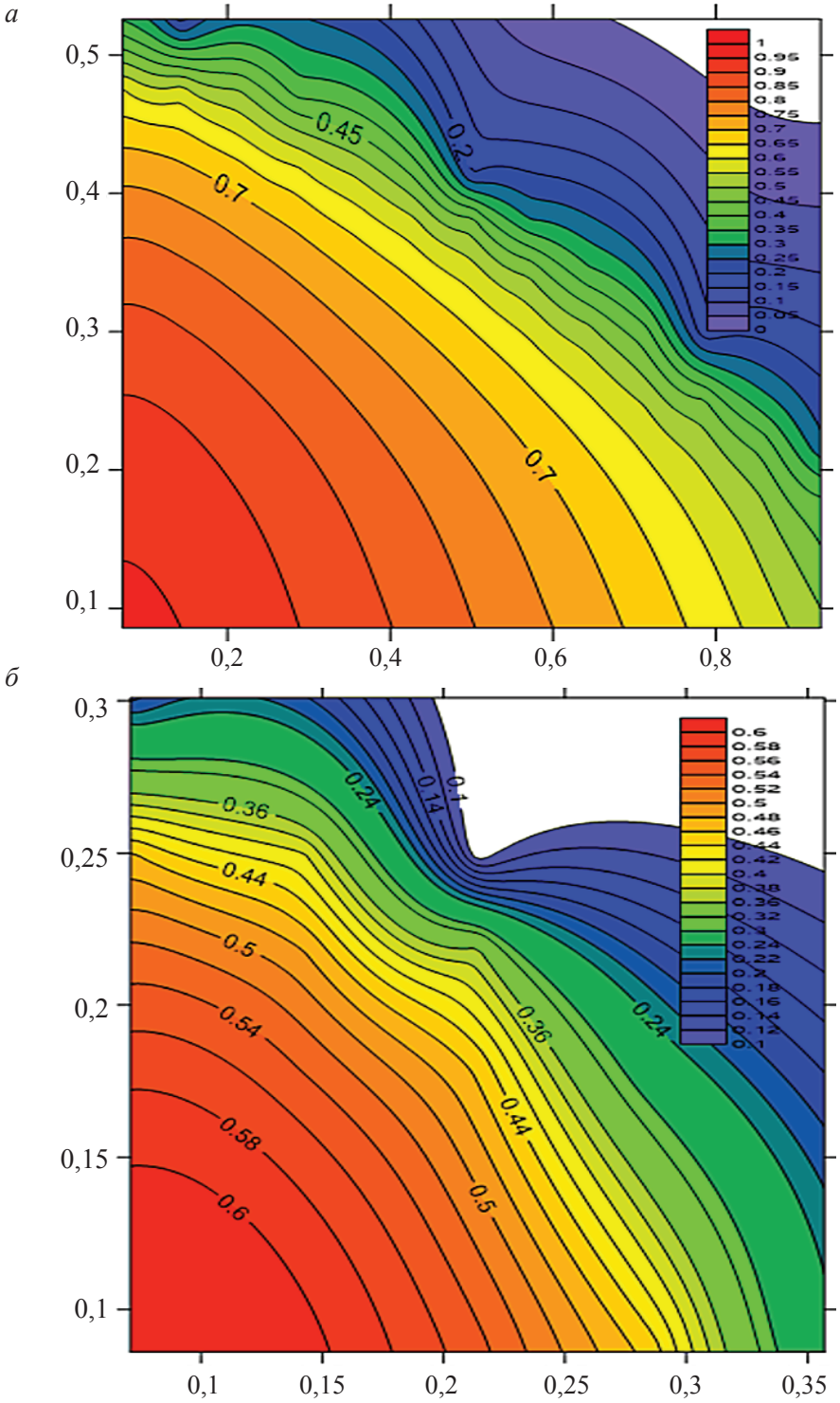


Рис. 4. Зависимость коэффициента сочетаний к сейсмической нагрузке от коэффициента сочетаний к автомобильной нагрузке для расчета на МРЗ (*а*) и ПЗ (*б*)

Библиографический список

1. Сахаров О. А. К вопросу о назначении коэффициентов сочетаний сейсмической и других нагрузок / О. А. Сахаров // Сейсмостойкое строительство. – 2003. – № 2. – С. 9–11.

2. Кузнецова И. О. К вопросу об оценке коэффициентов сочетаний сейсмической и железнодо-

рожной нагрузки / И. О. Кузнецова, О. А. Сахаров // Сейсмостойкое строительство. – 2006. – № 3. – С. 21–25.

3. Уздин А. М. Уточнение коэффициента сочетаний сейсмической и подвижной нагрузок при расчете железнодорожных мостов / А. М. Уздин // Сейсмостойкое строительство. – 1983. – Вып. 10. – С. 20–23.

4. Уздин А. М. Сейсмостойкость мостов / А. М. Уздин, И. О. Кузнецова. – Саарбрюкен (Германия) : Palmarium, 2014. – 450 с.

5. Шестоперов Г. С. Сейсмостойкость мостов / Г. С. Шестоперов. – М. : Транспорт, 1984. – 143 с.

6. Сахаров О. А. К вопросу задания сейсмического воздействия при многоуровневом проектировании сейсмостойких конструкций / О. А. Сахаров // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2004. – № 4. – С. 7–9.

7. СП 14.13330.2011. Строительство в сейсмических районах. – Актуализированная редакция СНиП II-7–81*.

8. Сейсмическая сотрясаемость территории СССР / под ред. Ю. В. Ризниченко. – М. : Наука, 1979. – 192 с.

9. Уздин А. М. Экономика сейсмостойкого строительства / А. М. Уздин, В. А. Воробьев, М. А. Богданова, В. В. Сигидов, С. С. Ваничева. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2017. – 176 с.

10. СП 268.1325800. Транспортные сооружения в сейсмических районах. – М., 2016. – 100 с.

References

1. Sakharov O. A. K voprosu o naznachenii koeffitsiyentov sochetaniy seismicheskoy i drugykh nagruzok [On assigning combination coefficients of seismic and other loads]. *Seismostoykoye stroitelstvo* [*Antiseismic construction*], 2003, no. 2, pp. 9–11. (In Russian)

2. Kuznetsova I. O. & Sakharov O. A. K voprosu ob otsenke koeffitsiyentov sochetaniy seysmicheskoy i zheleznodorozhnoy nagruzky [On the assessment of combination coefficients of seismic and railway load]. *Seismostoykoye stroitelstvo* [*Antiseismic construction*], 2006, no. 3, pp. 21–25. (In Russian)

3. Uzdyn A. M. Utochneniye koeffitsiyenta sochetaniy seismicheskoy i podvyzhnoy nagruzok pry raschete zheleznodorozhnykh mostov [Updating of the combination coefficient of seismic and live load during the analysis of railway bridges]. *Seismostoykoye stroitelstvo* [*Antiseismic construction*], 1983, issue 10, pp. 20–23. (In Russian)

4. Uzdin A. M. & Kuznetsova I. O. *Seismostoikost mostov* [*Seismic resistance of bridges*]. Saarbryuken (Germany), Palmarium Publ., 2014, 450 p. (In Russian)

5. Shestoperov G. S. *Seismostoikost mostov* [*Seismic resistance of bridges*]. Moscow, Transport Publ., 1984, 143 p. (In Russian)

6. Sakharov O. A. K voprosu zadaniya seismicheskogo vozdeistviya pry mnogourovnevom proyektyrovanii seismostoikykh konstruktsiy. *Seismostoikoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy* [*On the assignment of seismic impact in the process of multi-level seismic design*. *Antiseismic construction. Structure safety*], 2004, no. 4, pp. 7–9. (In Russian)

7. *SP 14.13330.2011. Stroitelstvo v seismicheskykh raijonakh* [*Set of rules 14.13330.2011. Construction in seismic regions*]. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP. Revised edition of SNiP (Construction rules and regulations) II-7–81*. (In Russian)

8. *Seismicheskaya sotryasayemost territorii SSSR* [*Seismic shaking of the USSR territory*]. Ed. by Y. V. Riznichenko. Moscow, Nauka Publ., 1979, 192 p. (In Russian)

9. Uzdin A. M., Vorobyev V. A., Bogdanova M. A., Sigidov V. V. & Vanicheva S. *Ekonomika seismostoikogo stroitelstva* [*Antiseismic construction economics*]. Moscow, Uchebno-metodycheskiy tsentr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational centre of railway transport] Publ., 2017, 176 p. (In Russian)

10. *SP 268.1325800. Transportniye sooruzheniya v seismicheskykh raijonakh* [*Set of rules 268.1325800 Transport works in seismic regions*]. Moscow, 2016, 100 p. (In Russian)

КУЗНЕЦОВА Инна Олеговна – канд. техн. наук, доцент; *САБИРОВА Ойпошша Бахтияровна – студент, sabirovaanna95@yandex.ru; УЗДИН Александр Моисеевич – д-р техн. наук, профессор, uzdin@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I); ЧАНГ Юань – доцент (Китайский нефтяной университет).

УДК 625.143

А. В. Романов, Н. Р. Мухаммадиев

К ВОПРОСУ О РАЗВИТИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ УЗБЕКИСТАН

Дата поступления: 23.11.2018
Решение о публикации: 20.03.2018

Аннотация

Цель: Сравнительный анализ и выбор оптимального варианта конструкции верхнего строения пути при организации высокоскоростного движения в Республике Узбекистан. **Методы:** Проанализированы факторы, влияющие на организацию высокоскоростного движения в уникальных природно-климатических и эксплуатационных условиях Республики Узбекистан. Разработаны варианты конструкции верхнего строения пути и проведен сравнительный анализ. **Результаты:** Приведены этапы развития высокоскоростного движения в Республике Узбекистан. Рассмотрены факторы, влияющие на организацию высокоскоростного движения поездов на линии «Ташкент–Самарканд» в уникальных природно-климатических и эксплуатационных условиях Республики Узбекистан. Разработаны варианты конструкции верхнего строения пути и проведен сравнительный анализ. Осуществлено сравнение конструкции верхнего строения пути с выбором оптимальной. **Практическая значимость:** Реализация представленного подхода позволяет повысить скорости движения поездов и снизить эксплуатационные расходы при организации высокоскоростного движения поездов.

Ключевые слова: Верхнее строение пути, высокоскоростная магистраль, безбалластное верхнее строение пути.

Andrey V. Romanov, Cand. Eng. Sci, associate professor; *** Nyematzhon R. Mukhammadiyev**, postgraduate student, nemat.9108@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) ON THE DEVELOPMENT OF HIGH-SPEED RUNNING IN THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN

Summary

Objective: The factors influencing the organization of high-speed running in unique natural and working conditions of the Republic of Uzbekistan were analyzed. Alternative constructions of the track structure were developed and comparative analysis was carried out. To perform the comparative analysis and select an optimum alternative of the track structure when organizing high-speed running in the Republic of Uzbekistan. **Methods:** The study and generalization of the global HSRL construction and maintenance experience and the analysis of working conditions in the Republic of Uzbekistan. **Results:** The stages of high-speed running development in the Republic of Uzbekistan were presented. Factors, influencing the organization of high-speed train movement at "Tashkent–Samarkand" railway line were considered in the unique environment and working conditions of the Republic of Uzbekistan. Alternative constructions of the track structure were developed and the comparative analysis was carried out. The comparison of the track design with the selection of an optimum alternative was fulfilled. **Practical importance:** Implementation of the introduced approach makes it possible to improve the speeds of train movement and reduce maintenance costs in the process of high-speed train movement organization.

Keywords: Track structure, high-speed railway line, ballastless track structure.

Введение

Для успешной интеграции железных дорог Республики Узбекистан в мировой транспортный рынок требуется решить ряд важнейших задач. Среди них необходимо особо выделить развитие скоростного и высокоскоростного пассажирского движения. Это позволит поднять качество предоставляемых транспортных услуг на более высокий уровень.

В настоящее время вопросы развития скоростного и высокоскоростного движения в Республике Узбекистан являются весьма актуальными. В этой связи разработан ряд программ, направленных на повышение скоростей движения пассажирских поездов. В частности, значительное внимание развитию высокоскоростного движения уделено в «Стратегии развития железнодорожного транспорта Республики Узбекистан до 2035 года». При реализации этих программ предстоит выбрать железнодорожные линии для организации на них скоростного и высокоскоростного движения поездов.

Одним из актуальных вопросов, решаемых при организации скоростного и высокоскоростного движения поездов, является научное обоснование технико-экономического выбора оптимальной конструкции верхнего строения пути с учетом уникальных эксплуатационных и природно-климатических условий Республики Узбекистан.

Этапы развития высокоскоростного движения в Республике Узбекистан

В настоящее время в Республике Узбекистан идет интенсивное развитие сети высокоскоростных дорог. Железнодорожной транспортной компанией Узбекистана «Ўзбекистон Темир Йўллари» в соответствии с распоряжением кабинета министров № 615 от 17.11.2009 г. на период 2010–2035 гг. определен ряд мероприятий по организации высокоскоростного движения [1].

Реализация основных мероприятий по организации скоростного и высокоскоростного движения на железных дорогах Узбекистана предусмотрена в четыре этапа (рис. 1).

На первом этапе (2011–2015 гг.) были выполнены первоначальные работы, связан-

Рис. 1. Этапы развития высокоскоростного движения в Республике Узбекистан

ные с подготовкой и внедрением высокоскоростного движения электропоезда Talgo-250 «Afrosiyob» на полигоне направления Ташкент–Самарканд.

Второй этап (2016–2020 гг.) включает в себя организацию высокоскоростного движения на участке «Ташкент–Бухара» с остановками на станциях Самарканд, Каттакурган и Навои, а также скоростного движения на пригородном направлении Ташкент–Ходжикент.

На третьем этапе (2021–2025 гг.) высокоскоростное движение будет расширено на направлении Ташкент–Карши с остановками на станциях Джизак и Самарканд.

Четвертый этап (до 2035 г.) предполагает развитие скоростного движения на направлениях Ташкент–Навои–Ургенч с остановками на станциях Мискен, Зарафшан, Навои, Каттакурган, Самарканд и Джизак и на направлении Ташкент–Андижан с остановками в Ангрене, Коканде, Фергане, Андижане и Намангане.

В настоящее время в соответствии с программами реализован первый этап реализации высокоскоростного движения на линии «Ташкент–Самарканд» со скоростью движения до 250 км/ч.

Высокоскоростная магистраль (ВСМ) «Ташкент–Самарканд» имеет длину 344 км и соединяет два крупнейших города Республики Узбекистан. Она пересекает четыре области: Ташкентскую, Сырдарьинскую, Джизакскую и Самаркандскую. Линию обслуживает поезд «Afrosiyob», курсирующий семь дней в неделю [2–4].

Основные факторы, влияющие на организацию высокоскоростного движения поездов на линии «Ташкент–Самарканд»

Высокоскоростное движение на линии «Ташкент–Самарканд» организовано на существующей трассе. Для этого потребовалась реконструкция существующей железной дороги. Опыт Республики Узбекистан в данном случае не уникален. Например, основным концептуальным подходом к организации высокоскоростного движения в Италии и Германии также является комплексная реконструкция железнодорожных направлений, при которой осуществляются строительство высокоскоростных участков, модернизация существующих линий, спрямление главных путей. В Российской Федерации также имеется богатый опыт по организации высокоскоростного движения на линии «Москва–Санкт-Петербург».

Представленный концептуальный подход имеет свои особенности. Реконструкция существующей трассы под высокоскоростное движение неизбежно влечет за собой необходимость ограничения скорости движения поездов. К факторам, влияющим на ограничение движения поездов, можно отнести:

– сложные топографические условия и большие перепады высот по протяжению трассы, например в Джизакской области отметка трассы составляет 699 м, а в Сырдарьинской – 155 м;

– участки ограничения скорости движения по состоянию инфраструктуры (в том числе по железнодорожному пути и контактной сети);

– большое количество кривых участков пути различных радиусов. На рис. 2 представлена протяженность участков пути различных радиусов. Из него следует, что приблизительно 3/4 протяженности трассы проходит по кривым малых радиусов, что требует дополнительных ограничений скорости движения высокоскоростных поездов.

Установленная скорость движения высокоскоростных поездов по различным участкам трассы имеет следующие значения (рис. 3):

– в пределах Ташкента – до 170 км/ч;

– в пригороде Ташкента и Ташкентской области – до 190 км/ч;

– в Сырдарьинской области – до 180 км/ч;

– на участке между станциями Янгиер и Джизак – до 225 км/ч;

– на участке между станциями Джизак и Самарканд – от 120 до 160 км/ч.

Ко второй группе факторов, влияющих на организацию высокоскоростного движе-

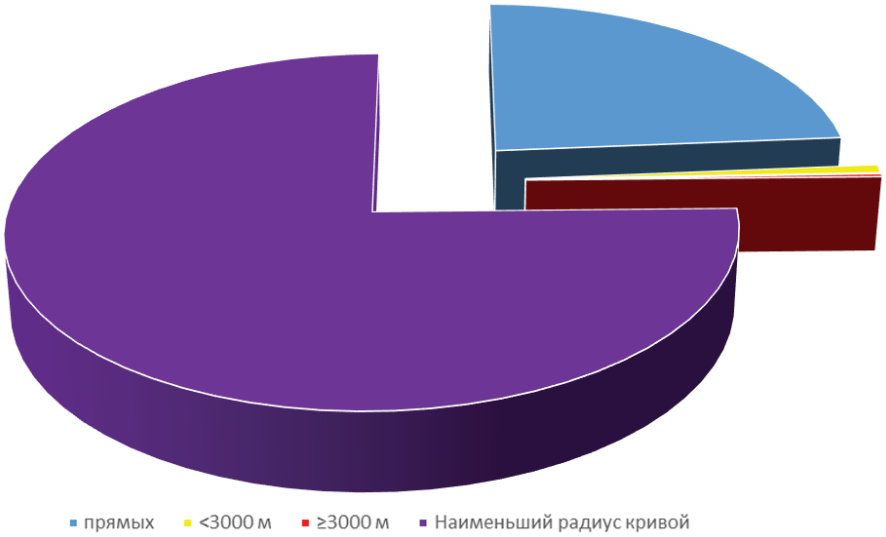


Рис. 2. Развернутая длина главных путей,
в том числе кривых на участке «Ташкент–Самарканд»

Рис. 3. Высокоскоростная линия «Ташкент–Самарканд»

ния на линии «Ташкент–Самарканд», относятся природно-климатические условия (рис. 4).

ВСМ «Ташкент–Самарканд» пролегает по развитым сельскохозяйственным районам, расположенным на юге и юго-востоке Республики Узбекистан. Практически вдоль всего участка проходит автомагистраль М-39 «Ташкент–Самарканд–Термез», на отрезках Сырдарья–Хаваст и Хаваст–Джизак – автотрассы М-34 и М-376 соответственно.

На территории хорошо развита гидрографическая сеть, состоящая из рек, водохранилищ, озер и ирригационной системы.

Рис. 4. Поезд Talgo-250 «Afrosiyob» на перегоне между станциями Булунгур– Богарное

Район железнодорожной линии ст. Ташкент–ст. Сырдарья расположен вдоль правого берега р. Чирчик, а на перегоне ст. Новый Чиназ–ст. Мехнат пересекает р. Сырдарью.

Участок ст. Сырдарья–ст. Джизак проходит по основному массиву орошаемых земель Голодной Степи, имеющему многочисленные ирригационные каналы, коллекторы и сбросы.

Вблизи ВСМ «Ташкент–Самарканд» расположены крупные водохранилища и озера. К востоку от ст. Сырдарьинская, в непосредственной близости к ней, находится озеро Учтепа; в устье р. Заамину – Зааминское водохранилище; в 2 км на юг от ст. Джизак – Джизакское водохранилище, а в юго-западной части города протекает р. Сангзар, которая идет вдоль железной дороги до ст. Галляарал. К западу от перегона ст. Богарное–ст. Булунгур находится Караултепинское водохранилище.

Участок ст. Джизак–ст. Самарканд проходит по отрогам Туркестанского хребта Тяньшаньского горного массива, пересекаемого многочисленными реками и ручьями. Среди них реки Булунгур, Карадарья и Заравшан.

Выбор конструкции верхнего строения пути

Первый вопрос, который требуется решить при назначении конструкции верхнего строения железнодорожного пути на ВСМ: отдать предпочтение безбалластной конструкции пути или традиционной конструкции пути на балласте.

Традиционный путь на балласте имеет неоспоримое преимущество, заключающееся в простоте выправки пути в профиле и плане. Однако, как часто бывает в технических системах, подобное преимущество служит и источником недостатков. Для пути на балласте это выражается в накоплении остаточных деформаций в процессе эксплуатации, потере надежности и появлении дополнительных рисков [5].

За последние 20 лет достигнут большой прогресс в развитии безбалластного (на плитном или сплошном бетонном основании) пути для линий магистральных железных дорог. Такие конструкции все чаще принимаются в ка-

честве базовых для верхнего строения пути в новых проектах. Это обусловлено прежде всего очередным витком роста расходов на текущее содержание балластного пути [6].

Опыт строительства и эксплуатации ВСМ за рубежом показывает, что стоимость строительства ВСМ с безбалластным верхним строением пути обходится на 30 % дороже, чем традиционной конструкции пути на балласте, однако в течение первых 20 лет эксплуатации данная разница затрат компенсируется за счет меньших эксплуатационных расходов [7–10].

Современная конструкция безбалластного верхнего строения пути состоит из рельсовых плетей, упругих промежуточных рельсовых скреплений, подрельсовых опор, несущего основания из плит или монолитного бетона, гидравлически связанного несущего слоя.

Безбалластное верхнее строение пути выполняет следующие функции:

1) обеспечивает пространственную стабильность рельсовой колеи;

2) распределяет нагрузку от подвижного состава на нижнее строение;

3) приводит к снижению генерируемых подвижным составом вибраций до приемлемого уровня.

Безбалластные конструкции пути имеют широкое распространение в мире. Различные типы таких конструкций эксплуатируются в Германии, Австрии, Японии, Китайской Народной Республике и др. В настоящее время известно более 20 видов этих конструкций, действующих в разных странах мира.

Сравнительный анализ конструкции пути представлен в ряде работ, например в [6]. Как известно, безбалластный путь имеет преимущество в части удобства монтажа и эксплуатации на мостах, эстакадах и в тоннелях, а также предпочтителен из-за низких затрат на текущее содержание. Балластный путь характеризуется низкими затратами на строительство и более универсален для различных условий эксплуатации и в части восстановления после сходов подвижного состава и катастроф, кроме того он обладает лучшими параметрами для гашения шума и вибрации. Особо следует отметить преимущество безбалластных конструкций по устойчивости бесстыкового пути к температурному выбросу. Это играет особую роль на участках применения вихретоковых тормозов, приводящих к дополнительному нагреву рельсовых плетей [11–14].

На линии «Ташкент–Самарканд» принята конструкция верхнего строения пути на балласте. Этот выбор по сравнению с вариантами безбалластного верхнего строения пути сделан с учетом таких факторов:

– максимальной скорости движения поездов;

– необходимости совмещения эксплуатации грузовых и пассажирских поездов;

– минимизации стоимости строительства и эксплуатации в пределах жизненного цикла;

– малых размеров движения высокоскоростных поездов.

В целом в условиях эксплуатации железнодорожной линии «Ташкент–Самарканд» принята следующая конструкция верхнего строения железнодорожного пути на балласте:

– рельсы термоупрочненные типа Р65 согласно Техническим условиям;

– рельсы железнодорожные типа Р65 для скоростного совмещенного движения;

– шпалы железобетонные, имеющие эпюру 2000 шт./км, на прямых и кривых радиусом более 1250 м;

– балласт щебеночный толщиной 35 см под шпалой на гравийно-песчаной подушке слоем не менее 20 см;

– на скоростных участках до проведения усиленного капитального ремонта допускается использовать ранее уложенные рельсы типа Р-65, 1-й группы первого класса;

– все стрелочные переводы, лежащие в главных путях типа Р65, не круче марки 1/11 с гибкими остряками и крестовиной с непрерывной поверхностью катания.

Как показывает опыт железнодорожной компании «Ўзбекистон Темир Йўллари», данная конструкция соответствует условиям эксплуатации ВСМ «Ташкент–Самарканд»

и обеспечивает безопасность и бесперебойность движения поездов с установленными скоростями движения.

Заключение

Стратегия развития ВСМ Узбекистана до 2030 г. предусматривает повышение скорости движения высокоскоростных поездов свыше 300 км/ч. Опыт стран Европы и Азии, конкурирующих в этой области, влияет на развитие ВСМ на железных дорогах Узбекистана.

Актуальной задачей в настоящее время является разработка нормативно-технической документации на основе анализа мирового опыта в сфере проектирования, строительства и эксплуатации ВСМ в Республике Узбекистан с учетом ее уникальных природно-климатических и эксплуатационных условий.

Библиографический список

1. Овчинников А. Н. Скоростное и высокоскоростное движение на железных дорогах Узбекистана / А. Н. Овчинников, А. Ф. Расулов., З. Т. Фозилов // Путь. – 2012. – № 5. – С. 65–67.

2. Абдуллаев А. А. Достижения ГАЖК «Ўзбекистон Темир Йўллари» / А. А. Абдуллаев // ГАЖК Ўзбекистон Темир Йўллари : презентация. – Ташкент, 2009. – С. 32–35.

3. Концепция организации высокоскоростного движения пассажирских поездов в Узбекистане. Состав и содержание Концепции. – Ташкент : Головной проектно-изыскат. ин-т по транспорту АО «Бошстранслойиха», 2009. – 86 с.

4. Безбалластный путь на бетонных основаниях // Железные дороги мира. – 2011. – № 2. – С. 68–74.

5. Савин А. В. Выбор конструкции безбалластного пути / А. В. Савин // Проблемы проектирования, строительства, диагностики и технического содержания объектов железнодорожного транспорта : материалы Всерос. науч.-практич. конференции (г. Чита, 24 октября–15 ноября 2013 г.) / отв. ред. А. П. Хоменко.– Чита : ЗабИЖТ, 2013. – С. 19–25.

6. Замуховский А. В. Перспектива полигона безбалластного пути / А. В Замуховский // Мир транспорта. – 2013. – Т. 11, № 3 (47). – С. 168–172.

7. Путь на плитном основании // Железные дороги мира. – 2006. – № 4. – С. 64–67.

8. Савин А. В. Критерии выбора конструкции безбалластного пути / А. В. Савин // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 2. – С. 2–8.

9. Савин А. В. Выбор конструкции пути для высокоскоростного движения / А. В. Савин // Вестн. ВНИИЖТ. – 2014. –№ 1. – С. 55–59.

10. Савин А. В. Экспериментальное кольцо : укладка новых конструкций пути / А. В Савин // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 2. – С. 12–15.

11. Савин А. В. Исследования безбалластной конструкции верхнего строения пути / А. В. Савин, А. М. Бржозовский, В. В. Третьяков, И. В. Смелянский, С. В. Толмачев // Вестн. ВНИИЖТ. – 2015. – № 6. – С. 23–32.

12. Савин А. В. Безбалластный путь и его основание / А. В. Савин, П. И. Дыдышко // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 12. – С. 39–41.

13. Савин А. В. Сферы применения безбалластного пути / А. В. Савин, А. Д. Разуваев // Вестн. Ин-та проблем естественных монополий. Техника железных дорог. – 2016. – № 3. – С. 32–41.

14. Савин А. В. Условия применения безбалластного пути / А. В. Савин // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2016. – Т. 9, № 9. – С. 76–80.

References

1. Ovchinnikov A. N., Rasulov A. F., Fozilov Z. T. Skorostnoye i vysokoskorostnoye dvyzheniye na zheleznykh dorogakh Uzbekistana [High-speed operation and high-speed running on the Railways of Uzbekistan]. *Put* [*The Path*]. Moscow, 2012, no. 5, pp. 65–67. (In Russian)

2. Abdullaev A. A. *Dostizheniya GAZhK Uzbekiston Temir Jullary*. Prezentatsiya [*The achievements of the state joint stock railway company*, *O'zbekiston degilani*]. Tashkent, 2009, pp. 32–35. (In Russian)

3. *Kontseptsiya organizatsii vysokoskorostnogo dvizheniya passazhirskikh poyezdov v Uzbekistane. Sostav i soderzhaniye Kontseptsii* [*The concept of or-*

ganizing High-Speed Traffic of Passenger Trains in Uzbekistan. The Structure and Content of the Concept]. Tashkent, Golovnoy proyektno-izyskat. institut po transportu AO "Boshtransloyikha" [Head design Institute of transport JSC Boshtransloyiha], 2009, 86 p. (In Russian)

4. Bezballastniy put na betonnykh osnovaniyakh [Ballastless railway track on concrete bases]. *Zhelezniye dorogy mira* [*World Railways*], 2011, no. 2, pp. 68–74. (In Russian)

5. Savin A. V. Vybor konstruktsii bezballastnogo puty [Design of ballastless track]. *The problems of projecting, construction, diagnostics and technical contents from objects of railways : Coll. on All-Russian scient.-pract. conference (Chita, 24.09–15.10.2013)*. Chita, ZabITzhT Publ., 2013, pp. 19–25 (In Russian)

6. Zamukhovsky A. V. Perspektiva poligona bezballastnogo puty [The prospect of a ballastless track polygon]. *The World of Transport*, 2013, vol. 11, no. 3, pp. 168–172 (In Russian)

7. Put na plytnom osnovanii [Slab track]. *Zhelezniye dorogy mira* [*Railways of the world*], 2006, no. 4, pp. 64–67. (In Russian)

8. Savin A. V. Kriterii vybora konstruktsii bezballastnogo puty [Criteria for the selection of the design of ballastless track]. *Put i putevoye khozyaistvo* [*Track and track facilities*], 2014, no. 2, pp. 2–8. (In Russian)

9. Savin A. V. Vybor konstruktsii puty dlya vysokoskorostnogo dvyzheniya [The selection of track design for high-speed running]. *Vestnik VNIIZHT* [*VNIIZhT Bulletin*], 2014, no. 1, pp. 55–59. (In Russian)

10. Savin A. V. Eksperimentalnoye koltso: ukladka novykh konstruktsiy puty [Test loop: laying of new design paths]. *Put i putevoye khozyaistvo* [*Track and track facilities*], 2015, no. 2, pp. 12–15. (In Russian)

11. Savin A. V., Brzhozovsky M. A., Tretyakov V. V., Smelyanskiy I. V. & Tolmachev S. V. Issledovaniya bezballastnoy konstruktsii verkhnego stroyeniya puty [The study of the ballastless track structure design]. *Vestnik VNIIZHT* [*VNIIZhT Bulletin*], 2015, no. 6, pp. 23–32. (In Russian)

12.. Savin A. V. & Dydyshko P. I. Bezballastniy put i yego osnovaniye [Ballastless railway track and its foundation]. *Zheleznodorozhniy transport* [*Railway transport*], 2015, no. 12, pp. 39–41. (In Russian)

13. Savin A. V. & Razuvaev A. D. Sphery primeneniya bezballastnogo puty [The scope of application of ballastless track]. *Vestnik instituta problem yestestvennykh monopoliy: Tekhnika zheleznykh dorog* [*Bulletin of the Institute of problems of natural monopolies*: *Railways Equipment*], 2016, no 3, pp. 32–41. (In Russian)

14. Savin A. V. Usloviya primeneniya bezballastnogo puty [Conditions of application of ballastless track]. *Vnedreniye sovremennykh konstruktsiy i peredovykh tekhnologiy v putevoye khozyaistvo* [*Implementation of modern designs and advanced technologies in track facilities*], 2016, vol. 9, no. 9 (9), pp. 76–80. (In Russian)

РОМАНОВ Андрей Валерьевич – канд. техн. наук, доцент; *МУХАММАДИЕВ Неъматжон Рахматович – аспирант, nemat.9108@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 625.2.012.814

И. В. Смелянский, А. М. Бржезовский, С. В. Толмачев

БАЛЛАСТИРОВКА ГРУЗОНЕСУЩЕЙ БАЛКИ ТРАНСПОРТЕРА

Дата поступления: 10.05.2017
Решение о публикации: 02.03.2018

Аннотация

Цель: Снятие ограничений допускаемой скорости движения 8-осного транспортера, предназначенного для перевозки тяжеловесного груза со сверхнормативным продольным смещением общего центра тяжести. Этот транспортер загружен несимметричным, относительно осей симметрии грузонесущей балки, грузом. **Методы:** Проведены транспортные расчеты, подтвердившие возможность допуска груженого транспортера на сеть без ограничения скоростей движения в кривых участках путем компенсации несимметричности погрузки специальными приспособлениями для балластировки. Расчетные предпосылки верифицированы комплексными динамическими и по воздействию на путь испытаниями груженого транспортера, что позволило снять ограничения допускаемых скоростей движения. **Результаты:** Установлены допускаемые скорости движения груженого транспортера. **Практическая значимость:** Разработан нормативный документ ОАО «РЖД», регламентирующий условия обращения транспортера.

Ключевые слова: Транспортер, тяжеловесный груз, испытания, допускаемые скорости.

Igor Vl. Smelyanskiy, Cand. Eng. Sci, senior researcher, riky83@mail.ru; ***Aleksander M. Brzhezovskiy**, Cand. Eng. Sci, senior researcher, s_brz@mail.ru; **Sergey Vl. Tolmachev**, senior researcher, karst@yandex.ru (AO "Railway Research Institute") BALLASTING OF A CONVEYER LOAD-CARRYING GIRDER

Summary

Objective: Liberalization of admissible speed of an eight axle conveyer designed for heavy loads shipping with excessive axial displacement of the common gravity center. The conveyer in question is loaded with asymmetrical, relative to load-carrying girder axials of symmetry, load. **Methods:** The possibility of admitting a loaded conveyer to the network without speed limitation at curve sections by compensating asymmetrical loading with special ballasting facilities was justified. Computational prerequisites were verified by complex dynamic and the loaded conveyer influence on the track tests, which made it possible to liberalize the admissible speed. **Results:** Admissible speed of the loaded conveyer was established. **Practical importance:** A reference document of OAO "Russian Railways", regulating the provisions for handling the conveyer was developed.

Keywords: Conveyer, heavy load, tests, admissible speed.

К приемочным испытаниям был предъявлен 8-осный транспортер для перевозки тяжеловесного груза со сверхнормативным продольным смещением общего центра тяжести относительно осей симметрии грузонесущей балки транспортера (таблица).

Транспортер оборудован двумя специальными 4-осными грузовыми трехэлементными тележками с центральным подвешиванием, диагональными связями боковин и гидравлическими гасителями, смонтированными параллельно пружинам центрального подвешивания.

Транспортные параметры груженого 8-осного транспортера

Параметр	Без балластировки грузонесущей балки	С балластировкой грузонесущей балки
Масса грузонесущей балки, т	80,0	
База транспортера, м	18,40	
Масса груза, т	65,0	
Масса балластного ящика, т	–	11,7
Продольное смещение центра масс балластного ящика № 1, м	–	7,32
Общая масса груженой грузонесущей балки, т	145,0	156,7
Нагрузки брутто, передаваемые от грузонесущей балки (рамы агрегата) на тележки, тс	78,9/65,4	66,3/65,3
Разновес по тележкам, тс	13,5	1,0
Допускаемый разновес по ГОСТ 22235–2010 [2], тс	20,00	
Расчетная величина смещения общего центра масс брутто рамы агрегата, м	1,38	0,89
Допускаемая величина продольного смещения центра масс брутто рамы агрегата по нормам вагоностроения [3], м	1,288	

Базовые размеры специальной тележки аналогичны серийной грузовой тележке модели 18-101. Жесткость рессорного подвешивания тележки модели 18-9965 на 33–35 % меньше, чем тележки модели 18-100. В период проведения испытаний геометрия поверхностей катания колес соответствовала требованиям действующей нормативной документации [1].

По результатам исследований динамических качеств и воздействия на путь вагонов с продольным, относительно поперечной оси симметрии, смещением центра тяжести, проведенным ранее ВНИИЖТ [4–8], были установлены нормативные величины таких смещений в зависимости от высоты центра тяжести и массы груза [9].

В соответствии с требованиями ГОСТ Р 55050–2012 [10] предварительными транспортными расчетами была подтверждена возможность допуска груженого транспортера на сеть с ограничением скоростей движения в кривых участках пути.

С целью снятия ограничений допускаемых скоростей движения было предложено внесение в конструкцию грузонесущих балок дополнительного оборудования (балластного ящика) для размещения балластного груза, компенсировавшего несимметричность погрузки (рис. 1).

В результате балластировки разность нагрузок на 4-осные тележки не превышала 1000 кгс (при норме 20 000 кгс), продольное смещение общего центра тяжести брутто грузонесущей балки равно 89 мм (при норме 1288 мм).

Приемочные испытания груженого транспортера проводились на Скоростном испытательном полигоне ВНИИЖТа Белореченская–Майкоп Северо-Кавказской железной дороги (СИП). На измерительных участках пути (прямая 7 км, кривые радиусом 625 и 350 м) уложено верхнее строение пути с типовой конструкцией. Отступления рельсовой колеи по геометрии на измерительных участках пути были не ниже второй степени. Испытательные

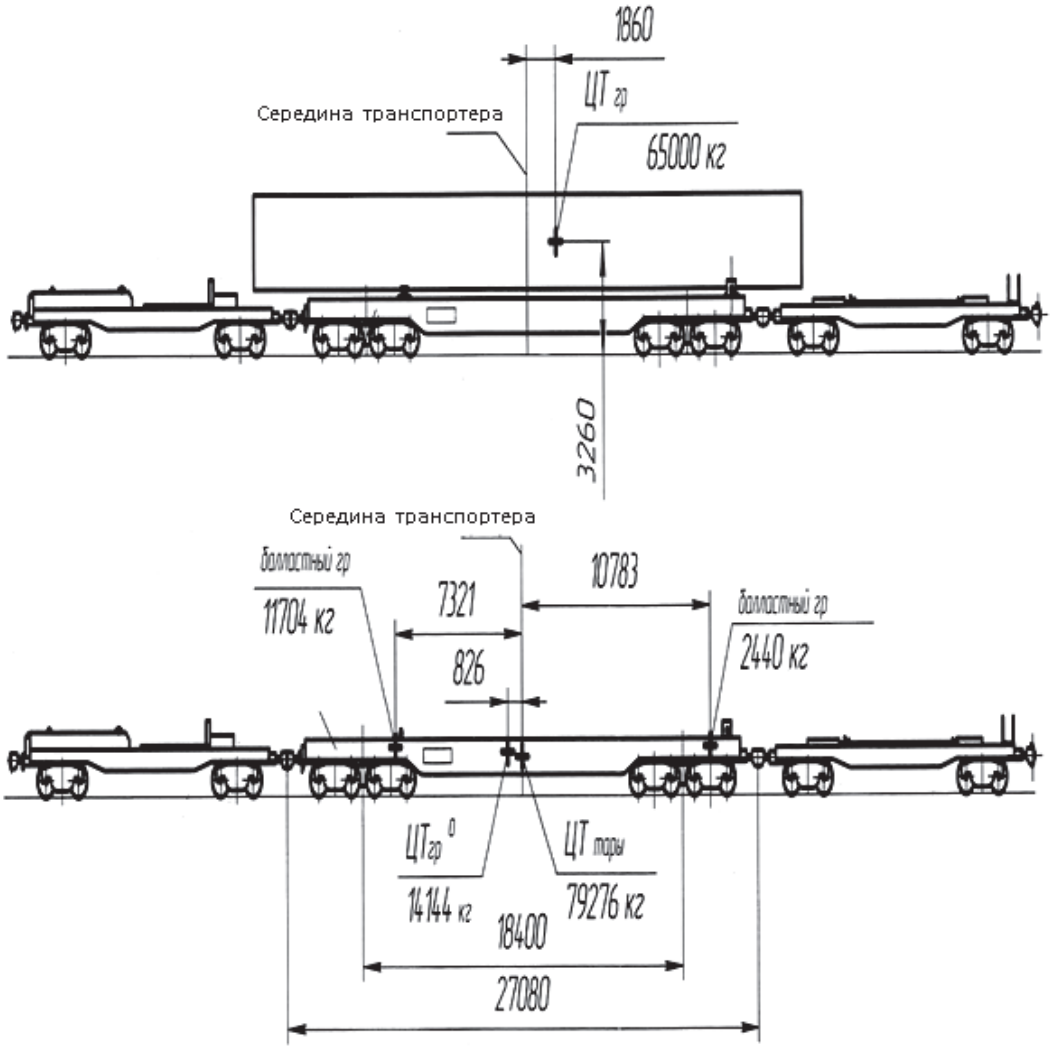


Рис. 1. Схемы размещения груза и балластировки для компенсации несимметричности погрузки (размеры даны в мм)

поездки транспортера производились в прямом участке пути со скоростями до 120 км/ч, в круговых кривых радиусом 350 м со скоростями от 40 до 80 км/ч с изменением непогашенного ускорения от –0,43 до 0,63 м/с^2 и радиусом 625 м – от 60 до 120 км/ч с изменением непогашенного ускорения от –0,50 до 0,89 м/с^2. Диапазон изменения скоростей движения на боковое направление стрелочного перевода проекта 2750 составлял 5–40 км/ч.

Сравнение наибольших величин показателей динамических качеств груженого транспортера с нормативными значениями [10, 11] показало следующее:

1) наибольшие величины отношений рамных сил к статической осевой нагрузке при движении в прямых участках пути со скоростями до 120 км/ч составляли 0,14 (35 % от нормативного значения 0,40), при движении в круговой кривой радиусом 625 м с непогашенным ускорением 0,89 м/с^2 – 0,26 (65 % от нормативного значения), при движении на боковое направление стрелочного перевода не превышали 0,18 (45 % от нормативного значения 0,4);

2) наибольшие величины коэффициентов вертикальной динамики подрессоренных частей, зарегистрированные по динамическим напряжениям в шкворневом сечении надрессорных балок, при движении в прямых участках пути и в круговой кривой радиусом 625 м со скоростями до 120 км/ч составили

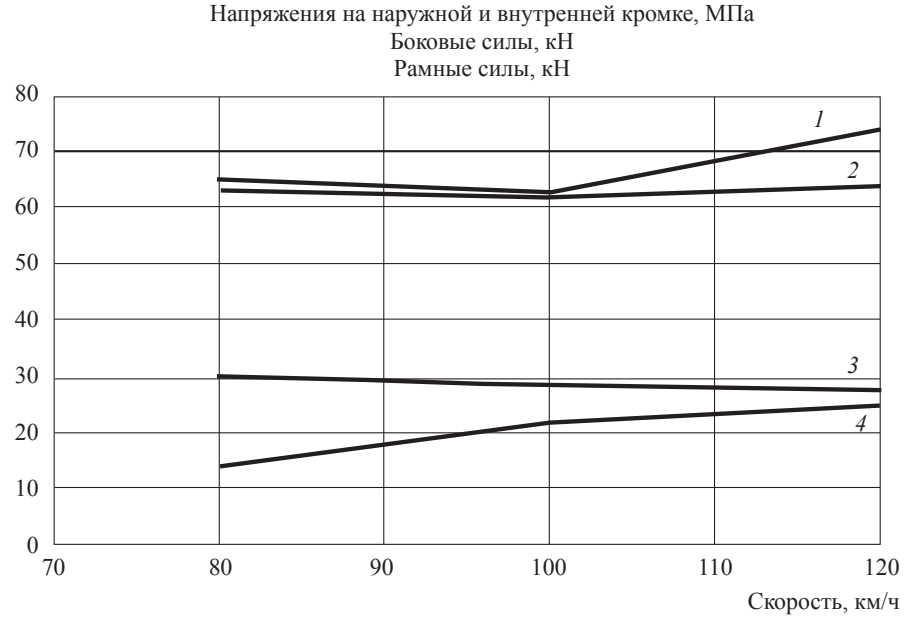


Рис. 2. Зависимости показателей взаимодействия транспортера и пути от скорости движения в прямом участке: *1* – напряжения на наружной кромке, МПа; *2* – напряжения на внутренней кромке, МПа; *3* – боковые силы, кН; *4* – рамные силы, кН

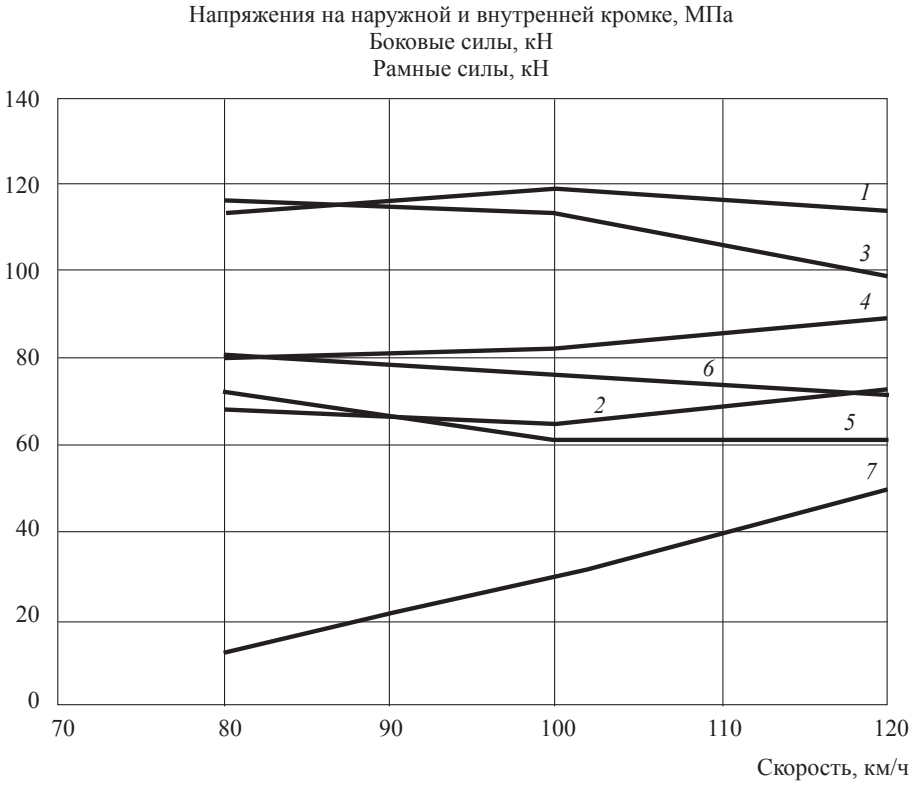


Рис. 3. Зависимости показателей воздействия на путь транспортера в круговой кривой 17 км, R = 625 м: *1* – напряжения на наружной кромке, дер. шп., МПА; *2* – напряжения на внутренней кромке, дер. шп., МПА; *3* – напряжения на наружной кромке, ЖБ. шп., МПА; *4* – напряжения на внутренней кромке, ЖБ. шп., МПА; *5* – боковые силы, дер. шп., кН; *6* – боковые силы, ЖБ. шп., кН; *7* – рамные силы, кН

соответственно 0,28 и 0,19 (46,7 и 31,7% от нормативного значения 0,60), при движении в круговой кривой радиусом 350 м со скоростями до 80 км/ч – 0,14 (35% от нормативного значения).

На рис. 2 и 3 приведены зависимости наибольших наблюденных величин некоторых показателей воздействия на путь груженого транспортера при движении по прямой и круговой кривой радиусом $R = 625$ м.

Из приведенных данных видно, что показатели динамических качеств, устойчивости движения (величины отношений рамных сил к статической осевой нагрузке) и воздействия на путь 8-осного транспортера, загруженного несимметричным грузом с применением балластировки грузонесущей рамы, позволяют организовать его транспортировку с допускаемыми скоростями, аналогичными скоростям универсальных грузовых вагонов на тележках модели 18-100.

Библиографический список

1. Инструкция по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации (инструкция осмотрщику вагонов). – Утв. Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества. – Протокол от 22.05.2009 г. № 50. – С. 28–34.

2. ГОСТ 22235–2010. Вагоны грузовые магистральных железных дорог. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ. – М. : Стандартинформ, 2011. – 18 с.

3. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ГосНИИВ–ВНИИЖТ, 1996. – 319 с. (см. с. 169–170).

4. Львов А. А. Оценка влияния продольного смещения центра тяжести кузова экипажа с двойным подвешиванием на его динамические показатели / А. А. Львов, О. Г. Бржезовская, А. М. Бржезовский // Динамические качества и воздействие на путь локомотивов : труды ВНИИЖТ, вып. 542. – М. : Транспорт, 1975. – С. 155–164.

5. Brzhezovskiy A. Availability of an asymmetrical coach loading at full use of load – carring capasiti / A. Brzhezovskiy // STS-Conference “Wheel/Rail Interface”. – 1999. – P. 559–560.

6. Бржезовский А. М. О нормировании величин удельных инерционных сил, применяемых для расчетов устойчивости и крепления грузов / А. М. Бржезовский, И. В. Смелянский, А. С. Финицкий, Л. М. Мошек // Вестн. ВНИИЖТ. – 2013. – С. 57–65.

7. Бржезовский А. М. Нормы допустимого воздействия на путь и методы испытаний подвижного состава / А. М. Бржезовский, А. В. Заверталюк, Ю. С. Ромен // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 5. – С. 40–45.

8. Бржезовский А. М. Актуализация норм допускаемых скоростей движения железнодорожного подвижного состава на инфраструктуре ОАО «РЖД» / А. М. Бржезовский, Б. Э. Глюзберг, И. В. Смелянский // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 5. – С. 26–33.

9. Инструкция по перевозке негабаритных и тяжеловесных грузов на железных дорогах государств-участников СНГ, Латвийской Республики, Литовской Республики, Эстонской Республики – ДЧ-1835. – М. : Совет по железнодорожному транспорту государств-участников СНГ ; Планета, 2007. – 186 с. (см. с. 53–57).

10. ГОСТ Р 55050–2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на путь и методы испытаний. – М. : Стандартинформ, 2013. – 16 с.

11. ГОСТ 33211–2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – М. : Стандартинформ, 2016. – 54 с. (см. с. 34–36).

References

1. *Instruktsiya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu vagonov v ekspluatatsii (instruktsiya osmotrshchiku vagonov)* [*Instruction on maintenance works of cars in service (instruction for an inspector)*]. Utv. Sovet po zheleznodorozhnomu transport Gosudarstv-uchastnikov Sodruzhestva (appr. by The railway transport council of the Commonwealth Member states). Protocol dated 22.05.2009, N 50, pp. 28–34. (In Russian)

2. *GOST 22235–2010. Vagony gruzoviye magistralnykh zheleznykh dorog. Obshchiye trebovaniya po*

obespecheniyu sokhrannosty pry proizvodstve pogruzochno-razgruzochnykh i manevrovykh rabot [*State Standard 22235–2010. Freight wagons of the main-line railway. General requirements on safety control during loading-unloading and shunting operations*]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 18 p. (In Russian)

3. *Normy dlya rascheta i proyektyrovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)* [*Design code of the MR cars for 1520 mm gauge railroads (unpowered)*]. Moscow, GosNIIV–VNIIZhT Publ., 1996, 319 p. (see pp. 169–170). (In Russian)

4. Lvov A.A., Brzhezovskaya O.G. & Brzhezovskiy A.M. Otsenka vliyaniya prodolnogo smeshcheniya tsentra tyazhesty kuzova ekipazha s dvoinym podveshyvaniyem nay ego dynamicheskiye pokazately [The assessment of axial displacement of a vehicle body gravity center with double-spring suspension impact on its dynamic indices]. *Dynamicheskiye kachestva i vozdeystviye na put lokomotivov. Trudy VNIIZhT* [*Dynamic properties and the influence of motive-power units on the track. Proceedings of VNIIZhT*, vol. 542]. Moscow, Transport Publ., 1975, pp. 155–164. (In Russian)

5. Brzhezovskiy A. Availability of an asymmetrical coach loading at full use of load. Carrying capacity. *STS-Conference "Wheel/Rail Interface"*, 1999, pp. 559–560.

6. Brzhezovskiy A.M., Smelyanskiy I.V., Finitskiy A.S. & Moshek L.M. O normirovanii velichyn udelnykh inertsionnykh syl, primenyaemykh dlay raschetov ustoychivosty i krepleniya gruzov [On magnitude normalization of specific inertial forces, applied for the purpose of buckling and strapping analysis]. *Vestnik VNIIZhT* [*Proceedings of VNIIZhT*]. Moscow, 2013, pp. 57–65. (In Russian)

7. Brzhezovskiy A.M., Zavertalyuk A.V. & Romen Y.S. Normy dopustimogo vozdeistviya na put i metody ispytaniy podvyzhnogo sostava [The norms of admissible impact on the track and the rolling stock test methods]. *Zheleznodorozhniy transport* [*Railroad transport*], 2015, no. 5, pp. 40–45. (In Russian)

8. Brzhezovskiy A.M., Glyuzberg B.E. & Smelyanskiy I.V. Aktualizatsiya norm dopuskayemykh skorostey dvyzheniya zheleznodorozhnogo podvyzhnogo sostava na infrastructure OAO "RZhD" [Updating the norms of the rolling stock permissible speed on OAO "Russian Railways" infrastructure]. *Zheleznodorozhniy transport* [*Railroad transport*], 2017, no. 5, pp. 26–33. (In Russian)

9. *Instruktsiya po perevozke negabaritnykh i tyazhelovesnykh gruzov na zheleznykh dorogakh gosudarstv-uchastnikov SNG*, *Latviyskoy Respubliky*, *Estonskoy Respubliky – DCh-1835* [*The instruction of out-of-gauge and heavy loads shipping on railroads of member states of the CIS*, *Latvian Republic*, *Lithuanian Republic*, *Estonian Republic – DCh-1835*]. Moscow, Soviet of Railway of State-participants of the SNG, Planet Publ., 2007, pp. 53–57. (In Russian)

10. *GOST R 55050–2012. Zheleznodorozhniy podvyzhnoy sostav. Normy dopustymogo vozdeystviya na put i metody ispytaniy* [*GOST R 55050–2012. The rolling stock. The norms of admissible impact on the track and test methods*]. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 16 p. (In Russian)

11. *GOST 33211–2014. Vagony gruzoviye. Trebovaniya k prochnosty i dynamicheskym kachestvam* [*State Standard 33211–2014. Freight wagons. Requirements to strength and dynamic properties*]. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 54 p. (see pp. 34–36). (In Russian)

СМЕЛЯНСКИЙ Игорь Владимирович – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, riky83@mail.ru; *БРЖЕЗОВСКИЙ Александр Менделович – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, s_brz@mail.ru; ТОЛМАЧЕВ Сергей Владимирович – старший научный сотрудник, karst@yandex.ru (АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта»).

УДК 628

**А. К. Стрелков, С. Ю. Теплых, Н. С. Бухман,
П. А. Горшкалев, В. Г. Иванов, А. Б. Пономарев**

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ

Дата поступления:10.01.2018
Решение о публикации: 12.02.2018

Аннотация

Цель: Ранжирование групп дорог по уровню загрязнения пересекаемых водных объектов (на примере Самарской области) по следующим показателям: концентрация взвешенных веществ, окисляемость, содержание сульфатов, железа, нефтепродуктов. Следовательно, представляет интерес ранжирование групп путей по степени превышения предельно допустимой концентрации (ПДК), т. е. выяснение вопроса о том, какая именно группа железных дорог является наиболее или наименее благополучной по тому или иному типу загрязнений. **Методы:** Применены законы математической статистики и теории вероятности. **Результаты:** Анализируя карту-схему Куйбышевской железной дороги, можно сделать вывод о значительном количестве пересечений железнодорожных путей с водными объектами и их непосредственной близости к водным объектам в Самарской, Ульяновской областях и Республике Татарстан. Среднее значение пересечений на 1 км составляет 0,549 км, т. е. на каждые 500 м приходится примерно одно пересечение железнодорожных путей с водным объектом. Соответственно каждые 500 м в водный объект с четырех сторон поступает поверхностный сток с транспортных путей и прилегающей территории. В пределах каждого из этих направлений железнодорожных путей по Самарской области имеется значительное количество (до 20) гидропостов, проводящих систематический контроль уровня загрязнения воды. Следует отметить, что уровень превышения ПДК в пределах разных групп путей по различным видам загрязнений существенно (иногда в разы) отличается. **Практическая значимость:** Решение вопроса о достоверно большей загрязненности путей через расчет устойчивых связей с учетом эмпирического среднеквадратичного отклонения по направлениям позволит выяснить, какие именно направления железной дороги по Самарской области нуждаются в первоочередных природоохранных мероприятиях.

Ключевые слова: Загрязнения, железнодорожные пути, поверхностный сток, пересечение с водными объектами, водоспускные сооружения, мосты и мостовые переходы.

Alexander K. Strelkov, D. Eng. Sci., professor, head of a chair; **Svetlana Yu. Teplykh**, Cand. Eng. Sci, associate professor, kafvv@mail.ru; **Nikolay S. Bukhman**, D. Sci. in Physics and Mathematics, professor, head of a chair, nik3141rambler@rambler.ru; **Pavel A. Gorshkalev**, Cand. Eng. Sci., associate professor, kafvv@mail.ru (Architecturo-building Institute, Samara Polytech Flagship University); **Victor G. Ivanov**, D. Eng. Sci., professor; ***Andrey B. Ponomarev**, Cand. Eng., Sci., associate professor, pol1nom@yandex.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) THE IMPACT OF RAILROAD TRANSPORT COMPLEXES ON WATER BODIES OF THE SAMARA REGION

Summary

Objective: To rank groups of roads according to the level of pollution of the crossed water objects (the case of the Samara region) by the following indices: suspended materials concentration, acidity, the content of sulfates, iron, and petroleum. Therefore, ranking of groups of tracks according to the level

of maximum permissible concentration (MPC) exceeding is of interest, that is figuring out which of the groups of tracks is the most and the least safe according to this or that type of pollution. **Methods:** The laws of mathematical statistics, as well as probability theory were applied. **Results:** By analyzing the sketch-map of Kuybyshev railroad, it a conclusion can be made on a considerable number of crossings of railway tracks with water objects and their immediate proximity to water objects in Samara and Ulyanovsk regions, as well as the Republic of Tatarstan. The average value of crossings comprises 0,549 km per 1 kilometer, that is for each 500 m there is approximately one crossing of railway track with the water object. Subsequently, every 500 m the water object receives a four-sided surface run-off from the tracks and the near-by territory. There is a considerable number of gauging stations (up to 20) within the boundaries of each of railway track directions in the Samara region, that perform systematic monitoring of water contamination level. It should be mentioned that the exceeding level of MPC within the limits of different groups of tracks according to different types of pollution differs substantially (sometimes significantly). **Practical importance:** The solution of the issue on statistically high level of track pollution by means of stable links calculation taking into account the empirical mean square deviation by directions will make it possible to find out which of the Samara region railroad directions require immediate environmental actions.

Keywords: Pollution, railway tracks, surface run-off, water body crossing, outlet work, bridges and river crossings.

Эволюция развития человечества и создание индустриальных методов хозяйствования привели к образованию глобальной техносферы, одним из элементов которой является железнодорожный транспорт. Природная среда при функционировании элементов техносферы служит источником сырьевых и энергетических ресурсов и пространства для размещения ее инфраструктуры [1–12]. Успешное функционирование и развитие железнодорожного транспорта зависит от состояния природных комплексов, наличия природных ресурсов, развития инфраструктуры искусственной среды и социально-экономической среды общества. Совместное рассмотрение объектов железнодорожного транспорта и природных комплексов можно определить как железнодорожные природно-техногенные комплексы (ЖПТК), с последующим формированием и влиянием на окружающую среду [13].

В свою очередь, состояние окружающей среды при взаимодействии с объектами ЖПТК зависит от инфраструктуры по строительству железных дорог, производству, ремонту и эксплуатации подвижного состава, производственного оборудования, интенсивности использования подвижного состава и других объектов на железных дорогах, результатов научных исследований и их внедрения на предприятиях и объектах отрасли. Достаточно указать, что железнодорожный транспорт России потребляет до 7% добываемого топлива, 6% электроэнергии [13, 14].

Поэтому уровень воздействия ЖПТК на окружающую среду достаточно велик. Характер влияния транспорта на природу определяется составом технических факторов, интенсивностью их воздействия, экологической весомостью воздействия на элементы окружающей среды [15]. Загрязнения от объектов железнодорожного транспорта накладываются на загрязнения от хозяйственно-производственной деятельности предприятий и коммунальных служб городов. Но в связи с тем, что сброс хозяйственно-производственных сточных вод, как правило, является точечным (выпуск) и без очистки запрещен Водным кодексом Российской Федерации, а все предприятия обязаны разрабатывать и согласовывать проекты с «Нормативно-допустимым сбросом в водные объекты», следовательно, можно допустить, что влияние от сброса через выпуски хозяйственно-производственных сточных вод на водотоки имеет место, но оно незначи-

тельно. Расчеты, как правило, выполняются по рыбохозяйственным требованиям с учетом разбавления или без него.

В связи с этим техногенное воздействие на окружающую среду может носить локальный (от единичного фактора) или комплексный (от группы различных факторов) характер. Следует обратить внимание на линейные объекты ЖПТК, которые оказывают постоянное и протяженно-повсеместное действие через поверхностные сточные воды на водотоки водных объектов. Эти воздействия, как правило, характеризуются различными коэффициентами экологической опасности в зависимости от их характера, а также вида объекта [16, 17].

В качестве основного объекта исследования ЖПТК рассматривается участок Куйбышевской железной дороги, расположенный в Самарской области. Изучаемые параметры представлены согласно характеристике: геометрические (близость водного объекта); пересеченные, мосты (пересечение с водными объектами); обводненные (близость выхода подземных вод и высокие грунтовые воды); холмисто-гористая местность (смывы, размывы); нарушение отвода поверхностных вод от стен, размывы подтопляемых откосов.

Анализируя карту-схему Куйбышевской железной дороги, можно сделать вывод о значительном количестве пересечений железнодорожных путей с водными объектами и их непосредственной близости к водным объектам в Самарской, Ульяновской областях и Республике Татарстан.

Для изучения характера загрязнений гидросистемы вблизи железнодорожных путей в Самарской области (рис. 1) были выделены

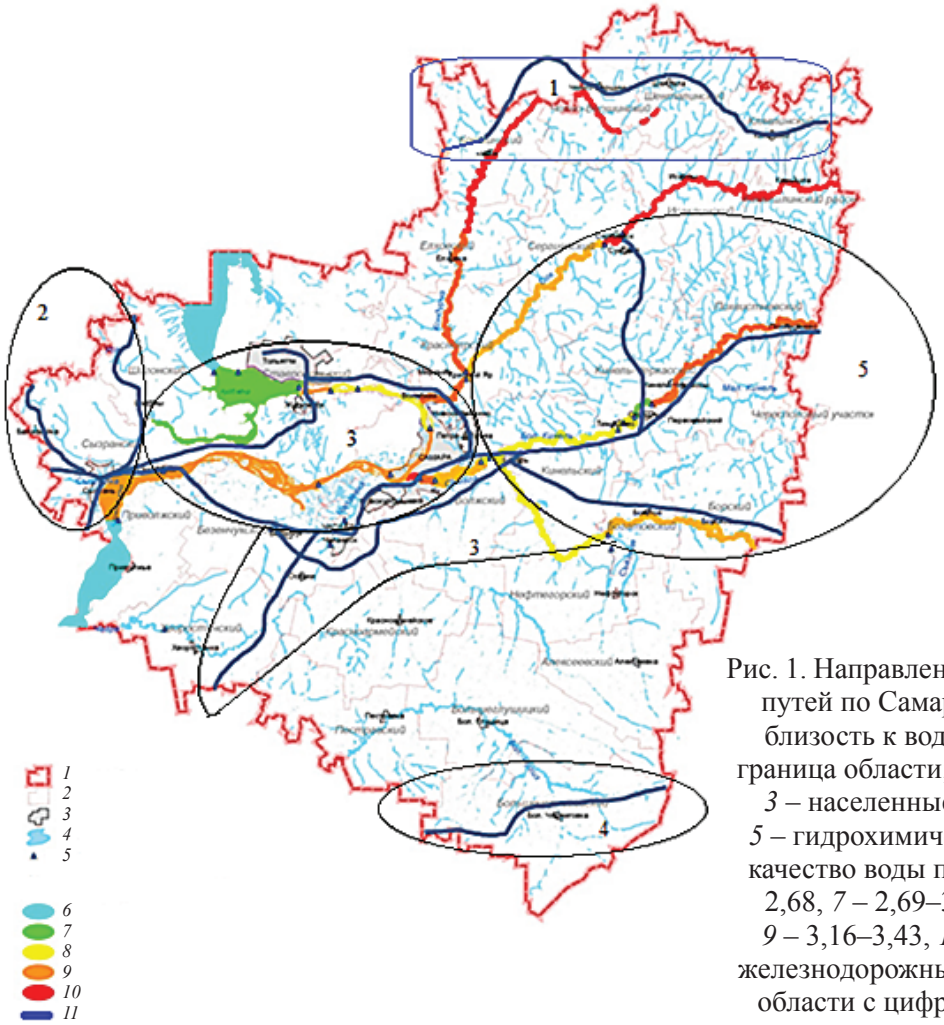


Рис. 1. Направления железнодорожных путей по Самарской области и их близость к водным объектам: *1* – граница области; *2* – граница района; *3* – населенные пункты; *4* – река; *5* – гидрохимические створы; *6–10*: качество воды по УКИЗВ: *6* – 2,20–2,68, *7* – 2,69–3,03, *8* – 3,04–3,15, *9* – 3,16–3,43, *10* – 3,44–4,58; *11* – железнодорожные пути. Обведенные области с цифрами – направления

пять направлений (табл. 1), содержащих группы железнодорожных путей.

Согласно предложенным направлениям, рассмотрим следующие их параметры [18]:

1) протяженность направления по Самарской области,

2) количество пересечений данного направления с водным объектом (включающие: пересечение, мосты, близость водного объекта, обводненность, холмы, склоны, гористая местность) (табл. 2),

3) длина водотока по железнодорожным путям (км), водосборная площадь (км^2), удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ) водного объекта (реки).

Параметры представленных направлений по влиянию железнодорожных путей на водные объекты были разработаны согласно основным положениям «Инструкции по содержанию земляного полотна железнодорожного пути» [18], в которой характеризуются условия содержания земляного полотна, водоотводных, укрепительных и защитных сооружений. В защитные сооружения входят:

– устройства для отведения поверхностных вод (лотки, кюветы, канавы);

– сооружения для перехвата и отведения грунтовых вод (дренажи, канавы, каптажи);

– защитные сооружения (подпорные стенки, волноотбойные стены, волногасители и др.);

– сооружения для защиты (противоселевые, противооползневые, противолавинные и пр.).

Рассмотренные сооружения в основном направлены на защиту земляного полотна железных дорог от влияния поверхностных водных масс, особенно расположенных в холмисто-гористой местности. Следует отметить влияние географического расположения (холмисто-гористой местности) железнодорожных путей на выбор защитных сооружений, которые обусловливают перехват, задержание и/или перенаправление поверхностных сточных вод.

При каждом виде непосредственной близости или пересечения водного объекта с железнодорожными путями происходят перенесение и смыв загрязнений, на них расположенных, а также с полосы отвода в поверхностный водный объект [19, 20].

Среднее значение пересечений на 1 км составляет 0,549 км, т. е. на каждые 500 м при-

ТАБЛИЦА 1. Направления и группы железнодорожных путей по Самарской области

№ направления	Близлежащие филиалы ОАО «РЖД»	Группа железнодорожных веток
1	Горьковская железная дорога	Кошки–Клявлино
2	Московская железная дорога	Пенза–Сызрань, Инза–Сызрань
	Приволжская железная дорога	Саратов–Сызрань
	Горьковская железная дорога	Ульяновск–Сызрань
3	Куйбышевская железная дорога	Сызрань–Жигулевское море, Безенчук–Кинель, Сызрань–Самара, Самара–Тольятти, Тимашево–Сургут
4	Приволжская железная дорога	Юг–Н. Кармелик–Большеиргизский
5	Приволжская железная дорога	Звезда–Ишково
	Южно-Уральская железная дорога	Самара–Похвистнево, Смышляевка–Борское

ТАБЛИЦА 2. Параметры направлений железнодорожных путей по Самарской области

№ направления	Группа железнодорожных веток	*l*, км	*N*	*n*	*L*, км	*F*, км^2	*Ft*	УКИЗВ реки
1	Кошки–Клявлино	198	235	0,84	137,5	2039,1	239,2	3,44–4,58
2	Пенза–Сызрань	25	30	0,83	35,36	1189,2	283,3	2,20–2,68
	Инза–Сызрань	14	38	0,37	35,36	1189,2	283,3	2,20–2,68
	Саратов–Сызрань	23	50	0,46	38,3	528,5	123,2	2,20–2,68
	Ульяновск–Сызрань	85	225	0,38	55,25	1348,1	239,2	2,20–2,68
3	Сызрань–Жигулевское море	110	233	0,47	54,78	646,4	188,9	2,20–2,68
	Безенчук–Кинель	108	206	0,52	39,1	421,5	188,9	3,16–3,43
	Сызрань–Самара	136	124	0,54	44,0	1130,8	188,9	3,44–4,56
	Самара–Тольятти	119	219	0,54	201,5	15773,9	188,9	3,44–4,58
	Тимашево–Сургут	84	157	0,54	–	1254,5	188,9	3,16–3,43
4	Юг–Н. Кармелик–Большеиргизский	94	182	0,52	94,0	4051,4	123,2	2,20–2,68
5	Звезда–Ишково	67	158	0,42	44,0	1130,8	123,2	2,20–2,68
	Самара–Похвистнево	163	236	0,69	74,1	1015,5	342,0	3,04–3,43
	Смышляевка–Борское	100	180	0,56	174	6037,6	342,0	3,04–3,15
Среднее значение		1326	2271	0,549				

Примечание: *l* – длина участка; *N* – количество пересечений по длине участка, шт.; *n* – среднее количество пересечений на 1 км, шт.; *L* – длина водотока и притоков вдоль железнодорожного пути, км; *F* – водосборная площадь, км^2; *Ft* – грузонапряженность, млн тонн брутто/км.

ходится примерно одно пересечение железнодорожных путей с водным объектом. Соответственно каждые 500 м в водный объект с четырех сторон поступает поверхностный сток, смывая загрязнения, находящиеся на железнодорожных путях и прилегающей территории, которые транспортируются в водоем и влияют на качественные показатели состава воды в нем [20].

По каждому выбранному направлению были определены длины водотоков и части ближайших притоков, которые и обозначили водосборную площадь для отдельно взятого направления. Выбранные направления можно разделить на две основные группы.

Первая группа – не влияющая по своим параметрам на УКИЗВ при транзитных массопереносах загрязняющих веществ по акваториям водных объектов Самарской области: направление 2 (Пенза–Сызрань, Инза–Сызрань, Саратов–Сызрань, Ульяновск–Сызрань) – Московская железная дорога, следует уделять значительно больше внимания постоянной реконструкции, ремонту и усовершенствованию верхнего строения пути и сооружениям на них; направление 3 (Сызрань–Жигулевское море); направление 4 (Юг–Н. Кармелик–Большеиргизский); направление 5 (Звезда–Ишково) – незначительная обводненность данных участков, загрязнения не переносят-

ся в водоток, а сохраняются в полосе отвода железнодорожных путей [16].

Вторая группа – влияет по своим параметрам на УКИЗВ при транзитных массопереносах загрязняющих веществ по акваториям водных объектов Самарской области: направление 1 (Кошки–Клявлино) – большая обводненность территории водосброса, несколько пересечений с р. Кондурча, отдаленный участок, не уделяется достаточного внимания капитальному и плановому ремонтам; направление 3 (Безенчук–Кинель, Сызрань–Самара, Самара–Тольятти, Тимашево–Сургут) – все участки расположены в непосредственной близости от водотоков 100–200 м, после ст. Кинель движение поездов осуществляется дизель-локомотивами, что обусловливает повышенные величины загрязнения атмосферного воздуха и почвы, впоследствии загрязнения смываются поверхностными сточными водами в реки Самару и Волгу; направление 5 (Самара–Похвистнево, Смышляевка–Борское) – все участки находятся в непосредственной близости от водотоков 100–200 м, для них свойственно максимальное значение грузонапряженности, в центре области наблюдается постоянный вынос груза с платформ, впоследствии загрязнения смываются поверхностными сточными водами в реки Самара и Кинель.

В пределах каждой из указанных групп путей по Самарской области имеется значительное количество (до 20) гидропостов [21], проводящих систематический контроль уровня загрязнения воды. Для последующего анализа были использованы следующие параметры, характеризующие загрязнение водных ресурсов:

1) концентрация взвешенных веществ, мг/л;
2) окисляемость, мг/л;
3) концентрация сульфатов, мг/л;
4) концентрация железа, мг/л;
5) концентрация нефтепродуктов, мг/л.

Следует отметить, что в пределах каждой из групп путей уровень и характер загрязнения вод существенно варьирует от одного гидропоста к другому. Поэтому для перечисленных выше загрязнений по каждой группе путей были найдены эмпирические средние значения (характеризующие средний уровень соответствующих загрязнений) и эмпирические среднеквадратичные отклонения (характеризующие вариацию соответствующего параметра в пределах данной группы путей). Полученные результаты сведены в табл. 3. В каждой ячейке этой таблицы указано среднее значение соответствующего параметра по соответствующей группе путей и (после знака ±) его среднеквадратическое отклонение от среднего. В последней строке таблицы приведена предельно допустимая концентрация (ПДК) загрязнения [5].

Соответствие уровня загрязнений нормативам на сброс сточных вод в рыбохозяйственные водоемы приведено в табл. 4. В ней знаком «+» выделены ячейки, в которых загрязнения в основном ниже норматива (т. е. основная часть проб соответствует нормативам), знаком «–» – ячейки, в которых нормативы много-

ТАБЛИЦА 3. Концентрации загрязняющих веществ по группам и направлениям

Номер группы путей	Окисляемость, мг/л	Концентрация, мг/л			
		взвешенных веществ	сульфатов	железа	нефтепродуктов
1	6,5±0,6	29±9	450±150	0,6±0,05	0,08±0,015
2	7,6±1,3	6±5	100±18	0,6±0,05	0,1±0,05
3	5,7±1,3	50±23	321±132	0,52±0,111	0,11±0,05
4	6,0±1,0	20±1	72±14	0,3±0,05	0,1±0,05
5	5,0±1,0	53±24	254±59	0,48±0,03	0,11±0,055
ПДК	5–10	<7,25	<100	<0,1	<0,05

ТАБЛИЦА 4. Качественный анализ загрязнений

Номер группы путей	Окисляемость, мг/л	Концентрация, мг/л			
		взвешенных веществ	сульфатов	железа	нефте-продуктов
1	+	–	–	–	–
2	+	±	±	–	–
3	±	–	–	±	–
4	±	–	+	–	–
5	±	–	–	–	±

кратно превышены (т. е. основная часть проб не отвечает нормативам) и знаком «±» – ячейки, в которых среднее значение показателя загрязнения отличается от ПДК меньше, чем на среднеквадратичное отклонение (очевидно, в этом случае часть проб соответствует нормативам, а часть – нет).

Из табл. 4 видно, что нормой, к сожалению, является существенное превышение ПДК загрязняющих веществ.

Нужно отметить, что уровень превышения ПДК в пределах разных групп путей по различным видам загрязнений существенно (иногда в разы) отличается. Потому представляет интерес ранжирование групп путей по степени превышения ПДК, т. е. выяснение вопроса о том, какая именно группа железных дорог является наиболее или наименее благополучной по тому или иному типу загрязнений. Решение этого вопроса позволяет выяснить, какие именно направления Куйбышевской железной дороги нуждаются в первоочередных природоохранных мероприятиях.

При решении данной задачи следует иметь в виду, что прямое сравнение средних (по группе дорог) уровней загрязнения нерационально, потому что в пределах каждой группы дорог уровень загрязнения существенно варьирует. Очевидно, необходимо принять во внимание эти вариации и, задавшись той или иной доверительной вероятностью, осуществить проверку гипотезы о превышении уровня загрязнения одной группы дорог по сравнению с другой. Результаты расчетов (выполненных в предположении о нормальности соответствующих распределений) приведены на рис. 2, *а–д*. На нем выделены группы железных дорог, обозначенные цифрами в кружках, а стрелками отмечено статистически значимое превышение уровня того или иного загрязнения одной группы дорог над другой (стрелка направлена от группы с меньшим значением параметра к группе с бóльшим). Расчеты были проведены для двух уровней доверия – 68 % (пунктирные стрелки) и 95 % (сплошные стрелки). Необходимость использования относительно невысокого уровня доверия в 68 % связана со значительным уровнем разброса параметров загрязнения в пределах групп железных дорог. Например, заключение о большей или меньшей окисляемости воды в пределах разных групп дорог вообще удается сделать только на этом уровне доверия (предполагающим правильный вывод в среднем в двух случаях из трех). Результаты, полученные на уровне доверия 95 % (правильный вывод в 19 случаях из 20), очевидно, существенно более надежны. Если же две группы дорог не соединены ни сплошной, ни даже пунктирной линией, то это означает, что статистически значимой разницы между такими группами по данному типу загрязнений практически нет и разница средних загрязнений между ними случайна.

Ранжирование групп дорог по уровню загрязнения проведено в табл. 5. В ее столбцах группы дорог выстроены по уровню загрязнения сверху вниз, т. е. наиболее «грязные» дороги находятся в верхних строках, а наиболее

ТАБЛИЦА 5. Ранжирование групп дорог по уровню загрязнения

Концентрация взвешенных веществ, мг/л	Окисляемость, мг/л	Концентрация сульфатов, мг/л	Концентрация железа, мг/л	Концентрация нефтепродуктов, мг/л
5	5	1	3	1
3	3	3	5	2
1	4	5	1	3
4	1	2	2	5
2	2	4	4	4

«чистые» – в нижних. Во всех случаях, кроме окисляемости, значение соответствующего параметра уменьшается сверху вниз. Наличие (или отсутствие) разделительной линии между номерами групп дорог означает существование (или отсутствие) статистически значимой (хотя бы на уровне доверия 68 %) разницы между ними. Впрочем, отметим, что наличие различных групп дорог в одной ячейке табл. 5 еще не означает их полной идентичности и невозможности их ранжирования в пределах самой ячейки. Дело в том, что, например, между группами 5 и 3 по окисляемости (второй столбец табл. 5), действительно, нет статистически значимой разницы, равно как и между группами 3 и 4; тем не менее, между группами 5 и 3 эта разница есть (см. рис. 2, *б*). Поэтому для окончательного решения вопроса о достоверно большей загрязненности той или иной группы дорог следует обращаться к рис. 2, *а–д*.

Приведенный рис. 2 позволяет понять ранжирование железнодорожных путей по обозначенным загрязнениям, что дает возможность более четко установить наиболее загрязненное направление группы железных дорог.

Согласно проведенному ранжированию, из табл. 5 вытекает, что ранжирование групп дорог по концентрации взвешенных веществ и по окисляемости практически совпадают. Из этого следует, что группа дорог 2 (это на-

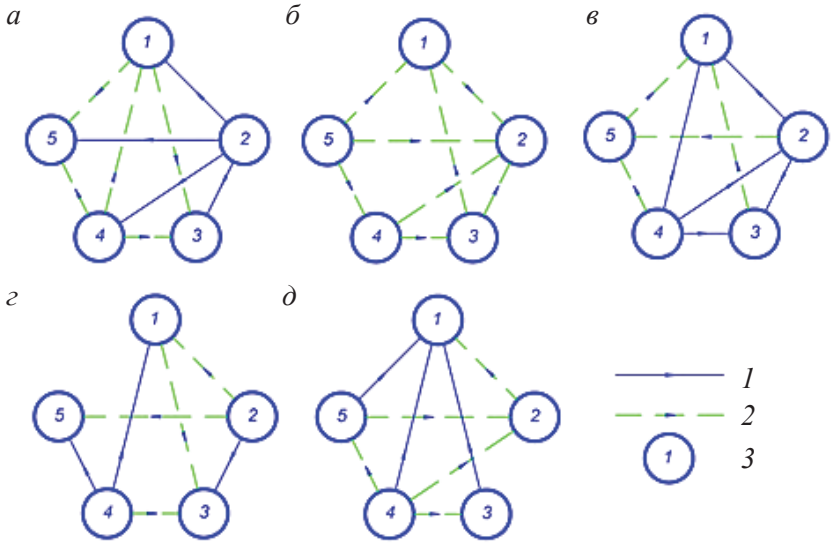


Рис. 2. Результаты расчетов по взвешенным веществам (*а*), окисляемости (*б*), сульфатам (*в*), железа (*г*), нефтепродуктов (*д*), выполненных в предположении о нормальности соответствующих распределений: линиями обозначены устойчивая (*1*) и неустойчивая (*2*) связи минимальная/максимальная с учетом эмпирического среднеквадратичного отклонения по направлениям; *3* – номер направления

правление заканчивается в г. Сызрань) не привносит значительных загрязнений в водные объекты. А группы 3 и 5 являются наиболее загрязняющими окружающую среду и водные объекты. По концентрации сульфатов, железа и нефтепродуктов наиболее благополучной является группа дорог 4, наименее благополучной – 1. Направление 1, расположенное на Севере, через которое в основном проходит грузотоннаж с Урала и уральских металлургических заводов, значительно загрязнено солями металлов.

Проведены анализ уровня воздействия перевозимого грузотоннажа по пяти направлениям нескольких железных дорог ОАО «РЖД» и его сравнение с качеством воды по УКИЗВ при транзитных массопереносах загрязняющих веществ по акваториям водных объектов Самарской области. По пяти выбранным ингредиентам (концентрации: взвешенных веществ, перманганатной окисляемости, сульфатов, железа и нефтепродуктов) выявлены устойчивые и неустойчивые связи между направлениями по загрязнениям водоемов от линейных железнодорожных магистралей с учетом эмпирического среднеквадратичного отклонения. Найденные связи впоследствии позволят прогнозировать максимальное загрязнение водотока от загрязнения дорог, с выбором потенциально опасного направления по загрязняющим веществам, для первоочередного ремонта или реконструкции защитных водоотводящих сооружений.

На основании вышеизложенного для Куйбышевской железной дороги (филиала ОАО «РЖД» в Самарской области) можно сделать следующие выводы:

1) необходимо обратить особое внимание на ремонт и реконструкцию капитальных объектов ЖПТК: по водоспускным сооружениям, малым мостам и мостовым походам при пересечении железной дороги с водными объектами, а также уделять внимание следующим наиболее «грязным» (см. табл. 5) направлениям: 1, 3, 5, где выявлено значительное количество пересечений на 1 км и подтверждается индексом УКИЗВ;

2) для предотвращения загрязнений от объектов ЖПТК в водных объектах рекомендуется выполнить первоочередные природоохранные мероприятия, т. е. установить малые комбинированные очистные сооружения (фильтрующие патроны) для поверхностного стока с территории железнодорожных мостов, мостовых переходов, водоотводных, укрепительных и защитных сооружений.

Библиографический список

1. Федеральный закон РФ «О железнодорожном транспорте в Российской Федерации» от 10.01.2003 г. № 17-ФЗ (ред. от 02.07.2013 г., с изм. от 01.12.2014 г.). – М., 2009. – URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40443 (дата обращения : 08.05.2017).

2. Завьялов С. Ю. Технологии мониторинга и защиты железнодорожного пути от внешних воздействий при взаимодействии с окружающей средой / С. Ю. Завьялов // Геодезия, геоинформатика и навигация – XXI век : тезисы Междунар. конференции. – М. : МИИТ, 2012. – С. 120–122.

3. Ганин О. Б. Экономическая безопасность муниципалитета : генезис, сущность и содержание понятия / О. Б. Ганин, И. О. Ганин // ARS ADMINISTRANDI. – 2015. – Вып. 1. – С. 61–84.

4. Константинов В. М. Охрана природы / В. М. Константинов. – М. : Издат. центр «Академия», 2000. – 255 с.

5. Крупенко Н. Н. Управление природоохранной деятельностью на железнодорожном транспорте : учеб. пособие / Н. Н. Крупенко. – М. : Маршрут, 2004. – 32 с.

6. Воробьев В. В. Кинематические пространственные структуры в градостроительстве / В. В. Воробьев, Я. Д. Козак // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2010. – Вып. 12 (153). – С. 38–43.

7. Блажко Л. С. Требования к материалу защитного слоя, на который укладывается геотекстиль / Л. С. Блажко, В. И. Штыков, Ю. А. Канцибер, А. Б. Пономарев, Е. В. Черняев // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2010. – Вып. 2 (23). – С. 56–63.

8. Железнодорожный путь Поволжья : сб. науч. трудов / под общ. ред. В. А. Покацкого.– Самара : СамГУПС, 2012. – Вып. 1. – 157 с.

9. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь : учебник для вузов ж.-д. транспорта. – 3-е изд., перераб. и доп. / Г. М. Шахунянц. – М. : Транспорт, 1987. – 479 с.

10. Яковлева Е. В. Прогнозировать деформации земляного полотна / Е. В. Яковлева // Путь и путевое хозяйство. – 2005. – № 6. – С. 20–21.

11. Яковлева Т. Г. Железнодорожный путь / Т. Г. Яковлева, Н. И. Карпущенко, С. И. Клинов, Н. Н. Путря, М. П. Смирнов. – М. : Транспорт, 1999. – 405 с.

12. Государственный доклад о состоянии окружающей среды и природных ресурсов Самарской области за 2014 год. – Самара : Министерство лесного хозяйства, охраны окружающей среды и природопользования Самарской области, 2015. – 298 с.

13. Teplykh S. Yu. Characteristics of railroad natural-technogenic complexes / S. Yu. Teplykh, A. K. Strelkov // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 111. – P. 742–747.

14. Богомолов О. А. Экономика и экология железнодорожного транспорта в современных реалиях / О. А. Богомолов // Интернет-журн. «Науковедение». – 2011. – Вып. 1 (6). – С. 12–28.

15. Strelkov A. Liquid filtration properties in gravel foundation of railroad tracks / A. Strelkov, S. Teplykh, N. Bukhman // Journal of Physics. Conference Series. – 2016. – N 738 (1). – P. 120–124.

16. Стрелков А. К. Оценка экологического состояния технической полосы отвода / А. К. Стрелков, С. Ю. Теплых, П. А. Горшкалев, А. М. Саргсян // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 3. – С. 31–34.

17. Теплых С. Ю. Загрязнение водных объектов поверхностными стоками с прилегающих путей железнодорожных станций / С. Ю. Теплых, А. М. Саргсян // Водоочистка. – 2012. – № 2. – С. 31–32.

18. ЦП-544. Инструкция по содержанию земляного полотна железнодорожного пути. – М. : Транспорт, 2000. – 100 с.

19. Стрелков А. К. Определение концентраций загрязнений в поверхностном стоке с железнодорожных путей косвенным методом / А. К. Стрелков, С. Ю. Теплых, П. А. Горшкалев, С. Ф. Коренькова, А. М. Саргсян // Водоснабжение и санитарная техника. – 2013. – № 8. – С. 67–70.

20. Теплых С. Ю. Влияние поверхностного стока с путей на водные объекты / С. Ю. Теплых, А. М. Саргсян // Путь и путевое хозяйство. – 2012. – № 5. – С. 27–29.

21. Гидрометеорологические станции и посты – Самарская область. – URL : http://www.pogoda-sv.ru/nets (дата обращения : 20.01.2018).

References

1. *Federalniy zakon RF "O zheleznodorozhnom transporte v Rossiyskoy Federatsii" ot 10. 01. 2003 g. no. 17-FZ (red. ot 02.07.2013 g., s izm. ot 01.12.2014 g.)* [*Federal law of the Russian Federation "On railroad transport in the Russian Federation" dated 10.01.2003 N 17-FL (ed. dated 02.07.2013, with amend. dated 01.12.2014)*]. Moscow, 2009. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40443/(accessed: 08.05.2017). (In Russian)

2. Zavyalov S. Y. Tekhnologii monitoring i zashchyty zheleznodorozhnogo puty ot vneshnykh vozdeistviy pry vzaimodeistvii s okruzhayushchey sredoy [Technologies of monitoring and protection of the railway track from exposure when interacting with the environment]. *Geodeziya, geoinformatika i navigatsiya – XXI vek: tezisy Mezhdunarodnoy konferentsii* [*Geodesy, geoinformatics and navigation – the 21st century: thesises of the International conference*]. Moscow, MIIT Publ., 2012, pp. 120–122. (In Russian)

3. Ganin O. B. & Ganin I. O. Ekonomicheskaya bezopasnost munitsypaliteta: genesis, sushchnost i soderzhaniye ponyatiya [Economic safety of municipality: genesis, essence and scope]. *ARS ADMINISTRANDI*, 2015, vol. 1, pp. 61–84. (In Russian)

4. Konstantinov V. M. *Okhrana prirody* [*Nature conservation*]. Moscow, Izdat. tsentr "Akademiya" Publ., 2000, 255 p. (In Russian)

5. Krupenko N. N. *Upravleniye prirodookhrannoy deyatelnostyu na zheleznodorozhnom transporte* [*Environmental management on railroad transport*]. Moscow, Marshrut Publ., 2004, 32 p. (In Russian)

6. Vorobyev V. V. & Kozak Y. D. Kinematycheskiye prostranstvenniye struktury v gradostroitelstve [Kinematic space structures in municipal engineering]. *Вісник Придніпровської державної академії*

будівництва та архітектури, 2010, vol. 12 (153), pp. 38–43. (In Russian)

7. Blazhko L. S., Shtykov V. I., Kantsiber Y. A., Ponomarev A. B. & Chernyayev Y. V. Trebovaniya k materialu zashchytnogo sloya, na kotoriy ukladyvayetsya geotekstyl [The requirements of protective coating material on which geotextile is laid]. *Izv. Peterb. gos. un-ta putey soobshcheniya* [*Proc. of Petersburg State Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2010, vol. 2 (23), pp. 56–63. (In Russian)

8. *Zheleznodorozhniy put Povolzhya:* sb. nauch. trudov [*The Volga region railway track:* coll. of research papers]. Pod obshch. red. V. A. Pokatskogo. Samara, SamGUPS Publ., 2012, vol. 1, 157 p. (In Russian)

9. Shakhuyants G. M. *Zheleznodorozhniy put:* uchebnik dlya vuzov zh.-d. transporta [*Railway track:* railroad transport college textbook]. Moscow, Transport Publ., 1987, 479 p. (In Russian)

10. Yakovleva Y. V. Prognozyrovat deformatsii zemlyanogo polotna [Predicting subgrade defomations]. *Put i putevoye khozyaistvo* [*Track and track facilities*], 2005, no. 6, pp. 20–21. (In Russian)

11. Yakovleva T. G., Karpushchenko N. I., Klinov S. I., Putrya N. N. & Smirnov M. P. *Zheleznodorozhniy put* [*Railway track*]. Moscow, Transport Publ., 1999, 405 p. (In Russian)

12. *Gosudarstvenniy doklad o sostoyanii okruzhayushchey sredy i prirodnykh resursov Samarskoy oblasty za 2014 god* [*State report on the environmental state and natural resources of the Samara region over 2014*]. Samara, Ministerstvo lesnogo khozyaistva, okhrany okruzhayushchey sredy i prirodopolzovaniya Samarskoy oblasty [The Ministry of forestry, environmental protection and nature management of the Samara region] Publ., 2015, 298 p. (In Russian)

13. Teplykh S. Yu. & Strelkov A. K. Characteristics of railroad natural-technogenic complexes. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 111, pp. 742–747.

14. Bogomolov O. A. Ekonomika i ekologiya zheleznodorozhnogo transporta v sovremennykh realiyakh [The railroad transport economy and ecology in realities of the modern world]. *Internet-zhurnal "Naukovedeniye"* [*Internet newsletter "Science of science"*], 2011, vol. 1 (6), pp. 12–28. (In Russian)

15. Strelkov A., Teplykh S. & Bukhman N. Liquid filtration properties in gravel foundation of railroad tracks. *Journal of Physics. Conference Series*, 2016, N 738 (1), pp. 120–124.

16. Strelkov A. K., Teplykh S. Y., Gorshkalev P. A. & Sargsyan A. M. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya tekhnicheskoy polosy otvoda [The assessment of ecological state of the industrial right-of-way]. *Put i putevoye khozyaistvo* [*Track and track facilities*], 2014, no. 3, pp. 31–34. (In Russian)

17. Teplykh S. Y. & Sargsyan A. M. Zagryazneniye vodnykh obyektov poverkhnostnymy stokamy s prylegayushchykh putey zheleznodorozhnykh stantsiy [Water body pollution by surface flows from adjacent tracks of railway stations]. *Vodoochistka* [*Water treatment*], 2012, no. 2, pp. 31–32. (In Russian)

18. TsP-544. *Instruktsiya po soderzhaniyu zemlyanogo polotna zheleznodorozhnogo puty* [*Instruction on roadbed maintenance of the railway track*]. Moscow, Transport Publ., 2000, 100 p. (In Russian)

19. Strelkov A. K., Teplykh S. Y., Gorshkalev P. A., Korenkova S. F. & Sargsyan A. M. Opredeleniye kontsentratsiy zagryazneniy v poverkhnostnom sloke s zheleznodorozhnykh putey kosvennym metodom [The indirect method of pollutional load determination in the railway track surface run-off]. *Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika* [*Water supply and sanitary engineering*], 2013, no. 8, pp. 67–70. (In Russian)

20. Teplykh S. Y. & Sargsyan A. M. Vliyaniye poverkhnostnogo stoka s putey na vodniye obyekty [The influence of the track surface run-off on water objects]. *Put i putevoye khozyaistvo* [*Track and track facilities*], 2012, no. 5, pp. 27–29. (In Russian)

21. Gidrometerologicheskiye stantsii i posty – Samarskaya oblast [*Hydrometeorological stations and facilities – the Samara region*]. URL: http://www.pogoda-sv.ru/nets (accessed: 20.01.2018). (In Russian)

СТРЕЛКОВ Александр Кузьмич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой; ТЕПЛЫХ Светлана Юрьевна – канд. техн. наук, доцент, kafvv@mail.ru; БУХМАН Николай Сергеевич – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой, nik3141rambler@rambler.ru; ГОРШКАЛЕВ Павел Александрович – канд. техн. наук, доцент, kafvv@mail.ru (Архитектурно-строительный институт, Самарский государственный технический университет); ИВАНОВ Виктор Григорьевич – д-р техн. наук, профессор; *ПОНОМАРЕВ Андрей Борисович – канд. техн. наук, доцент, pol1nom@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I).

УДК 629.423.1:621.3

Т. С. Титова, Е. И. Макарова, М. Ю. Изварин, Е. В. Опарина

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТЯГОВОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СЕРИИ ЭП1 ПРИ ВЫХОДЕ ИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

Дата поступления: 20.11.2017
Решение о публикации: 20.12.17

Аннотация

Цель: Определение максимальной продолжительности переходных процессов выхода из режима электрического рекуперативного торможения; выбор альтернативного алгоритма выхода из режима рекуперативного торможения, обеспечивающего разрыв силовой цепи обмоток возбуждения без токовой нагрузки. **Методы:** Использовался метод компьютерного имитационного моделирования. **Результаты:** Найдены интервальные задержки программного формирования команд управления аппаратами силовой цепи – тормозными переключателями, которые необходимы для замены функций электромеханических реле времени в цепях управления. Рекомендован альтернативный алгоритм выхода из режима рекуперативного торможения, который позволит повысить ресурс работы силовых контакторов, избежать коммутационных перенапряжений в цепи обмоток возбуждения тяговых электродвигателей без увеличения длительности процесса выхода из рекуперации. **Практическая значимость:** Результаты применимы для модернизации микропроцессорных систем управления электровозов серий ЭП1, ЭП1М, 2ЭС5К, ЭП2К при проведении заводских ремонтов 1-го и 2-го объема.

Ключевые слова: Электромагнитные процессы, микропроцессорная система управления, тяговый электропривод, рекуперативное электрическое торможение.

Tamila S. Titova, D. Eng. Sci, professor, head of a chair, prorector for research; **Elena I. Makarova**, D. Eng. Sci., professor, dean; **Mikhail Y. Izvarin**, Cand. Eng. Sci., associate professor; ***Yekaterina V. Oparina**, postgraduate student, sirayaekaterina@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN ELECTRIC TRACTION DRIVE OF AN EP1 LINE DIRECT CURRENT ELECTRIC LOCOMOTIVE IN THE PROCESS OF ELECTRIC REGENERATIVE BRAKING RECOVERY

Summary

Objective: To determine maximum duration of transient processes of recovery from electric regenerative braking mode; to select an alternative algorithm of recovery from regenerative braking mode, providing the field power circuit break without current load. **Methods:** The method of computer simulation modeling was used. **Results:** The interval delays in software command shaping of power circuit devices control – brake switches, which are necessary for function replacement of electromechanical time delay relay in control circuits, were found. An alternative algorithm of recovery from regenerative braking mode was suggested, making it possible to improve operational life of power contactors, and avoid switching surges in field circuits of traction electric motors without increasing the recovery process time. **Practical importance:** The results of the study can be applied in modernization of microprocessor-based control systems of electric locomotives EP1, EP1 M, 2ES5 K, EP2 K while conducting the 1st and 2nd level factory repair.

Keywords: Electromagnetic processes, microprocessor-based control system, electric traction drive, regenerative motor braking.

Системы управления отечественных электровозов серий ЭП1, ЭП1М, 2(3)ЭС5К являются однопроцессорными. Управление силовым электрооборудованием осуществляется посредством параллельных каналов ввода–вывода дискретных сигналов и с помощью цепей управления, содержащих элементы «жесткого» схемного электрического блокирования работы оборудования (электромеханические реле, реле времени, блокировочный аппарат).

Совершенствование системы управления силовым электрооборудованием направлено на замену релейно-контактной подсистемы программно-логическим алгоритмом, реализуемым совокупностью бортовых микроконтроллеров [1, 2]. В этой связи функции электромеханических реле времени, служащие для обеспечения бестокового переключения силовых коммутационных аппаратов, изменяющих конфигурацию силовых цепей в режимах тяги и рекуперативного торможения, должны быть заменены программными интервальными задержками [1, 2].

В статье приводятся результаты исследования длительности электромагнитных процессов выхода из рекуперативного торможения электровоза переменного тока с зонно-фазовым регулированием, которые служат основанием для определения необходимых интервальных задержек в алгоритмах управления силовыми электроаппаратами.

Многофункциональная компьютерная модель электровоза переменного тока с зонно-фазовым регулированием

Для определения максимальной длительности переходных процессов в тяговом приводе электровозов переменного тока ЭП1, ЭП1М при выходе из режимов тяги и рекуперативного торможения использована многофункциональная компьютерная модель электровоза переменного тока с зонно-фазовым регулированием, разработанная сотрудниками кафедры «Электрическая тяга» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I [3–5]. Модель содержит блоки: тяговой подстанции, тяговой сети, тяговых электродвигателей (ТЭД), механической части электропривода, тягового трансформатора, выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП), выпрямительного устройства возбуждения (ВУВ), датчиков токов тяговых электродвигателей (ТЭД), а также систему автоматического управления (САУ), содержащую блоки регуляторов тока якоря (РТЯ) и тока возбуждения (РТВ), блоки системы зонно-фазового управления ВИП, синхронизации, формирования углов инвертирования ВИП [3, 4]. Моделирование переходных процессов в ТЭД для режима рекуперативного торможения осуществляется на основе анализа электромагнитных схем замещения тяговых двигателей независимого возбуждения, а также механической части тягового электропривода [6–8].

Исследование электромагнитных процессов в тяговом приводе электровоза переменного тока при выходе из режима электрического рекуперативного торможения

При входе в режим рекуперативного торможения программным блоком управления ВИП устанавливается 4-я зона регулирования с постоянным фазовым углом 90°. Стабилизация тока якорей ТЭД при этом производится работой регулятора тока возбуждения РТВ, повышающего ток возбуждения от 0 до номинальной величины. По мере снижения скорости торможения и достижения током возбуждения номинальной величины 845 А дальнейшая стабилизация тока якорей ТЭД осуществляется регулятором тока рекуперации РТР, посредством которого во взаимодействии с программным блоком переключения зон обеспечивается последовательный перевод зон регулирования ВИП с 4-й на 3-ю, 2-ю и 1-ю. Ток возбуждения при этом остается неизменным [6, 7].

В штатном режиме функционирования релейно-контакторной подсистемы управле-

ния ТЭД электровоза ЭП1 процесс выхода из режима рекуперации начинается с разрыва цепи питания возбуждения посредством размыкания силового контактора К1 под нагрузкой. После этого с интервалом 1–1,5 с, создаваемым электромеханическим реле времени КТ4, формируется команда на отключение питания усилителей-формирователей импульсов управления тиристорами ВИП. Интервальная задержка необходима для затухания магнитного потока ТЭД, во время которой ВИП переходит из режима непрерывного инвертирования к прерывистым токам вследствие снижения ЭДС вращения ТЭД. Уравнение равновесия ЭДС при выходе из рекуперативного торможения имеет вид

$$\frac{n}{4}U_{2m}\left|\sin\omega t\right| = C_v\Phi V - \sum r_я i_я - \sum L_d\frac{di_я}{dt},$$

где $\frac{n}{4}U_{2m}\left|\sin\omega t\right|$ – напряжение n-й секции тяговой обмотки, принимающей участие в работе ВИП; $C_v\Phi V$ – ЭДС вращения тягового электродвигателя; $\sum r_я i_я$ – падение напряжения на активном сопротивлении в цепи якоря; $\sum L_d\frac{di_я}{dt}$ – ЭДС самоиндукции обмотки якоря.

Ток якоря в начале процесса выхода из рекуперации на 4-й, 3-й и 2-й зонах регулирования протекает непрерывно, что обеспечивается более высоким по сравнению с ЭДС тягового трансформатора значением ЭДС вращения $C_v\Phi V$ ($C_v\Phi V - \Sigma L_d\frac{di_d}{dt} > u_2\cdot\frac{n}{4}$). В процессе непрерывного инвертирования отключение контакторов питания усилителей-формирователей импульсов управления тиристорами ВИП приводит к короткому замыканию через открытые плечи инвертора и тяговую обмотку трансформатора на следующей после отключения контакторов полуволне напряжения. В этой связи необходима интервальная задержка отключения контакторов питания усилителей-формирователей импульсов управления ВИП для спадания ЭДС вращения и перехода к прерывистым токам [6, 7, 9].

Выпрямительно-инверторный преобразователь переходит в режим прерывистых токов за счет естественной коммутации приборов при условии $u_2\cdot\frac{n}{4} > C_v\Phi V - \Sigma L_d\frac{di_d}{dt}$. В этом случае создаются наиболее благоприятные условия для отключения контакторов питания усилителей-формирователей импульсов управления тиристорами ВИП [8–10].

На рис. 1 приведены процессы затухания тока рекуперации ТЭД при снятии питания с обмоток возбуждения размыканием силового контактора К1 на 4-й и 1-й зонах регулирования ВИП, как это производится в существующей схеме управления. Из рис. 1 следует, что питание с обмоток возбуждения снимается с разрывом токовой цепи и горением дуги. Переход ВИП к прерывистым токам на 4-й зоне регулирования происходит через 0,25 с, на 1-й зоне регулирования – через 0,4 с.

Были рассмотрены альтернативные способы выхода из режима рекуперативного торможения на разных зонах регулирования, обеспечивающие бестоковый разрыв силовой цепи обмоток возбуждения со следующим порядком действий:

1) программное снятие импульсов управления с ВУВ, последующий разрыв цепи питания обмоток возбуждения, снятие питания с усилителей-формирователей импульсов ВУВ, ВИП, перевод тормозного переключателя в тяговое положение;

2) программное форсированное запирание тиристоров ВУВ путем увеличения углов управления до 160°, последующий разрыв цепи питания обмоток возбуждения ТЭД, снятие питания с усилителей-формирователей импульсов ВУВ, ВИП, перевод тормозного переключателя в тяговое положение.

Переходные процессы выхода из рекуперативного торможения при программном снятии импульсов управления с ВУВ представлены на рис. 2.

Сильная пульсация тока в цепи возбуждения при снятии питания с усилителей-формирователей импульсов ВУВ обусловлена открытым плечом ВУВ. Поддержка спадаю-

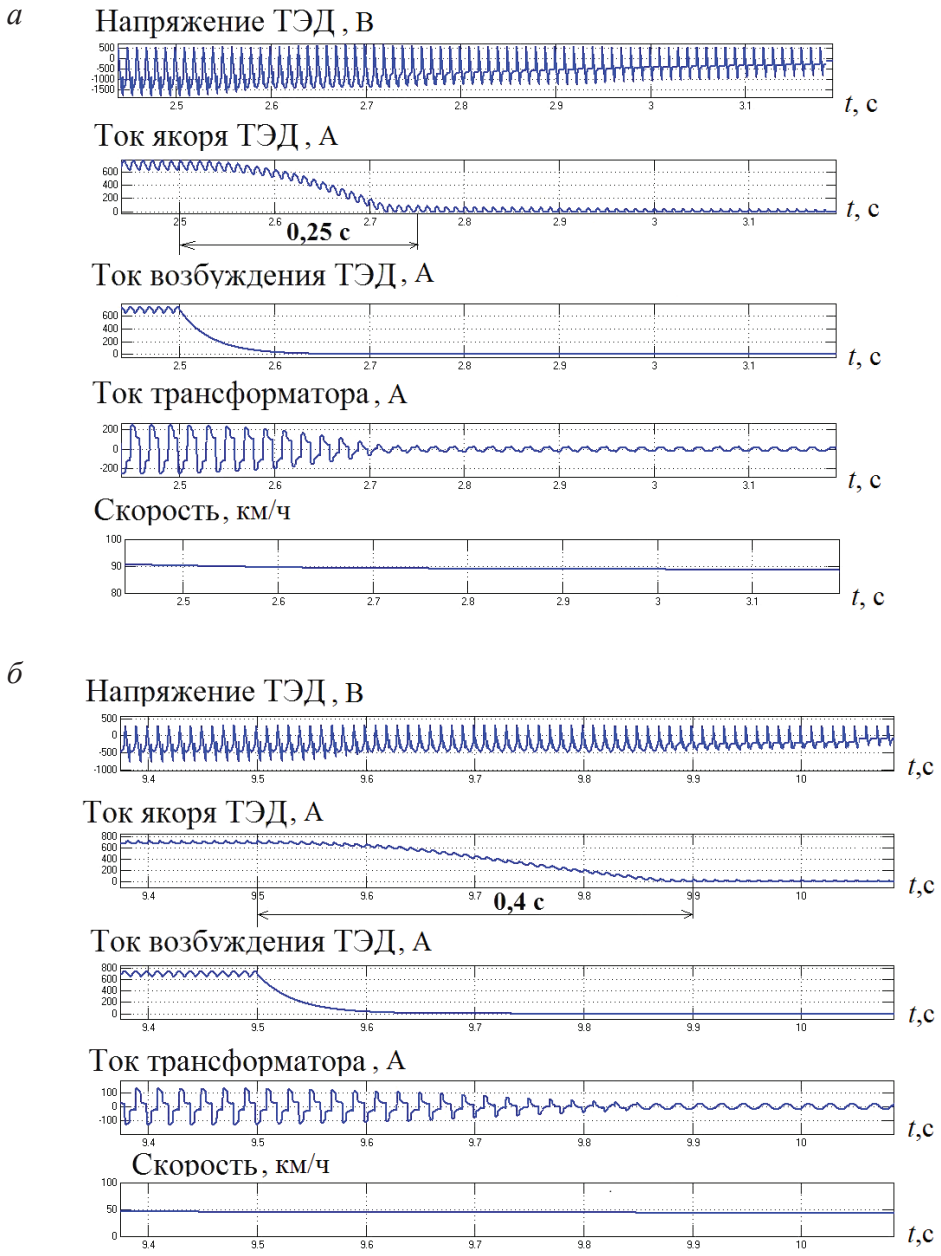
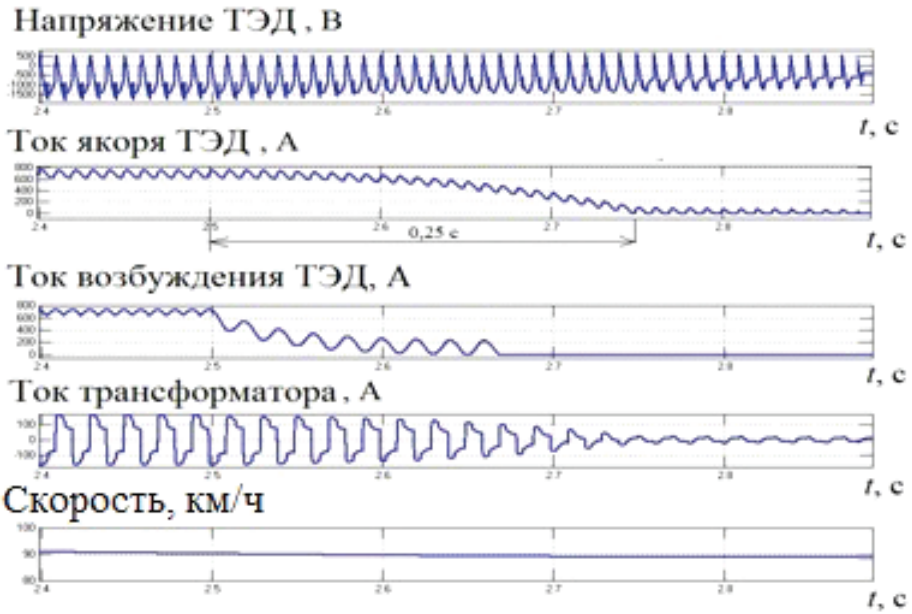


Рис. 1. Переходные процессы при существующем алгоритме выхода из рекуперативного торможения на 4-й (*а*) и 1-й (*б*) зонах работы ВИП

щего тока возбуждения происходит из-за сонаправленности ЭДС трансформатора и ЭДС самоиндукции обмотки возбуждения. Длительность переходного процесса составляет 8–10 периодов (0,18–0,2 с), определяется начальной величиной тока возбуждения, которая при выходе из рекуперативного торможения равна ограничению (700–800 А) и не зависит от зоны регулирования.

Программное запирание ВУВ осуществляется форсированным увеличением угла управления до 160° (α_p = 160°). При этом ток возбуждения спадает за 0,04 с (4 полуволны) на всех зонах регулирования, а переходный процесс спадания тока якоря на 4-й зоне проходит за 0,18–0,2 с, на 1-й зоне – за 0,35–0,4 с, т. е. длительность процесса затухания тока рекуперации практически не изменяется по

а



б

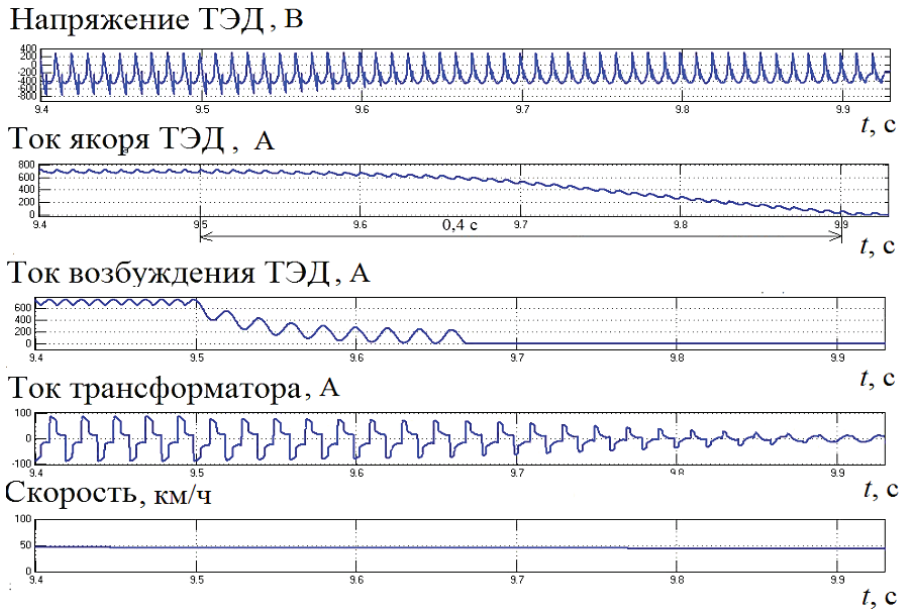
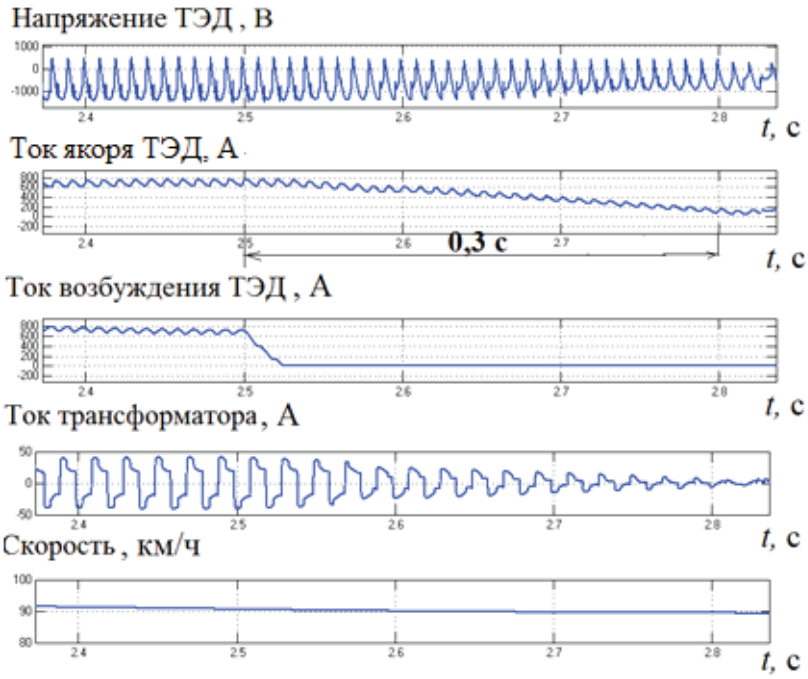


Рис. 2. Переходные процессы в режиме выхода из рекуперативного торможения при снятии питания с усилителей-формирователей импульсов управления ВУВ на 4-й (*а*) и 1-й (*б*) зонах работы ВИП

отношению к штатному режиму размыкания цепи возбуждения ТЭД (рис. 1 и 3). С точки зрения тяжести переходных процессов воспроизведенный способ выхода из рекуперативного торможения путем зарегулирования тиристоров ВУВ наиболее благоприятен.

Полученные в ходе исследования максимальные длительности процессов выхода из режима рекуперативного электрического торможения служат основанием для реализации программно-логических алгоритмов управления силовыми электроаппаратами отечествен-

а



б

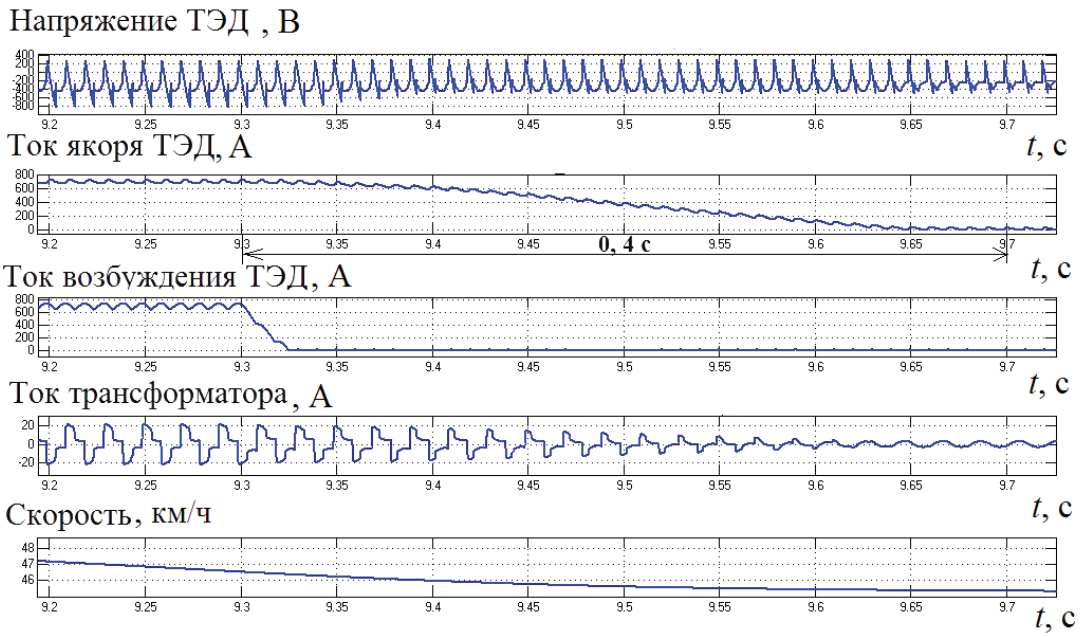


Рис. 3. Переходные процессы в режиме выхода из рекуперативного торможения на 4-й (*а*) и 1-й (*б*) зонах работы ВИП при программном запирании тиристоров ВУВ

ных электровозов серий ЭП1, ЭП1М, ЭП2К, 2(3)ЭС5К.

Наиболее длительные электромагнитные процессы выхода из режима рекуперативного электрического торможения имеют место на 1-й зоне регулирования ВИП вследствие более существенного влияния ЭДС самоиндукции цепи двигателей и сглаживающего реактора по отношению к противодействующей ЭДС тягового трансформатора.

В результате предложен алгоритм бестокового размыкания цепи возбуждения в режиме

выхода из рекуперативного торможения, который позволит повысить ресурс работы силовых контакторов, избежать коммутационных перенапряжений в цепи обмоток возбуждения тяговых электродвигателей без увеличения длительности процесса выхода из рекуперации.

Библиографический список

1. Опарина Е. В. Управление электромеханическими аппаратами ЭПС при помощи микропроцессорных средств / Е. В. Опарина, Е. В. Опарин // Локомотив. – 2013. – № 11. – С. 41–44.

2. Опарина Е. В. Пути оптимизации подсистемы управления электрическими аппаратами электроподвижного состава / Е. В. Опарина // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013. – № 6. – С. 25–29.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013613095. Модель электропоезда переменного тока ЭД9Э для режима тяги / А. А. Богдан, А. М. Евстафьев, А. Н. Сычугов, А. Я. Якушев, И. П. Викулов ; правообладатель ФГБОУ ВПО ПГУПС. – Заявка № 2013611050 от 08.02.2013 г. ; зарегистр. 25.03.2013 г.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013613094. Модель электропоезда переменного тока ЭД9Э для режима рекуперативного торможения / А. А. Богдан, А. М. Евстафьев, А. Н. Сычугов, А. Я. Якушев, И. П. Викулов ; правообладатель ФГБОУ ВПО ПГУПС. – Заявка № 2013611043 от 08.02.2013 г. ; зарегистр. 25.03.2013 г.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013613096. Модель тягового электродвигателя ТЭД2У электропоездов постоянного тока / А. А. Богдан, А. М. Евстафьев, А. Н. Сычугов, А. Я. Якушев ; правообладатель ФГБОУ ВПО ПГУПС. – Заявка № 2013611055 от 08.02.2013 г. ; зарегистр. 25.03.2013 г.

6. Плакс А. В. Системы управления электрическим подвижным составом / А. В. Плакс. – М. : Маршрут, 2005. – 360 с.

7. Плакс А. В. Параметры коллекторных тяговых двигателей при моделировании переходных процессов в цепях электровозов / А. В. Плакс, М. Ю. Изварин // Вестн. ВЭлНИИ. – 2004. – № 1. – С. 112–118.

8. Якушев А. Я. Определение параметров апериодических звеньев, учитывающих влияние вихревых токов тяговых электродвигателей постоянного тока / А. Я. Якушев, А. М. Евстафьев, В. М. Мищенко // Вестн. транспорта Поволжья. – 2014. – № 5. – С. 52–58.

9. Электровоз ЭП1. Руководство по эксплуатации. Т. 1 (в 4 кн.). Кн. 1. ИДМБ.661142.004 РЭ1. Техническое описание. Электрические схемы.– Ростов-н./Д. : СКХТБ «БелРусь», 2006. – 149 с.

10. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации. Кн. 1. ИДМБ.661142.009РЭ1 (ЗТС.001.012РЭ1). Описание и работа. Электрические схемы.– Новочеркасск : Изд-во НЭВЗ, 2004. – 253 с.

References

1. Oparina Y. V. & Oparin Y. V. Upravleniye elektromekhanicheskymy apparatamy EPS pry pomoshchy mikroprotsessornykh sredstv [Operation of EPS electromechanical devices by means of microprocessor hardware]. *Lokomotiv* [*Locomotive*], 2013, no. 11, pp. 41–44. (In Russian)

2. Oparina Y. V. Puty optimizatsii podsystemy upravleniya elektricheskymy apparatamy elektropodvyzhnogo sostava [The means of electrical devices control subsystem optimization of the electric stock]. *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta* [*Electronic engineering and electric equipment for transport*], 2013, no. 6, pp. 25–29. (In Russian)

3. *Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM no. 2013613095. Model elektropoyezda peremennogo toka ED9E dlya rezhyma tyagy* [*Certificate of the computer software state registration N 2013613095. An ED 9E alternating current electric train model for traction mode*]. A. A. Bogdan, A. M. Yestafiyev, A. N. Sychugov, A. Y. Yakushev, I. P. Vikulov; rightholder FGBOU VPO PGUPS. Application N 2013611050 dated 08.02.2013; reg. 25.03.2013. (In Russian)

4. *Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM no. 2013613094. Model elektropoyezda peremennogo toka ED9E dlya rezhyma re-*

kuperativnogo tormozheniya [*Certificate of the computer software state registration N 2013613094. An ED 9E alternating current electric train model for regenerative brake duty*]. A. A. Bogdan, A. M. Yestafiyev, A. N. Sychugov, A. Y. Yakushev, I. P. Vikulov; rightholder FGBOU VPO PGUPS. Application N 2013611043, dated 08.02.2013; reg. 25.03.2013. (In Russian)

5. *Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM no. 2013613096. Model tyagovogo elektrodvigatelya TED2U elektropoyezdov postoyannogo toka* [*Certificate of the computer software state registration N 2013613096. A TED2U traction motor model of direct current electric trains*]. A. A. Bogdan, A. M. Yestafiyev, A. N. Sychugov, A. Y. Yakushev, I. P. Vikulov; rightholder FGBOU VPO PGUPS. Application N 2013611055, dated 08.02.2013; reg. 25.03.2013. (In Russian)

6. Plaks A. V. *Systemy upravleniya elektricheskym podvyzhnym sostavom* [*The electric stock control systems*]. Moscow, Marshrut Publ., 2005, 360 p. (In Russian)

7. Plaks A. V. & Izvarin M. Y. Parametry kollektornykh tyagovykh dvigateley pry modelirovanii perekhodnykh protsessov v tsepyakh elektrovozov [The parameters of collector tractive motors during transient simulation in circuits of electric locomotives]. *Vestnik VElNII* [*VElNII Bulletin*], 2004, no. 1, pp.112–118. (In Russian)

8. Yakushev A. Y., Yevstafiyev A. M. & Mishchenko V. M. Opredeleniye parametrov aperiodicheskykh zveniyev, uchityvayushchykh vliyaniye vikhrevykh tokov tyagovykh elektrodvygateley postoyannogo toka [Identifying the parameters of aperiodic links, allowing for the influence of vertical currents of direct current traction motors]. *Vest. transporta Povolzhya* [*The Volga region transport bull.*], 2014, no. 5, pp. 52–58. (In Russian)

9. *Elektrovoz EP1. Rukovodstvo po ekspluatatsii. Tom 1* (in 4 kn.) *Kn. 1. IDMB.661142.004RE1. Tekhnicheskoye opisaniye. Elektricheskiye skhemy* [*Electric locomotive EP1. Application guide. Vol. 1* (in 4 books). *Book 1. IDMB.661142.004 РЭ1. Work specification. Electric connections*]. Rostov-on-Don, SKKhTB "BelRus", 2006, 149 p. (In Russian)

10. *Elektrovoz magistralniy 2ES5K (3ES5K). Rukovodstvo po ekspluatatsii. Kn. 1. IDMB.661142.009RE1 (ZTS.001.012RE1). Opisaniye i rabota. Elektricheskiye skhemy* [*Mainline electric 2ES5 K (3ES5 K). Application guide. Book. 1. IDMB.661142.009RE1 (ZTS.001.012RE1). Description and operation. Electric connections*]. Novocherkassk, NEVZ Publ., 2004, 253 p. (In Russian)

ТИТОВА Тамила Семеновна – д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой, проректор по научной работе; МАКАРОВА Елена Игоревна – д-р техн. наук, профессор, декан; ИЗВАРИН Михаил Юльевич – канд. техн. наук, доцент; *ОПАРИНА Екатерина Владимировна – аспирант, sirayaekaterina@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 656.073:658.8

Т. С. Титова, О. Д. Покровская

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ТЕОРИИ ТЕРМИНАЛИСТИКИ

Дата поступления:14.02.2018
Решение о публикации:16.03.2018

Аннотация

Цель: Охарактеризовать междисциплинарное положение и научную новизну предлагаемой теории терминалистики. **Методы:** Использован аналитический метод. **Результаты:** Обоснована теоретическая актуальность теории терминалистики посредством проведения анализа проблемных полей, исследуемых известными смежными научными дисциплинами. Отмечены научная новизна и аспекты практического применения теории. Показаны отличительные черты новой теории. Предложены периодизация развития и состав теоретических основ терминалистики, выполнен анализ ключевых научных доктрин, формирующих методологический аппарат терминалистики. **Практическая значимость:** Новое мультинаучное транспортно-логистическое направление позволит интегрировать вопросы перевозки и терминально-складской переработки грузов, рассматривая их не только как локальные транспортные, складские, логистические системы, но и как транспортно-складские системы. Для ОАО «РЖД» оформление всех знаний об объектах терминально-складской инфраструктуры в терминалистику позволит реализовать ключевые направления «Стратегии развития железнодорожного транспорта РФ на период до 2030 года» и выйти на уровень логистического провайдера 3–4 PL-уровня.

Ключевые слова: Терминалистика, транспортно-складские системы, логистические объекты.

Tamila S. Titova, D. Eng. Sci., professor, head of a chair, prorector for research; *** Oksana D. Pokrovskaya**, Cand. Eng. Sci., associate professor, insight1986@inbox.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) INTERDISCIPLINARY PROPOSITION OF THE THEORY OF TERMINALISTICS

Summary

Objective: To characterize an interdisciplinary proposition and scientific novelty of the introduced theory of terminalistics. **Methods:** Analytical method was applied in the study. **Results:** Theoretical topicality of the theory of terminalistics was justified by means of analyzing problematic areas, studied by the allied scientific disciplines. Academic novelty and aspects of practical application of the theory were pointed out. Characteristic features of the new theory were demonstrated. Development periodization and the structure of the theory of terminalistics were suggested, the analysis of scientific doctrines, generating the methodologies of terminalistics, was conducted. **Practical importance:** A new multi scientific transport and logistical approach will make it possible to integrate the issues of hauling and terminal storage handling of freight, regarding them not only as local transport, storage and logistical systems, but as storage-retrieval systems. For OAO “Russian Railways” incorporating the accumulated knowledge of the objects of storage-retrieval infrastructure in terminalistics will make it possible to implement the key directions of “The development strategy of railway transport of the Russian Federation for the period through to 2030” and achieve the 3–4 PL-level of a logistic provider.

Keywords: Terminalistics, storage-retrieval systems, logistical objects.

Актуальность вопроса и постановка задачи исследования

В современных условиях динамичного развития транспортно-логистического рынка, скачкообразности и неопределенности условий транспортно-логистической деятельности для осуществления эффективного сквозного управления процессом перевозок в сложных логистических цепях доставки грузов и достижения целевых показателей работы железнодорожных систем доставки перед наукой стоит задача выработки новых комплексных подходов, интегрирующих инструменты и методы смежных научных дисциплин, расширяя тем самым функциональный арсенал и поле исследования мультидисциплинарных научных направлений. Так, в «Стратегии развития железнодорожного транспорта РФ на период до 2030 года» [1] определено приоритетное развитие объектов терминально-складской инфраструктуры, что требует от современной науки поиска новых методологических инструментов для построения рациональных систем доставки грузов.

Актуальность новой методологии исследования объектов терминально-складской инфраструктуры связана с: 1) отсутствием в настоящее время единого подхода к их изучению и комплексной оценке; 2) усложнением ассортимента логистического сервиса и структуры цепей поставок с участием объектов терминально-складской инфраструктуры; 3) быстрым ростом количества объектов терминально-складской инфраструктуры и требованием рынка к дальнейшему динамичному расширению терминальной сети ОАО «РЖД»; 4) усложнением взаимодействия участников процесса перевозки; 5) недостаточными полнотой, интегрированностью и комплексностью анализа объектов терминально-складской инфраструктуры.

Новое мультинаучное транспортно-логистическое направление позволит интегрировать вопросы перевозки и терминально-складской переработки грузов, рассматривая не только транспортные системы (как транспортные узлы), складские системы (как транспортно-грузовые системы), логистические (как совокупность организованных логистических звеньев), но и как транспортно-складские системы (ТСС). В свою очередь, в рамках новой методологии будет возможно сформулировать те научно-методологические и концептуально-принципиальные основы, которые обеспечат необходимым и достаточным арсеналом «стыкование» пересекающихся в транспортно-логистической деятельности областей научного знания, их систематизацию и концентрацию и оформить, объединить цель и объект исследования в новую методологию комплексного изучения ТСС.

Целью данной работы является характеристика междисциплинарного положения и научной новизны предлагаемой новой теории.

Терминология

Транспортно-складская система, ТСС, – это комплексное, универсальное понятие, объединяющее несколько классов различных логистических объектов (ЛО), логистических районов (ЛР) и логистических областей (ЛОб) как совокупности элементов терминально-складской инфраструктуры транспорта, выполняющих логистические функции. Любую систему доставки грузов можно представить как совокупность двух компонентов – объектов терминально-складской инфраструктуры (ЛО), т. е. складов разных типов, мощности и назначения (накопительно-распределительную складскую систему), и соединяющих их транспортных звеньев (транспортную систему), т. е. как ТСС [2].

Сущность ТСС заключается в понятийной интеграции подсистем транспорта и склада, что позволяет очертить новые границы междисциплинарных исследований по проектированию, изучению, развитию и эксплуатации ТСС, эволюционирующих и самоорганизующихся.

Под **логистическими объектами, ЛО,** предлагается понимать объекты инфраструк-

туры, физически обеспечивающие реализацию транспортно-складского обслуживания различных клиентов, сосредоточенные по совокупности признаков в пространственно определенном районе.

В частности, *железнодорожными* предлагается называть ЛО, относящиеся к терминально-складской инфраструктуре железных дорог, выполняющие функции узловых элементов терминально-логистической системы по техническому обеспечению и практическому выполнению услуг погрузки, выгрузки, хранения и распределения грузов, включая доведение грузов до конечного потребителя, при взаимодействии с участниками системы доставки и другими видами транспорта [3].

Актуальность и междисциплинарное положение терминалистики

На рис. 1 показано, что ТСС существуют и могут рассматриваться в разных качествах (блоки и стрелки слева): как открытые и самоорганизующиеся системы, транспортно-логистические кластеры и логистические системы, что определяет необходимость использования системного, логистического и синергетического подходов, с одной стороны, и их оформления в единый интегрированный методологический подход – с другой. Они могут быть представлены (справа): ЛО, ЛР и ЛОб (от простейших к сложнейшим).

Различные участники процесса перевозок (УПП) применяют свой подход и критериальный аппарат к пониманию сущности ЛО и выбору подходящего для них ЛО. Каждый из УПП, согласно своему функциональному положению (логистическому статусу), преследует собственные интересы в системе доставки грузов. Так или иначе, проблемные поля, интересующие УПП (как профессиональных, так и непрофессиональных), фокусируются на ЛО, поскольку именно в таких объектах как в узловых элементах ТСС их интересы пересекаются. При реализации комплексного транспортно-логистического обслуживания клиентов, усложнении ассортимента логистического сервиса и состава логистических цепей доставки грузов, а также при возрастании роли ЛО в системе доставки задача формирования единых теоретических основ (как «правил игры», как «общего языка») на рынке транспортно-логистических услуг становится актуальной.

Единые концептуальные основы прикладного междисциплинарного исследования могут использоваться каждым УПП при идентификации вида ЛО, в терминологическом

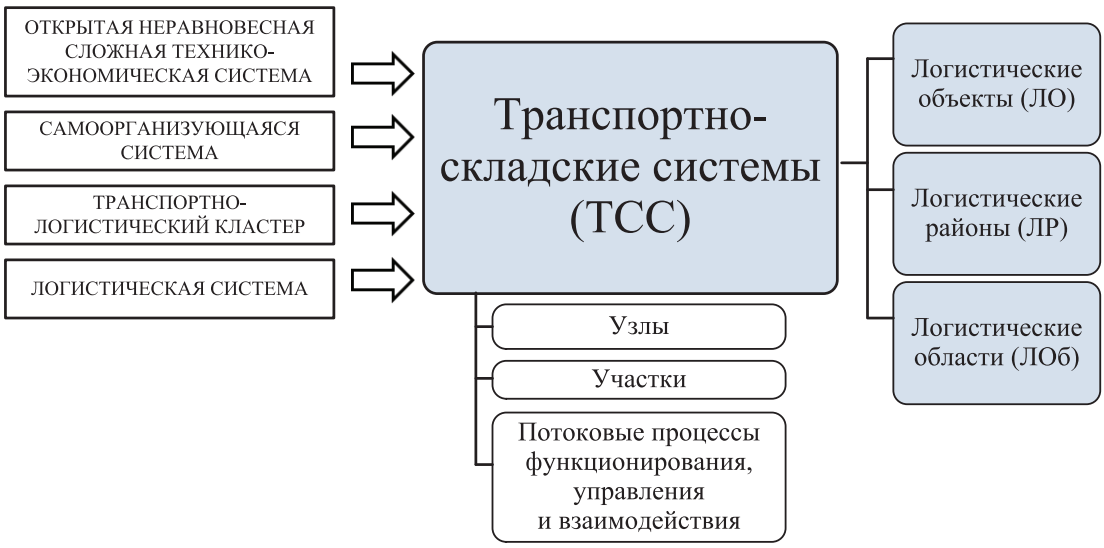


Рис. 1. Многообразие подходов к рассмотрению ТСС и ее состав

аппарате, при подходе к расчету и оценке показателей работы ЛО и т. п. Область интересов такого исследования должна покрывать многие пересекающиеся проблемные поля, возникающие при взаимодействии УПП в ЛО на всех этапах (участников процесса перевозок, УПП – клиенты-профессионалы и непрофессионалы, владельцы приватных ЛО и Холдинг «РЖД», инвесторы – все они выступают в качестве лица, принимающего решения) и интегрировать смежные проблемные поля указанных научных дисциплин, фокусировать их на ЛО для эффективного управления процессами перевозок и взаимодействием УПП.

Проведем сравнительный анализ положения авторской теории терминалистики в современных транспортной и логистической науках, при этом перечень трудов ученых, работающих в смежных с терминалистикой областях, отнюдь не полный, но достаточный для отражения местоположения и отличий терминалистики как новой междисциплинарной теории в известной системе науки.

В табл. 1, 2 рассмотрен состав проблемных полей ряда технических (транспортных) и экономических (логистических) дисциплин. Заливкой выделена область исследования новой методологии, «покрывающая» не рассмотренные базовыми дисциплинами вопросы; «–» означает вопросы, не изучаемые дисциплиной, «+» – ею рассматриваемые.

Как видно, известные научные теории лишь фрагментарно позволяют анализировать ТСС и решать отдельные вопросы по их проектированию и эксплуатации. Преобладание знаков «–» говорит об имеющемся актуальном поле для новых научных разработок и отсутствии междисциплинарного раздела транспортной, экономической и логистической науки, позволяющего «закрыть» недостающие вопросы изучения ТСС и обеспечить тем самым многоаспектность и комплексность подхода к ТСС всех типов.

Проблемная область терминалистики не только закрывает пробелы известных теорий, расширяя горизонт исследований, но и формирует междисциплинарные связи, ориентированные на управление процессами перевозок через ЛО, т. е. ТСС.

Формирование нового междисциплинарного раздела науки по комплексному обследованию ЛО, терминальных сетей и ТСС в целом, область интересов которого покроет и систематизирует их в единую сферу теории и методологии, придаст вектор принимаемым решениям, является актуальным для всех УПП, с одной стороны, и для науки – с другой.

Отличительные черты новой методологии

Новую междисциплинарную методологию будем именовать «терминалистикой». Терминалистика – это логистика терминальных сетей и ЛО – комплексная наука об организации, проектировании, управлении, структуре и конфигурации сетей грузовых терминалов, включая вопросы количества и дислокации узлов терминальной сети (ТС), их функционально-технологического состава, прогнозной и экспертной оценок, с учетом потоковых процессов транспортно-технологического, экономического происхождения и связанного мультипликативного эффекта работы ТС. Логика словообразования – интеграция понятий Terminal (от англ. терминал) + logistics (от англ. логистика) = terminalistics.

Под терминалистикой предлагается понимать терминальную логистику, логистику инфраструктуры транспортно-логистических узлов и ТС. Название этой теории связано с ее назначением. Область исследований терминалистики – увязать вопросы организации перевозок и работы объектов терминально-складской инфраструктуры (складов, грузовых терминалов и других ЛО) с применением методов и инструментов транспортной, экономической и логистической наук.

Методологический, расчетный и концептуальный аппараты терминалистики определяют управление перевозками через ТС и связаны с реализацией транспортно-логистической технологии перевозки «ЛО–ЛО» в расширенной

ТАБЛИЦА 1. Обзор проблемных полей существующих дисциплин транспортной науки

Вопросы/ Дисциплины	Выбор типа механизации ЛО	Размещение оборудования, технологическое зонирование ЛО	Выбор перевозчика, транспортных средств «от ЛО до ЛО»	Расчет технико-эксплуатационных параметров ЛО	Экономическое обоснование инвестиций и альтернативных решений ЛО	Управление ассортиментом сервиса на ЛО	Выбор поставщиков и посредников в цепи доставки с участием ЛО	Проектирование системы доставки груза, организация перевозок через ЛО	Организация и технология работы и эксплуатации ЛО
	ТРАНСПОРТНЫЕ НАУКИ								
Транспортно-грузовые системы	+	–	–	+	+	–	–	–	+
Сервис на транспорте	–	–	+	–	–	+	+	–	–
Терминально-логистические комплексы	+	+	–	+	+	+	–	–	+
Транспортная инфраструктура	+	+	–	+	+	–	–	–	–
Железнодорожные станции и узлы	–	+	–	+	+	–	–	–	+
Управление эксплуатационной работой	–	–	–	+	–	–	–	+	–

ТАБЛИЦА 2. Обзор проблемных полей существующих дисциплин экономической науки

Вопросы/ Дисциплины	Пространственное проектирование ТСС, включая выбор числа и дислокации узлов	Расчет экономической целесообразности и инвестиционной привлекательности	Формирование региональных ТСС	Управление цепями поставок и сложными системами доставки грузов, включая взаимодействие ЛО и транспорта	Управление процессами перевозок через ТСС, включая выбор транспорта, перевозчика и ПС	Оценка экономической результативности ТСС	Проектирование ЛО	Управление ЛО, включая внутреннюю организацию работы	Управление ассортиментом услуг и взаимодействием с клиентами
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ									
Транспортная география	+	–	+	–	–	–	–	–	–
Экономика транспорта	–	+	+	–	–	+	–	–	–
Регионалистика	+	+	+	–	–	+	–	–	–
Складская логистика	+	–	–	–	–	–	+	+	–
Транспортная логистика	+	–	–	+	+	–	–	–	–
Маркетинг на транспорте	–	–	–	–	–	+	–	–	+
Управление цепями поставок	+	–	–	+	+	–	–	+	–
Транспортный бизнес	–	–	–	–	–	+	–	+	+

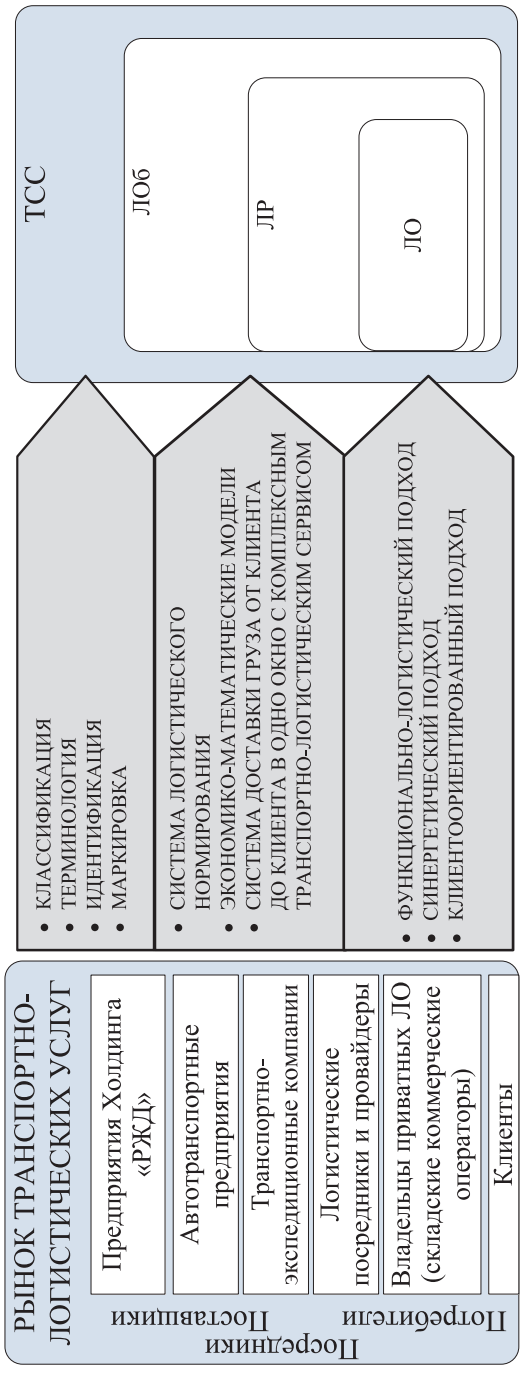


Рис. 2. Субъекты, средства и объекты терминалистики как новой теории

транспортной цепи, принципов логистики и клиентоориентированности, созданием системы логистического нормирования и комплексного формирования ТСС (интеграция доставки и терминально-складской инфраструктуры). Исходя из вышеизложенного, можно сформулировать целевую направленность и научно-практический арсенал терминалистики (рис. 2).

Терминалистика формирует междисциплинарный теоретико-методологический базис, позволяющий при концентрации на всестороннем исследовании ТСС (от ЛО до ЛР и ЛОб) интегрировать чисто технические и технологические решения железнодорожного транспорта с логистическими и экономическими теориями.

Положение терминалистики как новой междисциплинарной теории показано на рис. 3 и определяется как всепроникающее, сквозное, интегрирующее целую группу взаимосвязанных научных теорий и направлений, области исследований которых пересекаются при изучении ТСС. В таких условиях задача терминалистики – фокусирование средств и методов смежных дисциплин на изучении ТСС в целом и ЛО в частности, а также формирование новой методологической базы, позволяющей сконцентрировать инструментарий и концептуальный аппарат на ТСС всех видов, что обеспечит комплексность и многоаспектность подхода. Иными словами, положение терминалистики является междисциплинарным, находящимся не над и не под существующими теориями, но соединяющим их единой постановкой вопросов, ограниченных областью эффективного проектирования, исследования и эксплуатации ТСС, а также полным спектром логистических решений для всех субъектов транспортно-логистического рынка – клиентов, владельцев и инвесторов ЛО, перевозчиков и логистических посредников.

С одной стороны, такое положение терминалистики является вспомогательным, поскольку позволяет связать и сосредоточить взаимодействующие области научных знаний в свете комплексного исследования ТСС, с другой же – самостоятельным, так как формули-

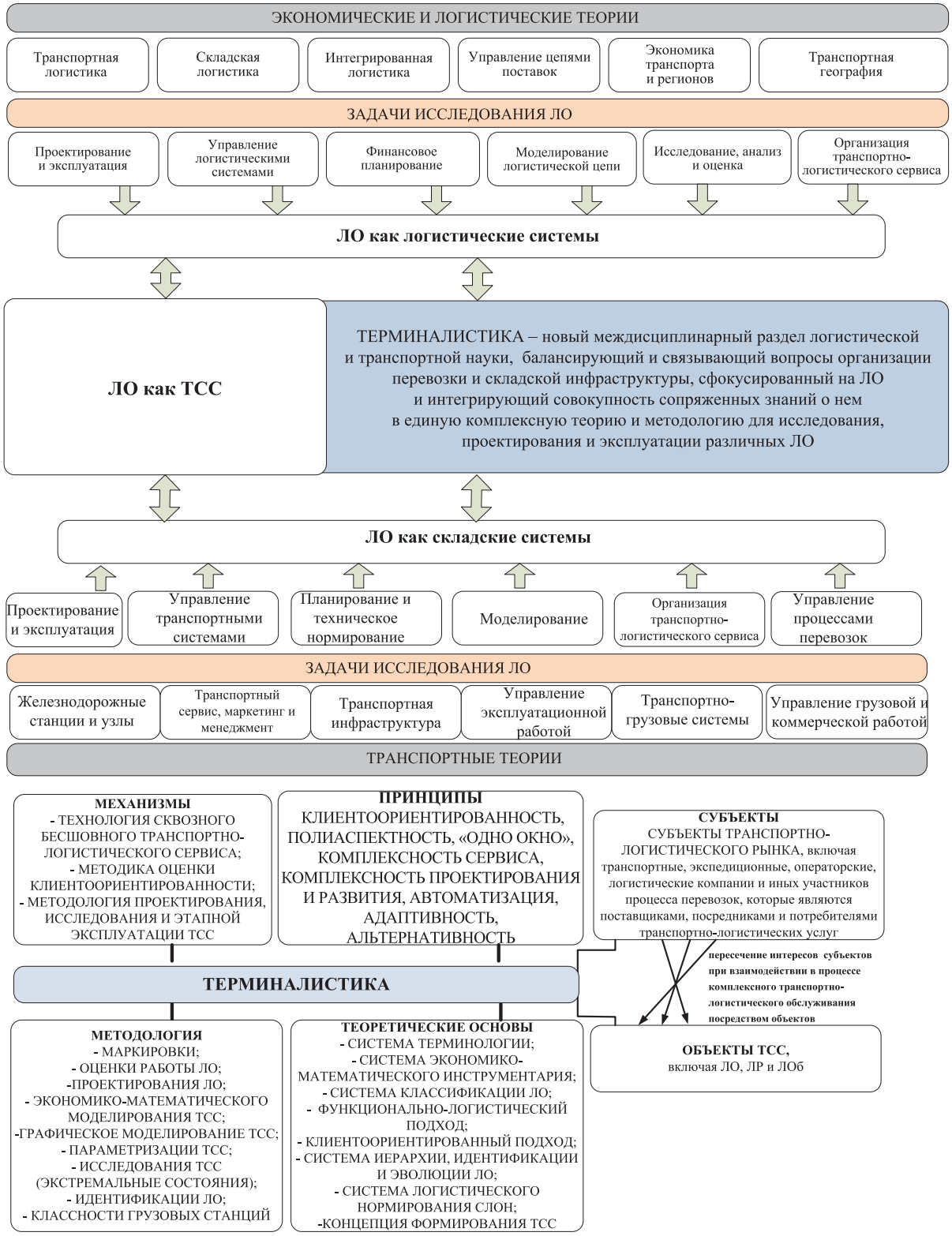


Рис. 3. Междисциплинарное положение терминалистики

рует совершенно новый комплекс вопросов и задач, создается новая концептуальная база, предлагаются новые средства и методы получения различных логистических решений.

В отличие от логистики, рассматривающей в качестве предмета все виды потоков, независимо от их происхождения в цепи доставки, терминалистика ограничивает предмет изучения только потоками, порождаемыми и преобразуемыми в логистической инфраструктуре (табл. 3).

Формирование и развитие теоретических основ терминалистики

Вопросами проектирования и последующего развития различных ЛО занимались многие отечественные и зарубежные ученые. Парадокс в том, что железнодорожные ЛО, играя роль полноценных многофункциональных узлов терминально-складской инфраструктуры, рассматриваются ими достаточно односторонне – только как транспортные, но не как транспортно-складские системы, что тоже не позволяет говорить об исчерпывающем характере их исследований.

Огромный вклад в создание отечественной теории транспортных узлов внесли такие ученые как В. Н. Образцов [4], К. Ю. Скалов [5], С. В. Земблинов [6], И. Е. Савченко, Л. В. Канторович, В. Я. Негрей, Н. В. Правдин [7], В. И. Апатцев [8], Ю. И. Ефименко [8], А. В. Комаров, В. В. Повороженко [9], Е. В. Архангельский, В. М. Акулиничев, В. Г. Шубко, С. П. Вакуленко [7] и многие другие.

Важнейшее значение для железнодорожной отрасли имеют труды С. М. Резера [10], Б. А. Левина, П. А. Козлова [11], А. Т. Осьминина, В. А. Кудрявцева [12], В. А. Персианова, П. В. Куренкова [13], А. Ф. Бородина, С. Ю. Елисеева [14], посвященные совершенствованию транспортных и логистических технологий доставки грузов. Значительную роль в формировании теории транспортно-грузовых систем, проектирования компоновки и технического оснащения транспортных узлов играют работы А. А. Смехова [9], В. Н. Дегтяренко, И. С. Беседина, Н. П. Журавлева, Г. П. Гриневич, О. Б. Маликова [15, 16], О. Н. Числова [17] и др.

Существенный вклад в систему проектирования транспортно-логистических систем внесли Н. Д. Иловайский, Ю. О. Пазойский, В. П. Клепиков, С. В. Милославская, К. В. Плужников, В. В. Багинова, А. Н. Рахмангулов, А. М. Гаджинский [18], Т. А. Прокофьева [19], В. И. Сергеев [19], Б. А. Аникин, А. С. Балалаев [20], В. В. Дыбская [21], В. С. Лукинский, В. М. Самуйлов, М. Б. Петров, В. М. Николашин, Р. Г. Леонтьев, О. Н. Ларин и др.

За рубежом вопросами формирования транспортно-логистических систем занимались Г. Поттгоф (G. Potthof), Л. Форд (L. R. Ford), Д. Фалкерсон (D. R. Fulkerson), Д. Бауэрсокс (D. J. Bowersox), Д. Клосс (D. A. Kloss), Д. Ламберт (D. M. Lambert), Д. Сток (J. R. Stock),

ТАБЛИЦА 3. Области исследования логистики и терминалистики

ЛОГИСТИКА	ТЕРМИНАЛИСТИКА
Объект: материальные, финансовые, информационные, сервисные потоки (все виды потоков, без детализации субъекта их природы) Предмет: оптимизация потоков (одинаковый) Область исследований: широкий спектр вопросов управления потоковыми процессами	Объект: потоки, связанные с деятельностью ЛО, порождаемые и преобразуемые ими (детализация природы потока – только область деятельности ЛО) Предмет: оптимизация потоков (одинаковый) Область исследований: ограничена требованиями рационального проектирования и эффективной эксплуатации ЛО
Терминалистика – это по-новому очерченное поле транспортно-логистических исследований	

М. Линдерс (M. Linders), М. Кристофер (M. Christopher), И. Фехнер (I. Fechner), А. Раштон (A. Rushton), Г. Ричардс (G. Richards), С. Хиггинс (C. D. Higgins), М. Фергюсон (M. R. Ferguson), Ж.-П. Родриге (J.-P. Rodrigue), Т. Ноттебум (T. Notteboom), А. Мюссо (A. Musso), Д. Миддендорф (D. Middendorf), Ф. Медда (F. Medda) и др.

Высоко оценивая труды перечисленных и многих других ученых в области проектирования ЛО (учитывая научные результаты [4–21] и др.), следует отметить, что вопрос остается недостаточно изученным в части построения комплексной, интегрированной системы анализа, оценки параметров работы объектов терминально-складской инфраструктуры.

Рассмотрим развитие транспортной науки в контексте терминалистики. Укрупненно периодизацию формирования научных основ терминалистики можно представить в 4 этапа: 1) проектирование транспортных узлов (В. В. Багинова, С. В. Земблинов, В. Н. Образцов, И. Е. Савченко, К. Ю. Скалов, О. Н. Числов и т. д.) [4–6, 17]; 2) проектирование и эксплуатация транспортных систем (В. М. Акулиничев, В. И. Апатцев, Л. Б. Канторович, П. А. Козлов, В. А. Кудрявцев, Н. В. Правдин и т. д.) [7, 8, 11, 12]; 3) проектирование транспортно-складских систем (А. А. Смехов, О. Б. Маликов, Н. П. Журавлев, А. М. Гаджинский, В. В. Дыбская и т. д.) [9, 15, 16, 18, 21]; 4) проектирование логистических систем и сетей (А. С. Балалаев, С. Ю. Елисеев, Т. А. Прокофьева, В. М. Николашин, П. В. Куренков и т. д.) [13, 14, 19, 20]. Представим на основе анализа литературных источников периодизацию развития транспортной науки в контексте терминалистики в виде схемы (рис. 4). При этом этапы 1 и 2 посвящены проектированию отдельных элементов транспортных систем, 3 – проектированию систем доставки грузов и их переработки, 4 – проектированию глобальных систем и сетей.

Таким образом, методологическая основа терминалистики, с одной стороны, опирается на труды выдающихся отечественных ученых: В. Н. Образцова [4], С. В. Земблинова [6], К. Ю. Скалова [5], Н. В. Правдина [7] и многих других, работающих в области формирования теории транспортных узлов. С другой стороны, терминалистика использует богатый научный арсенал трудов выдающихся ученых в сфере логистики и экономики: П. В. Куренкова [13], В. И. Сергеева, Т. А. Прокофьевой [19], С. М. Резера [10] и других, изучающих эффективные транспортно-логистические системы.

Развитие транспортной науки в контексте терминалистики

Рис. 4. Периодизация формирования состава терминалистики

Терминалистика как самостоятельное методологическое направление даст экономически и технологически обоснованные решения по проектированию объектов терминально-складской инфраструктуры, начиная от формирования концепции строительства узловых ЛО и системы доставки и заканчивая комплексными программами транспортно-логистического развития инфраструктуры отдельных регионов и всей страны [22].

Выводы

В работе предпринята попытка охарактеризовать междисциплинарное положение терминалистики как новой методологии. Основными положениями научной новизны являются: 1) выделение из логистики самостоятельного научного направления – терминалистики; 2) комплексное изучение транспортно-складских систем в целом и логистических объектов в частности; 3) исследование потоковых процессов, которые образуются, проходят и погашаются в транспортно-складских системах; 4) разработка интегрированных моделей и методов проектирования, исследования, оптимизации и комплексной оценки формируемых и эксплуатируемых логистических объектов в системах доставки грузов [23].

Библиографический список

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта РФ на период до 2030 года. – М. : Красный пролетарий, 2008. – 183 с.

2. Покровская О. Д. Терминалистика : общие вопросы : монография / О. Д. Покровская. – Казань : Изд-во «Бук», 2016. – 142 с.

3. Покровская О. Д. Логистическое руководство: математические основы терминалистики, маркировка, классификация и идентификация логистических объектов железнодорожного транспорта : монография / О. Д. Покровская. – Казань : Изд-во «Бук», 2017. – 281 с.

4. Образцов В. Н. Избр. труды / В. Н. Образцов. – М. : Транспорт, 1949. –540 с.

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

6. Земблинов С. В. Основы построения транспортных узлов / С. В. Земблинов, В. А. Бураков, А. М. Обермейстер и др. ; под общ. ред. С. В. Земблинова. – М. : Транспорт, 1959. – 47 с.

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

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

9. Смехов А. А. Управление грузовой и коммерческой работой на железнодорожном транспорте / А. А. Смехов, В. В. Повороженко, А. Т. Дерибас и др. ; под ред. А. А. Смехова. – М. : Транспорт, 1990. – 351 с.

10. Резер С. М. Международные транспортные коридоры : проблемы формирования и развития / С. М. Резер, Т. А. Прокофьева, С. С. Гончаренко.– М. : ВИНИТИ РАН, 2010. – 312 с.

11. Козлов П. А. Теоретические основы, организационные формы, методы оптимизации гибкой технологии транспортного обслуживания заводов черной металлургии : дис. ... докт. техн. наук, специальность : 05.22.12 / П. А. Козлов. – Липецк : ЛГТУ, 1986. – 390 с.

12. Кудрявцев В. А. Основы эксплуатационной работы железных дорог / В. А. Кудрявцев, В. И. Ковалев, А. П. Кузнецов и др. ; под ред. В. А. Кудрявцева.– М. : Профобриздат, 2002. – 352 с.

13. Куренков П. В. Внешнеторговые перевозки в смешанном сообщении.Экономика. Логистика. Управление / П. В. Куренков, А. Ф. Котляренко. – Самара : СамГАПС, 2002. – 636 с.

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

15. Маликов О. Б. Перевозки и складирование товаров в цепях поставок : монография / О. Б. Маликов. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. – 536 с.

16. Маликов О. Б. Склады и грузовые терминалы / О. Б. Маликов. – СПб. : Бизнес-Пресса, 2005. – 648 с.

17. Числов О. Н. Теоретические основы рационального размещения элементов железнодорожных промышленных транспортно-технологических систем : дис. ... докт. техн. наук, специальность : 05.22.01 / О. Н. Числов. – М. : МИИТ, 2009. – 369 с.

18. Гаджинский А. М. Современный склад. Организация, технологии, управление и логистика / А. М. Гаджинский. – М. : ТК Велби ; Проспект, 2007. – 147 с.

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

20. Балалаев А. С. Транспортно-грузовые системы железных дорог : учеб. пособие / А. С. Балалаев, И. А. Чернышова, А. Ю. Костенко. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2006. – 108 с.

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

22. Покровская О. Д. Терминалистика как новое научное направление / О. Д. Покровская // Путь науки. – 2014. – № 3 (3). – С. 21–24.

23. Pokrovskaya O. D. Chi terminelistica reale come una nuova direzione scientific / O. D. Pokrovskaya / Ita lian Science Review. – 2016. – N 1 (34). – P. 112–116.

References

1. *Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta RF na period do 2030 goda* [*Development strategy of the Russian Federation railway transport for the period until 2030*]. Moscow, Krasniy proletariy Publ., 2008, 183 p. (In Russian)

2. Pokrovskaya O. D. *Terminalistika: obshchiye voprosy:* monographiya [*Terminsalistics: common issues:* study]. Kazan, Publ. office “Book”, 2016, 142 p. (In Russian)

3. Pokrovskaya O. D. *Logisticheskoye rukovodstvo: matematicheskiye osnovy terminalistiky*, *markirovka*, *klassifikatsiya i identifikatsiya logisticheskykh obyektov zheleznodorozhnogo transporta:* monographiya [*Logistic guide: mathematical foundations of terminalistics*, *marking*, *classification and identification of logistical objects of railway transport:* study]. Kazan, Publ. office “Book”, 2017, 281 p. (In Russian)

4. Obraztsov V. N. *Izbranniye trudy* [*Selectas*]. Moscow, Transport Publ., 1949, 540 p. (In Russian)

5. *Stykoviye punkty transportnykh uzlov* [*Transport division points*]. Ed. by K. Y. Skalov & G. S. Molyarchuk. Moscow, Transport Publ., 1977, 184 p. (In Russian)

6. Zemblinov S. V., Burakov V. A., Obermeister A. M. et al. *Osnovy postroyeniya transportnykh uzlov* [*Foundations of construction of transport nodal points*]. Moscow, Transport Publ., 1959, 47 p. (In Russian)

7. Pravdyn N. V., Vakulenko S. P., Golovnich A. K. & et al. *Proyektyrovaniye infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta (stantsii*, *zheleznodorozhniye i transportniye uzly)* [*Railroad transport infrastructure designing (stations*, *railway junctions and transport nodal points)*]. Moscow, Marshrut Publ., 2014, 1086 p. (In Russian)

8. Yefimenko Y. I., Apattsev V. I., Pravdyn N. V. et al. *Zheleznodorozhniye stantsii i uzly* [*Railway stations and transport nodes*]. Moscow, Uchebno-metodycheskiy tsentr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational centre of railway transport] Publ., 2014, 450 p. (In Russian)

9. Smekhov A. A., Povorozhenko V. V., Deribas A. T. et al. *Upravleniye gruzovoy I kommercheskoy rabotoy na zheleznodorozhnom transporte* [*Management of freight operation and commercial work on railway transport*]. Under the editorship of A. A. Smekhov. Moscow, Transport Publ., 1990, 351 p. (In Russian)

10. Rezer S. M., Prokofiyeva T. A. & Goncharenko S. S. *Mezhdunarodniye transportniye koridory: problem formirovaniya i razvitiya* [*International transport corridors: the issues of generation and development*]. Moscow, VINITI RAN Publ., 2010, 312 p. (In Russian)

11. Kozlov P. A. *Teoreticheskiye osnovy*, *organizatsionniye formy*, *metody optimizatsii gibkoy tekhnologii transportnogo obsluzhivaniya zavodov chernoy metallurgii* [*Theoretical foundations*, *organizational forms*, *optimization methods of transport servicing flexible technology of iron and steel works*]: diss. D. Eng.,

specialty 05.22.12. Lipetsk, Lipetsk State Technical University Publ., 1986, 390 p. (In Russian)

12. Kudryavtsev V.A., Kovalev V.I., Kuznetsov A.P. et al. *Osnovy ekspluatatsionnoy raboty zheleznykh dorog* [*The foundations of railroad field operation*]. Under the editorship of V.A. Kudryavtsev. Moscow, Profobrizdat Publ., 2002, 352 p. (In Russian)

13. Kurenkov P.V. & Kotlyarenko A.F. *Vneshnetorgoviye perevozky v smeshannom soobshchenii. Ekonomika. Logistika. Upravleniye* [*Mixed traffic foreign trade transportation. Economics. Logistics. Management*]. Samara, Samara State Transport Universiyty Publ., 2002, 636 p. (In Russian)

14. Yeliseyev S.Y. *Systema logisticheskogo upravleniya vzaimodeystviyem s morskymy i rechnymy portamy i drugymy vydamy transporta:* monographiya [*The system of logistical control of sea ports and river ports and other types of transport interaction:* study]. Moscow, VINITI RAN Publ., 2005, 96 p. (In Russian)

15. Malykov O.B. *Perevozky i skladyrovaniye tovarov v tsepyakh postavok:* monographiya [*Traffic and storing in supply chains:* study]. Moscow, Uchebno-metodycheskiy tsentr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte [Learning and teaching educational centre of railway transport] Publ., 2014, 536 p. (In Russian)

16. Malykov O.B. *Sklady i gruzoviye terminaly* [*Goods depot and freight terminals*]. Saint Petersburg, Business-Pressa, 2005, 648 p. (In Russian)

17. Chislov O.N. *Teoreticheskiye osnovy ratsionalnogo razmeshcheniya elementov zheleznodorozhnykh promyshlennykh transportno-tekhnologicheskykh system* [*Theoretical foundations of rational distribution of elements of railway industrial transportmanufacturing systems*]: diss.D. Eng., specialty 05.22.01. Moscow, MIIT Publ., 2009, 369 p. (In Russian)

18. Gadzhynskiy A.M. *Sovremenniy sklad. Organizatsiya, tekhnologii, upravleniye i logistika* [*Organization, technologies, management and logistics*]. Moscow, TC Velby, Prospect Publ., 2007, 147 p. (In Russian)

19. Prokofyeva T.A. & Sergeyev V.I. *Logisticheskiye tsentry v transportnoy systeme Rossii:* uchebnoye posobiye [*Logistic centers in the transport system of Russia*: tutorial]. Moscow, "Ekonomicheskaya gazeta" Publ., 2012, 522 p. (In Russian)

20. Balalayev A.S., Chernyshova I.A. & Kostenko A.Y. *Transportno-gruzoviye systemy zheleznykh dorog* [*Railway transport and cargo systems:* tutorial]. Khabarovsk, DVGUPS Publ., 2006, 108 p. (In Russian)

21. Dybskaya V.V. *Upravleniye skladyrovaniyem v tsepyakh postavok* [*Storing management in supply chains*]. Moscow, Alpha-Press Publ., 2009, 720 p. (In Russian)

22. Pokrovskaya O.D. Termynalistika kak novoye nauchnoye napravleniye [Terminalistics as a new school]. *Put nauky* [*Science path*], 2014, no. 3 (3), pp. 21–24. (In Russian)

23. Pokrovskaya O.D. Chi terminelistica reale come una nuova direzione scientific. *Italian Science Review*, 2016, no. 1 (34), pp. 112–116.

ТИТОВА Тамила Семеновна – д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой, проректор по научной работе; *ПОКРОВСКАЯ Оксана Дмитриевна – канд. техн. наук, доцент, insight1986@inbox.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 536.12621.1.016.4

В. Н. Фоменко, М. А. Шварц

АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ ШАХТЫ МЕТРОПОЛИТЕНА МЕТОДОМ РАЗДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ ФУРЬЕ

Дата поступления: 09.02.2018
Решение о публикации: 13.03.2018

Аннотация

Цель: Расчет распределения температуры в грунте вблизи вентиляционной шахты метрополитена (далее ствол). В основу расчетов положена модель, в которой ствол рассматривается как система вложенных друг в друга полых коаксиальных цилиндров длиной 60 м. Два внутренних цилиндра заполнены бетоном, третий цилиндр – чугунная труба. Внешний цилиндр моделирует ближнее окружение ствола и наполнен влажным грунтом (грязью). Систему цилиндров окружает цилиндрический блок грунта высотой 500 м и радиусом 600 м. **Методы:** Применены стандартные методы математического анализа, метод разделения переменных Фурье, методы теории цилиндрических функций. **Результаты:** Обобщен метод разделения переменных Фурье на случай областей с цилиндрическими полостями. Разработан и программно реализован в среде Mathcad алгоритм построения ортонормированного базиса путем введения суперпозиций функций Бесселя 1-го и 2-го рода. Предложен и применен в расчетах метод сопряжения температур и тепловых потоков на границах раздела однородных участков среды, включая предельный случай термической изоляции. Рассчитана температура в грязевом слое грунта как функция глубины в диапазоне 0–60 м при трех значениях удельной теплопроводности бетона: 0,17 Вт/(м·К) (стандартное значение); 0,1 Вт/(м·К) (значение для специального вида бетона); 0,055 Вт/(м·К) (теоретическое значение, исключающее замерзание грязевого слоя грунта). **Практическая значимость:** Полученные результаты позволяют оценить риск повреждения ствола вследствие замерзания влажного грязевого слоя, окружающего его. Вывод из проведенных расчетов: при длительных морозах с температурой воздуха ниже –20 °С замерзание произойдет при использовании как обычного бетона, так и бетона специального вида. Замерзание начнется на глубине 20–40 м. Оно было бы исключено при удельной теплопроводности бетона ниже 0,055 Вт/(м·К).

Ключевые слова: Уравнение Лапласа, метод Фурье, уравнение Бесселя, полый цилиндр, метрополитен, ствол шахты, замерзание грунта.

***Viktor N. Fomenko,** D. Sci. in Physics and Mathematics, professor, vfomenko1943@gmail.com; **Mikhail A. Shvarts,** Cand. Eng. Sci., associate professor, shvarts4545@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) ANALYSIS OF THERMAL REGIME OF THE UNDERGROUND RAILWAY VENTILATION SHAFT BY FOURIER SEPARATION OF VARIABLES METHOD

Summary

Objective: Determination of temperature distribution inside the ground near the underground ventilation shaft (air feeder further on). Calculations were performed within a model where the air feeder was treated as a system of several co-axial hollow cylinders of a length of 60 m embedded into each other. Two inner cylinders were filled with concrete; the third one was a cast-iron pipe. The outer cylinder simulated the vicinity of the air feeder and it was filled with wet ground (sludge). The set of cylinders was surrounded by a ground block with a height of 500 m and a radius of 600 m. **Methods:** Standard methods of mathematical analysis, Fourier separation-of-variables method, and theory of cylindrical functions. **Results:** Fourier separation-of-variables method was generalized for the case of domains

that have cylinder-shaped cavities. The algorithm of constructing an orthonormal basis was developed and implemented in the Mathcad programming environment by introducing superposition of Bessel functions of the 1st and 2nd kind. A method which allows conjugating heat fluxes and temperatures across the surfaces separating homogeneous fragments of medium, including the limiting case of thermic lag, was suggested and used in calculations. Temperature in the sludge ground layer was computed as a function of depth in the range of 0–60 m at three values of concrete heat-conduction coefficient: 0,17 W/(m·K) (standard value); 0,1 W/(m·K) (value for special concrete); 0,055 W/(m·K) (a hypothetic value preventing freezing of the sludge ground layer). **Practical importance:** The obtained results enable one to assess risks of damage of the air feeder caused by freezing of the surrounding wet sludge layer. One can conclude from the calculations performed that freezing will occur at long duration frost with air temperature under –20 °C independently of the sort of concrete used: conventional or special one. The freezing process will start at a depth of 20–40 m. This process would be avoided at values of heat-conduction coefficient of concrete under 0,055 W/(m·K).

Keywords: Laplace equation, Fourier method, Bessel equation, hollow cylinder, underground railway, air feeder, ground freezing.

1. Введение

Цель настоящей работы – изучение распределения температуры грунта вблизи ствола шахтной вентиляции метрополитена. Актуальность этой задачи обусловлена тем, что в холодные периоды времени атмосферный воздух может замораживать грунт, примыкающий к стволу, и вызывать повреждения последнего. Этот вопрос исследуем в стационарном тепловом режиме, пренебрегая охлаждением грунта на поверхности, что оправдано, если ограничиться коротким по времени процессом охлаждения.

Стационарные тепловые процессы для кусочно-однородной среды описываются уравнением Лапласа

$$\nabla^2\Theta(x, y, z) = 0$$

с дополнительными условиями сопряжения температур и тепловых потоков или теплоизоляции на границах однородных участков среды.

В п. 2 методом Фурье построено решение уравнения Лапласа, обладающее осевой симметрией, для сплошного и полого цилиндров. В п. 3 предложенный метод применен к модели ствола, который рассматривается как система, состоящая из сплошного и нескольких полых однородных цилиндров. В п. 4 приведены результаты расчетов и сделаны выводы относительно опасности замерзания грунта, примыкающего к стволу.

2. Построение решения уравнения Лапласа

Уравнение Лапласа в случае решений с осевой симметрией [1, 2] имеет вид

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2}\Theta(r, z) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\Theta(r, z) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\Theta(r, z) = 0,$$

где r – радиальная переменная; z – осевая переменная.

Это уравнение решается для областей, изображенных на рис. 1, *а*, *б*, на которых показаны и граничные условия.

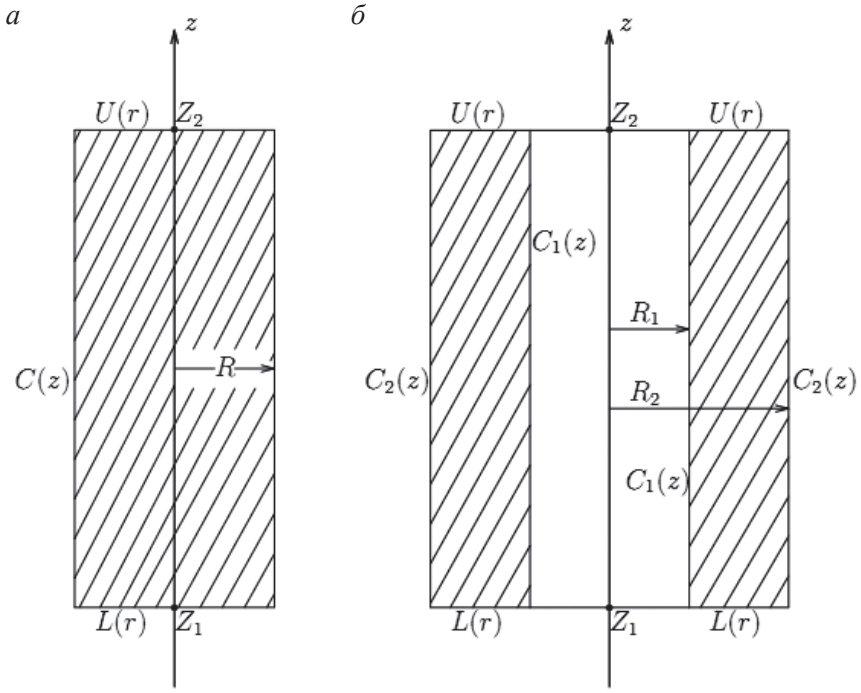


Рис. 1. Сплошной (*а*) и полый (*б*) цилиндр: размеры и граничные условия (R, R_1, R_2 – радиусы цилиндров, Z_1, Z_2 – нижняя и верхняя границы цилиндров U, C_1, C_2, L – температурные значения на границах)

На основе метода разделения переменных Фурье [3–5] будем строить решения уравнения Лапласа. Детали вывода опущены.

В дальнейшем индекс «1» присвоен выравнивающим решениям, а индекс «0» – приведенным. Выравнивающие решения служат для того, чтобы обеспечить нулевые значения приведенных решений на пересечениях цилиндрических и плоских границ цилиндра. Для сплошного цилиндра это два условия, а для полого – четыре.

Решение $\Theta_s(r, z)$ для сплошного цилиндра представлено равенствами

$$\Theta_{s1}(r,z) = \frac{U(R) - L(R)}{H}(z - Z_1) + L(R), \tag{1}$$

$$\Theta_{s0}(r,z) = \sum_{k=1}^{\infty} D_{Ck} \frac{I_0\left(\frac{k\pi r}{H}\right)}{I_0\left(\frac{k\pi R}{H}\right)} \sin\left(\frac{k\pi(z - Z_1)}{H}\right) +$$

$$+ \sum_{k=1}^{\infty} D_{Lk} J_0\left(\kappa_k \frac{r}{R}\right) \frac{\sin h\left(\frac{\kappa_k (Z_2 - z)}{R}\right)}{\sin h\left(\frac{\kappa_k H}{R}\right)} + \sum_{k=1}^{\infty} D_{Uk} J_0\left(\kappa_k \frac{r}{R}\right) \frac{\sin h\left(\frac{\kappa_k (z - Z_1)}{R}\right)}{\sin h\left(\frac{\kappa_k H}{R}\right)}. \tag{2}$$

В (1), (2) J_0 −функция Бесселя, I_0 −модифицированная функция Бесселя первого рода [6–8], H – высота цилиндра, R – радиус цилиндра.

Решение для сплошного цилиндра запишем в виде

$$\Theta_s(r,z) = \Theta_{s0}(r,z) + \Theta_{s1}(r,z).$$

Величины D определяются граничными условиями

$$C(z) - \Theta_{s1}(R,z) = \sum_{k=1}^{\infty} D_{Ck} \sin\left(\frac{k\pi(z-Z_1)}{H}\right),$$

$$L(r) - \Theta_{s1}(r,Z_1) = \sum_{k=1}^{\infty} D_{Lk} J_0\left(\kappa_k \frac{r}{R}\right), \quad U(r) - \Theta_{s1}(r,Z_2) = \sum_{k=1}^{\infty} D_{Uk} J_0\left(\kappa_k \frac{r}{R}\right).$$

Решения $\Theta_h(r, z)$ для полого цилиндра представлены равенствами

$$\Theta_{h1}(r,z) = C + C_{\log} \ln(r) + C_z z + C_{\log z} z \cdot \ln(r). \tag{3}$$

В формуле (3) параметры C, $C_{\log}$, C_z, $C_{\log z}$ легко вычисляются по граничным условиям.

Приведенное решение для полого цилиндра имеет вид

$$\Theta_{h0}(r,z) = \sum_{k=1}^{\infty} D_{C1k} \frac{\dfrac{I_0\left(\frac{k\pi r}{H}\right)}{I_0\left(\frac{k\pi R_2}{H}\right)} - \dfrac{K_0\left(\frac{k\pi r}{H}\right)}{K_0\left(\frac{k\pi R_2}{H}\right)}}{\dfrac{I_0\left(\frac{k\pi R_1}{H}\right)}{I_0\left(\frac{k\pi R_2}{H}\right)} - \dfrac{K_0\left(\frac{k\pi R_1}{H}\right)}{K_0\left(\frac{k\pi R_2}{H}\right)}} \sin\left(\frac{k\pi(z-Z_1)}{H}\right) +$$

$$+ \sum_{k=1}^{\infty} D_{C2k} \frac{\dfrac{I_0\left(\frac{k\pi r}{H}\right)}{I_0\left(\frac{k\pi R_1}{H}\right)} - \dfrac{K_0\left(\frac{k\pi r}{H}\right)}{K_0\left(\frac{k\pi R_1}{H}\right)}}{\dfrac{I_0\left(\frac{k\pi R_2}{H}\right)}{I_0\left(\frac{k\pi R_1}{H}\right)} - \dfrac{K_0\left(\frac{k\pi R_2}{H}\right)}{K_0\left(\frac{k\pi R_1}{H}\right)}} \sin\left(\frac{k\pi(z-Z_1)}{H}\right) + \tag{4}$$

$$+ \sum_{k=1}^{\infty} D_{Lk} Z_0\left(\beta_k, \tilde{\kappa}_k \frac{r}{R_1}\right) \frac{\sin h\left(\frac{\tilde{\kappa}_k (Z_2 - z)}{R_1}\right)}{\sin h\left(\frac{\tilde{\kappa}_k H}{R_1}\right)} +$$

$$+ \sum_{k=1}^{\infty} D_{Uk} Z_0\left(\beta_k, \tilde{\kappa}_k \frac{r}{R_1}\right) \frac{\sin h\left(\frac{\tilde{\kappa}_k (z - Z_1)}{R_1}\right)}{\sin h\left(\frac{\tilde{\kappa}_k H}{R_1}\right)},$$

в котором K_0 – модифицированная функция Бесселя второго рода [6–8].

Решение для полого цилиндра дается формулой

$$\Theta_h(r,z) = \Theta_{h0}(r,z) + \Theta_{h1}(r,z),$$

где введена новая функция Бесселя [9] как суперпозиция функций Бесселя первого и второго рода:

$$Z_0(\beta, x) = (1-\beta)J_0(x) + \beta Y_0(x). \quad (5)$$

Пусть $\hat{\kappa}_n(\beta)$ – n-й в порядке возрастания корень функции (5). Величина β в формуле (5) выбирается как решение уравнения

$$\frac{\hat{\kappa}_{n+k}(\beta_k)}{\hat{\kappa}_n(\beta_k)} = \frac{R_2}{R_1}$$

при некотором значении n. В уравнении (4) $\tilde{\kappa}_k = \hat{\kappa}_n(\beta_k)$. Функция $Z_0(\beta_k, \tilde{\kappa}_k r/R_1)$ имеет $k-1$ корень внутри промежутка (R_1, R_2).

Величины D определяются граничными условиями

$$C_1(z) - \Theta_{h1}(R_1, z) = \sum_{k=1}^{\infty} D_{C1k} \sin\left(\frac{k\pi(z-Z_1)}{H}\right),$$

$$C_2(z) - \Theta_{h1}(R_2, z) = \sum_{k=1}^{\infty} D_{C2k} \sin\left(\frac{k\pi(z-Z_1)}{H}\right),$$

$$L(r) - \Theta_{h1}(r, Z_1) = \sum_{k=1}^{\infty} D_{Lk} Z_0\left(\beta_k, \tilde{\kappa}_k \frac{r}{R_1}\right),$$

$$U(r) - \Theta_{h1}(r, Z_2) = \sum_{k=1}^{\infty} D_{Uk} Z_0\left(\beta_k, \tilde{\kappa}_k \frac{r}{R_1}\right).$$

3. Анализ теплового режима ствола шахтной вентиляции

Рассчитываем распределение температуры в грунте вокруг ствола шахтной вентиляции. На рис. 2 показано осевое сечение модели ствола. Ствол представляет собой полый, наполненный атмосферным воздухом цилиндр, отделенный от окружающего его грунта цилиндрической многослойной стенкой. Описание каждого слоя дается в таблице.

Характеристика слоев стенки воздуховода

Слой	Размеры, м	Материал	Коэффициент теплопроводности, Вт/(К·м)
1	2,25–2,55	Бетон	0,1/0,17
2	2,55–2,71	Бетон-уплотнитель	0,1/0,17
3	2,71–2,74	Чугун	30
4	2,74–2,84	Увлажненный грунт	1,94

В расчетах стенка рассматривается как однородный цилиндр [10] с эффективным коэффициентом теплопроводности $\lambda_{эфф}$:

$$\lambda_{эфф} = \frac{\ln(r_5 / r_1)}{\sum_{i=1}^{4} \frac{1}{\lambda_i} \ln(r_{i+1} / r_i)},$$

где r_i и r_{i+1} – радиусы i-го слоя, а λ_i – коэффициент его теплопроводности.

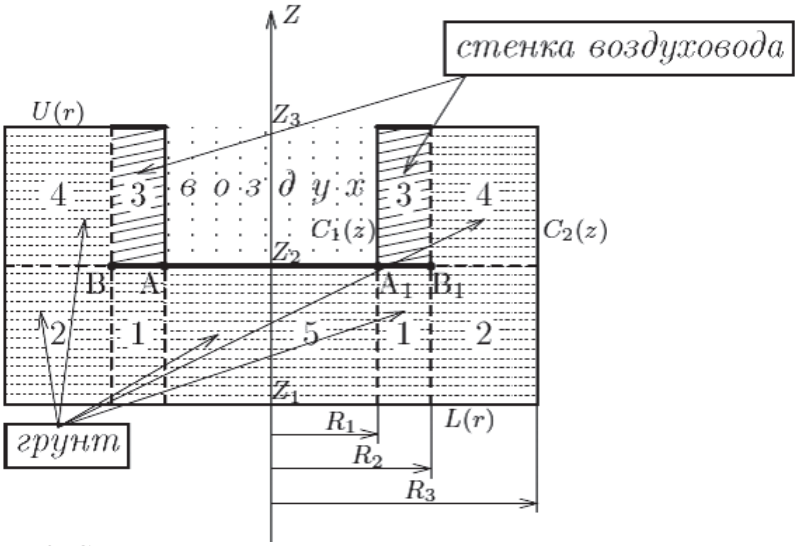


Рис. 2. Схема системы «ствол–грунт», использованная в расчетах:
1–5 – блоки системы

Длина ствола составляет $Z_3 - Z_2 = 60$ м, а внешний диаметр равен $2R_2 = 5{,}7$ м. Размеры участка грунта вокруг ствола подобраны так, чтобы на периферии системы можно было пренебречь его влиянием на температуру грунта и получить возможность наложить граничное условие. В расчетах принято, что $Z_3 - Z_1 = 500$ м и $2R_3 = 1200$ м. Расчеты показали, что влияние ствола на температуру на границе системы пренебрежимо мало.

Система «ствол–грунт» разбита на 5 блоков: 4 полых цилиндра и один сплошной (на рис. 2 они пронумерованы). Опишем границы блоков схемы:

1) на границе заданы температуры функциями $L(r)$, $U(r)$, $C_1(z)$, $C_2(z)$ (сплошные тонкие линии);

2) термоизоляция на торцах воздуховода (сплошные жирные линии);

3) сопряжение температур и плотностей тепловых потоков по обе стороны от границы (пунктирные линии).

Реальный ствол имеет на входе и выходе сложную геометрию. Чтобы применить метод Фурье, требующий осевой симметрии, вводим упрощение в форме термоизоляции на торцах модельного ствола.

Величины $D_{Lk}^{(1)}$, $D_{Lk}^{(2)}$, $D_{C2k}^{(2)}$, $D_{Uk}^{(4)}$, $D_{C2k}^{(4)}$, $D_{Lk}^{(5)}$ – коэффициенты разложения для выравненных граничных условий (верхний индекс указывает на номер блока). Например, для блока 1

$$L(r) - \Theta_{h1}^{(1)}(r, Z_1) = \sum_{k=1}^{\infty} D_{Lk}^{(1)} Z_0\left(\beta_k, \tilde{\kappa}_k \frac{r}{R_1}\right), \quad R_1 \le r \le R_2.$$

Выравнивающее решение для этого блока имеет вид

$$\Theta_{h1}^{(1)}(r, z) = C^{(1)} + C_{\log}^{(1)} \ln(r) + C_z^{(1)} z + C_{\log z}^{(1)} z \cdot \ln(r),$$

где

$$C_{\log z}^{(1)} = \frac{T_B - T_A - (L(R_2) - L(R_1))}{(Z_2 - Z_1)\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)},$$

$$C_z^{(1)} = \frac{T_A - L(R_1)}{Z_2 - Z_1} - C_{\log z}^{(1)} \ln(R_1),$$

$$C_{\log}^{(1)} = \frac{L(R_2) - L(R_1)}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} - C_{\log z}^{(1)} Z_1,$$

$$C^{(1)} = L(R_1) - C_z^{(1)} Z_1 - C_{\log}^{(1)} \ln(R_1) - C_{\log z}^{(1)} Z_1 \ln(R_1).$$

Здесь T_A и T_B – температуры на окружностях $(r = R_1, z = Z_2)$ и $(r = R_2, z = Z_2)$, расположенных на пересечении полых четырех цилиндрических блоков (окружности пересекают плоскость рис. 2 в точках A, A_1 и B, B_1).

Величины

$$\begin{gathered} D_{Uk}^{(1)} = D_k^{(11)},\ D_{Lk}^{(3)} = D_k^{(33)},\ D_{Uk}^{(3)} = D_k^{(3'3')},\ D_{Uk}^{(2)} = D_{Lk}^{(4)} = D_k^{(24)}, \\ D_{C2k}^{(1)} = D_{C1k}^{(2)} = D_k^{(12)},\ D_{C2k}^{(3)} = D_{C1k}^{(4)} = D_k^{(34)}, \\ D_{C1k}^{(1)} = D_{Ck}^{(5)} = D_k^{(15)},\ D_{Uk}^{(5)} = D_k^{(55)} \end{gathered} \tag{6}$$

задают разложения на границах блоков, где наложены условия сопряжения температур и потоков или термоизоляции. Переменные (6) являются свободными, так же как и температуры T_A и T_B.

Пусть n_{r1} – число членов в разложении на торцах блоков 1 и 3, n_{r2} – аналогичная величина для блоков 2 и 4, n_{r3} относится к блоку 5, n_{z1} и n_{z2} – для цилиндрических границ групп блоков (1, 2, 5) и (3, 4) соответственно. Объединим переменные $D_k^{(11)}$, $D_k^{(12)}$, $D_k^{(15)}$, $D_k^{(24)}$, $D_k^{(33)}$, $D_k^{(3'3')}$, $D_k^{(34)}$, $D_k^{(55)}$, T_A и T_B в вектор $\tilde{D}_k$ длины $N = 3n_{r1} + n_{r2} + n_{r3} + 2n_{z1} + n_{z2} + 2$. Компоненты $\tilde{D}_k$ выбираются из условия равенства плотности потоков на границах сопряжения блоков или равенства потоков нулю на границах термоизоляции. Пусть P_m (r_m, z_m, φ_m) – совокупность M точек на поверхностях между блоками и $\Gamma 1_m$, $\Gamma 2_m$ – номера примыкающих к точке P_m двух блоков ($\Gamma 1_m < \Gamma 2_m$, случай сопряжения) или одного блока ($\Gamma 1_m = \Gamma 2_m$, случай термоизоляции). Тогда $\tilde{D}_k$ получаются как решение задачи

$$\min_{\tilde{D}_k} \sum_{m=1}^{M} \left\{ \left[\lambda_{\Gamma 1_m} \frac{\partial}{\partial n} \Theta_h^{(\Gamma 1_m)} - \lambda_{\Gamma 2_m} \frac{\partial}{\partial n} \Theta_h^{(\Gamma 2_m)} \right]^2 [1 - \delta(\Gamma 1_m - \Gamma 2_m)] + \right.$$

$$\left. + \left[\frac{\partial}{\partial z} \Theta_h^{(\Gamma 1_m)} \right]^2 \delta(\Gamma 1_m - \Gamma 2_m) \right\} \cdot w_m,$$

где

$$\frac{\partial}{\partial n} = \frac{\partial}{\partial r} \text{ для границ } 1-2 \text{ и } 3-4,$$

$$\frac{\partial}{\partial n} = \frac{\partial}{\partial z} \text{ для границ } 1-3 \text{ и } 2-4.$$

Величины w_m – весовые коэффициенты, подбором которых следует добиться равномерного выполнения условий сопряжения и термоизоляции на границах блоков.

Очевидно, температура и ее производные в фиксированной точке – линейные функции $\tilde{D}_k$. Поэтому

$$\left(\lambda_{\Gamma 1_m} \frac{\partial}{\partial n} \Theta_h^{(\Gamma 1_m)} - \lambda_{\Gamma 2_m} \frac{\partial}{\partial n} \Theta_h^{(\Gamma 2_m)}\right) \cdot [1 - \delta(\Gamma 1_m - \Gamma 2_m)] +$$
$$+ \frac{\partial}{\partial z} \Theta_h^{(\Gamma 1_m)} \delta(\Gamma 1_m - \Gamma 2_m) = c_{m0} + \sum_{k=1}^{N} c_{mk} \tilde{D}_k.$$

Обозначим через A фрагмент матрицы $C^T C$, из которой удалены левый столбец и верхняя строка, а через B – левый столбец без верхнего элемента:

$$a_{ik} = \sum_{m=1}^{M} c_{mi} c_{mk}, \; b_i = \sum_{m=1}^{M} c_{mi} c_{m0}, \; i,k = 1,\ldots,N.$$

Решение задачи (6) дается формулой

$$\tilde{D} = -A^{-1} B.$$

4. Распределение температуры вблизи ствола

Рассмотрим результаты расчетов распределения температуры вблизи ствола при граничных условиях (в °С):

- $U(r) = 6$, $R_2 \le r \le R_3$ – температура на поверхности;
- $C_2(z) = 6 + 0{,}1\,(Z_3 - z)$ – нагрев грунта с увеличением глубины погружения;
- $L(r) = 56$, $0 \le r \le R_3$ – температура на глубине 500 м;
- $C_1(z) = -20$ – температура воздуха внутри воздуховода.

Цель расчетов – определить температуру грунта, непосредственно примыкающего к стенке ствола, где опасность замерзания грунта наиболее велика. В расчетах пренебрегаем остыванием грунта на поверхности земли. Это оправдано тем, что скорость промерзания грунта на поверхности земли и вблизи стенки ствола на любой глубине – величины одного порядка. Ограничимся рассмотрением распределения температуры в слое вокруг ствола толщиной порядка 10 см. Поэтому промерзание грунта на такую глубину на поверхности не повлияет заметно на температуру, если погружение составляет несколько метров и более.

В расчетах число точек, в которых проводилось сопряжение или термоизоляция, равно 1200 (по 150 точек на каждом из 8 участков). Число членов в разложении Фурье и Бесселя–Фурье принималось равным 20.

На рис. 3 приведена зависимость температуры на внешней границе увлажненного грунта (см. таблицу) от глубины. Расчеты сделаны для трех величин коэффициента теплопроводности бетона и бетона-уплотнителя. Значение 0,17 Вт/(К·м) уже достигнуто для специального вида бетона. Видимо, реально довести в будущем теплопроводность до 0,1 Вт/(К·м). Из рис. 3 видно, что в обоих случаях замерзание грунта возможно при достаточной продолжительности

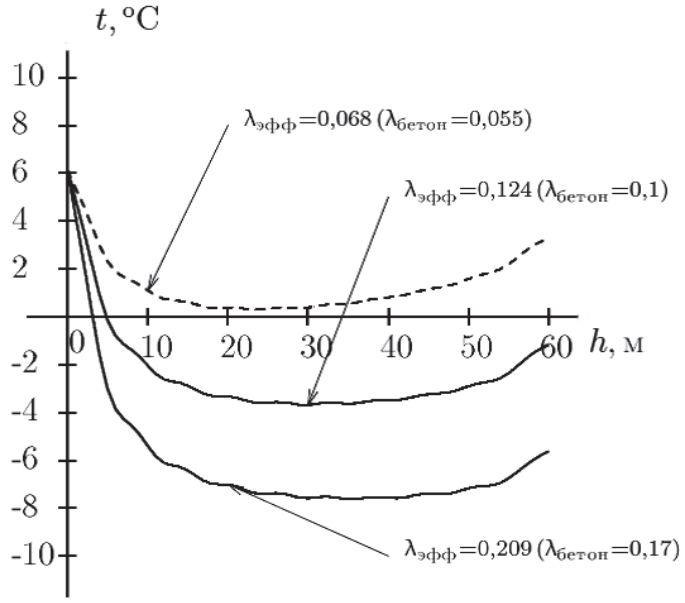


Рис. 3. Температура на внешней границе увлажненного грунта как функция глубины

морозов. Пунктирная кривая получена для предельно большого коэффициента теплопроводности бетона, когда замерзание грунта не произойдет.

5. Заключение

В работе в предположении осевой симметрии в стационарном тепловом режиме рассчитана температура грунта вблизи ствола в условиях холодного атмосферного воздуха. Для ствола введена упрощенная модель, являющаяся системой, составленной из одного сплошного и четырех полых цилиндров. Расчеты проведены для трех значений коэффициента теплопроводности бетона, входящего в состав стенки ствола. Показано, что при длительных морозах замерзание грунта произойдет для видов бетона, применяемого в настоящее время.

Так как расчеты проводились в стационарном режиме, они не дают ответа на вопрос, как скоро наступит фактическое промерзание грунта. Для этого требуется применить временно́е уравнение теплопроводности.

Отметим, что изложенный метод может быть обобщен и на случай, когда не предполагается осевая симметрия для решения и граничных условий.

Библиографический список

1. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики : учеб. пособие для ун-тов. – 4-е изд., испр. / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М. : Наука, 1972. – 735 с.

2. Шварц Л. Математические методы для физических наук / Л. Шварц с участием Д. Юэ ; пер. с фр. Ф. В. Широкого. – М. : Мир, 1965. – 412 с.

3. Коддингтон Э. А. Теория обыкновенных дифференциальных уравнений / Э. А. Коддингтон, Н. Левинсон ; пер. с англ. Б. М. Левитана. – М. : Изд-во иностр. лит., 1958. – 474 с.

4. Смирнов В. И. Курс высшей математики : для мех.-мат. и физ.-мат. факультетов гос. ун-тов и втузов : в 3 т. / В. И. Смирнов. – М. : Наука, 1967. – Т. 2. – 655 с.

5. Эльсгольц Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление : учебник для физ. и физ.-мат. факультетов ун-тов / Л. Э. Эльсгольц. – М. : Едиториал УРСС, 2002. – 319 с.

6. Балакин А. Б. Три лекции по теории функций Бесселя : учеб.-метод. пособие к курсу «Методы математической физики. Специальные функции» / А. Б. Балакин. – Казань : Казанск. гос. ун-т, 2009. – 39 с.

7. Ватсон Дж. Н. Теория бесселевых функций / Дж. Н. Ватсон ; пер. со 2-го англ. изд. В. С. Бермана ; под ред. Г. Шилова. – М. : Изд-во иностр. лит., 1949. – Ч. 1. – 799 с.

8. Янке Е. Специальные функции : формулы, графики, таблицы / Е. Янке, Ф. Эмде, М. Леш ; под ред. Л. И. Седлова. – 3-е изд. – М. : Наука, 1977. – 342 с.

9. Титчмарш Э. И. Разложения по собственным функциям, связанные с дифференциальными уравнениями второго порядка : в 2 т. / Э. И. Титчмарш ; пер. с англ. В. Б. Лидского ; под ред. Б. М. Левитана. – М. : Изд-во иностр. лит., 1960. – Т. 1. – 278 с. ; 1961. – Т. 2. – 555 с.

10. Фоменко В. Н. К анализу теплового режима длинного воздуховода / В. Н. Фоменко, М. А. Шварц, В. В. Кондратенко // Труды Нац. науч.-метод. конференции «Математика в ВУЗе и школе». – СПб., 2017. – С. 126–131.

References

1. Tikhonov A. N. & Smarskiy A. A. *Uravneniya matematycheskoy phyziky* [*Equations of mathematical physics*]. Moscow, Nauka Publ., 1972, 735 p. (In Russian)

2. Shvarts L. *Matematycheskiye metody dlya phyzicheskykh nauk* [*Mathematical methods for physics sciences*]. L. Shvarts with participation of D. Yue; tr. from French by F. V. Shirokiy. Moscow, Mir Publ., 1965, 412 p. (In Russian)

3. Coddington E. A. & Levinson N. *Teoriya obyknovennykh differentsialnykh uravneniy* [*Theory of ordinary differential equations*]. Tr. from Eng. by B. M. Levitan. Moscow, Izd-vo inostr. lit. (Foreign Lit.) Publ., 1958, 474 p. (In Russian)

4. Smirnov V. I. *Kurs vysshey matematyky: dlya mekh.-matem. i phiz.-matem. fakultetov gos. un-tov i vtuzov* [*A course in higher mathematics: for faculties and colleges of mechanics and mathematics and physics and mathematics*]: in 3 vol. Moscow, Nauka Publ., 1967, vol. 2, 655 p. (In Russian)

5. Elsgoltz L. E. *Differentsialniye uravneniya i variatsionnoye ischisleniye:* uchebnik dlya phyz. i phyz.-mat. fakultetov un-tov [*Differential equations and variational calculus:* a tutorial for the faculties of physics and mathematics and physics]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2002, 19 p. (In Russian)

6. Balakyn A. B. *Tri lektsii po teorii funktsiy Besselya* [*Three lectures on the theory of Bessel functions*]. Kazan, Kazan Federal University Publ., 2009, 39 p. (In Russian)

7. Watson G. N. *Teoriya Besselevykh funktsiy* [*A treatise on the theory of Bessel functions*]. Tr. form the 2nd Eng. ed. by V. S. Berman; ed. by G. Shylov. Moscow, Izd-vo inostr. lit. (Foreign Lit.) Publ., 1949, vol. 4.1, 799 p. (In Russian)

8. Yanke Y., Emde F. & Lesh M. *Spetsialniye funktsii: Formuly*, *grafiky*, *tablitsy* [*Special functions: Formulas*, *graphs*, *tables*]. Ed. by L. I. Sedlov, 3d ed. Moscow, Nauka Publ., 1977, 342 p. (In Russian)

9. Titchmarsh E. C. *Razlozheniya po sobstvennym funktsiyam*, *svyazanniye s differentsialnymy uravneniyamy vtorogo poryadka* [*Eigenfunction expansions associated with second-order differential equations*]. Tr. from Eng. by V. B. Lidskoy; ed. by B. M. Levitan. Moscow, Izd-vo inostr. lit. (Foreign Lit.) Publ., 1960, vol. 1, 278 p.; 1961, vol. 2, 555 p. (In Russian)

10. Fomenko V. N., Shvarts M. A. & Kondratenko V. V. K analyzu teplovogo rezhyma dlinnogo vozdukhovoda [On the analysis of thermal condition of a long air line]. *Proceedings of the National research and methodological conference "Mathematics in college and school".* Saint Petersburg, 2017, pp. 126–131. (In Russian)

ФОМЕНКО Виктор Николаевич – д-р физ.-мат. наук, профессор; vfomenko1943@gmail.com; *ШВАРЦ Михаил Александрович – канд. техн. наук, доцент, shvarts4545@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.4.048.7

Э. В. Белошицкий, С. С. Мямлин

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ

Дата поступления: 16.11.2017
Решение о публикации: 16.03.2018

Аннотация

Цель: Разработать технические решения по повышению эффективности функционирования отопительных установок пассажирских вагонов путем обеспечения равномерной теплоотдачи обогревательных труб в направлении циркуляции теплоносителя. **Методы:** Применялись методы анализа и синтеза, а также метод численного эксперимента для проведения математического моделирования эксперимента долевого участия конвективного и лучистого теплообмена на поверхности отопительных труб. **Результаты:** Проведен анализ технической возможности повышения эффективности функционирования отопительных систем пассажирских вагонов и предложены технические решения по повышению теплоотдачи нагревательных элементов водяной системы отопления пассажирских вагонов локомотивной тяги. Научно-техническая задача по обеспечению равномерной теплоотдачи обогревательных труб предлагается к решению наряду с другими мероприятиями путем нанесения специальных покрытий с разной степенью черноты на отдельные участки трубопровода. Разработана оригинальная методика нанесения специальных покрытий на трубные участки системы водяного отопления красками с различной степенью черноты, предложен порядок подбора свойств специальных покрытий для использования при модернизации систем водяного отопления пассажирских вагонов. **Практическая значимость:** Рассмотренная методика подбора требуемой степени черноты специального покрытия для нанесения на участки обогревательных труб системы отопления по сравнению с использованием труб системы отопления с переменным шагом ребер не только существенно упрощает конструкцию отопительной установки пассажирского вагона, но и повышает ее эффективность. Результаты исследований можно применять не только при постройке новых вагонов, но и при модернизации отопительных установок в пассажирских вагонах эксплуатационного парка в условиях вагоноремонтных депо.

Ключевые слова: Пассажирский вагон, система отопления, лучистый теплообмен, равномерная теплоотдача, степень черноты.

Eduard V. Beloshitskiy, design-engineer, e.beloshickiy@gmail.com; ***Sergey S. Myamlyn**, research engineer, sergeymyamlin91@gmail.com ("Planning and design production engineering office" Dnepropetrovsk National University of Railway Transport in the name of academician V. Lazaryan) THE IMPROVEMENT OF HEATING SYSTEMS OPERATION IN PASSENGER CARS

Summary

Objective: To develop engineering solutions on efficiency improvement of heating installations in passenger cars by providing even heat transfer of heating pipes in the direction of coolant circulation. **Methods:** The methods of analysis and synthesis were applied, as well as the method of numerical study for mathematical modeling conduct of the experiment of convective and radiant heat transfer equity participation at the surface of heating pipes. **Results:** Technical feasibility analysis of efficiency improvement of heating systems operation in passenger cars was performed and engineering solutions on heat transfer improvement of water heating system elements in passenger cars of locomotive traction were suggested. A research and engineering task on providing uniform heat transfer of heating pipes was suggested to be solved alongside with other measures by means of applying specialized coating with differing emissivity factor on separate pipe sections. A know-how application of specialized coating on pipe sections of the water heating system by means of paints with differing emissivity factor was developed. The procedure of selecting properties of specialized coatings for the purpose of water heating systems modernization in passenger cars was suggested. **Practical importance:** The suggested procedure of selecting the required emissivity factor of specialized coating for application on pipe sections of the heating system compared to the use of heating pipes with varied fin pitch not only considerably simplifies the heating installation design in a passenger car, but also improves its efficiency. The research results may be used not only in construction of the new cars but also the improvement of heating installations in passenger cars of the maintenance pool in conditions of car-repair depots.

Keywords: Passenger car, heating system, radiant heat exchange, uniform heat transfer, emissivity factor.

Введение

Как известно, на большинстве выпускаемых и эксплуатируемых пассажирских вагонов в качестве основной используется водяная система отопления. Наиболее распространенным ее типом является система с верхней разводкой труб, рассчитанная на естественную циркуляцию воды. Нагретая вода из расширителя поступает в контур отопительных труб, калорифера, бойлера, из которых возвращается в котел, передав определенное количество тепла в вагон. Главное достоинство такой отопительной системы – ее высокая надежность и простота эксплуатации.

Следует отметить, что системы с естественным циркулированием теплоносителя относятся к саморегулирующимся. Чем больше нагрета в котле вода и чем быстрее она охлаждается в разводящих трубах и стояках, тем выше скорость циркуляции. Этот процесс будет замедляться по мере прогревания вагона. Однако, если температура в помещении начнет снижаться, к примеру, из-за резкого похолодания, интенсивность циркуляции повысится и внутренняя температура будет расти.

В отопительный период в вагоне должна поддерживаться постоянная температура 22 ± 2 °С, перепад температур может составлять не более 3 °С [1]. Вместе с тем в вагонах с отопительной установкой, имеющей верхнюю разводку труб, наблюдается значительная неравномерность теплового режима в вагоне. По результатам натурного исследования температурного режима в поездах в зимний период [2] обнаруживался перепад температур до 8 °С, что свидетельствует о недостаточной скорости циркуляции воды в системе отопления, которая влечет неравномерную теплоотдачу отопительных труб.

Рассмотрим существующие способы обеспечения равномерного прогрева помещений вагона. На рис. 1 показаны схемы отопительных систем с равномерной теплоотдачей и соответствующие им графики температур

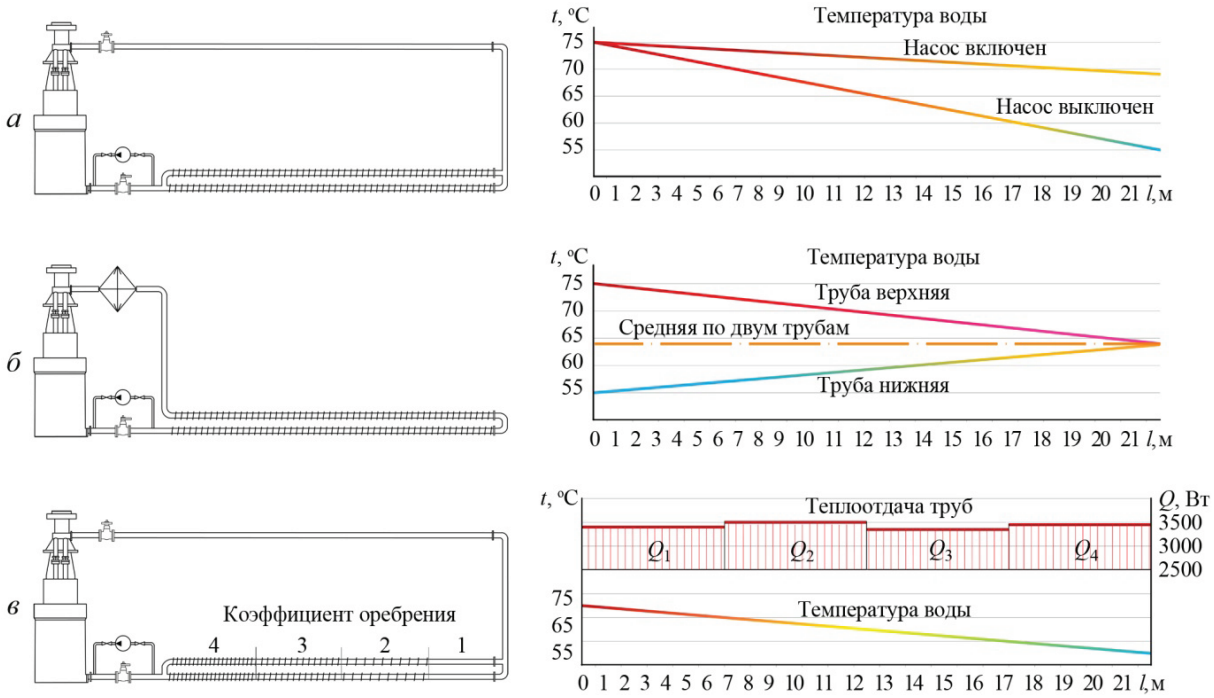


Рис. 1. Схемы отопительных систем вагонов с равномерной теплоотдачей нагревательных труб: *а* – принудительная циркуляция воды; *б* – естественная циркуляция воды с нижней разводкой и калорифером; *в* – нагревательные трубы с переменным шагом ребер

воды и теплоотдачи обогревательных труб систем.

Применение принудительной циркуляции воды в трубах (рис. 1, *а*) устраняет этот недостаток, но стоит отметить, что требует постоянного использования электрического циркуляционного насоса, снижая надежность такого метода.

В отопительных установках с нижней разводкой труб (рис. 1, *б*) данный недостаток отсутствует, из графика видно, что средняя температура воды по двум трубам на всех участках будет одинаковая, следовательно, и теплоотдача равномерна по всей длине отопительных труб. Данные системы не получили широкого распространения, так как вагоны с ними прогреваются медленно из-за низкой скорости естественной циркуляции воды.

Вопрос обеспечения равномерности прогрева помещений по длине вагона (рис. 1, *в*) рассмотрен в теплотехническом расчете оребрения отопительных труб [3], в котором показано, что для получения одинаковой температуры воздуха вдоль вагона должны обеспечиваться одинаковые теплопоступления от каждого элемента трубы, а это возможно при изменяющемся коэффициенте оребрения трубы вдоль вагона. Изготовить трубу с непрерывно изменяющимся коэффициентом оребрения технологически сложно, потому предлагается использовать модули с одинаковым коэффициентом оребрения, количество которых на участке определяется необходимой теплоотдачей. Методы повышения эффективности функционирования систем отопления пассажирских вагонов описаны в работах [4, 5], где рассматривались вопросы повышения теплоотдачи нагревательных труб. Вопросы модернизации отопительных установок в пассажирских вагонах эксплуатационного парка при проведении капитальных ремонтов исследованы в работах [6–9].

Исходя из вышеизложенного, следует, что наряду со сравнительно большими объемами исследований по совершенствованию конструкции отопительных установок пассажирских вагонов задачи обеспечения равномерного прогрева пассажирских помещений

практически не рассматриваются и требуют более эффективного решения. Поэтому работы, связанные с повышением эффективности функционирования отопительных установок для пассажирских вагонов, представляют из себя актуальную научно-прикладную задачу.

Целью статьи является разработка технических решений по обеспечению равномерной теплоотдачи нагревательных труб в направлении циркуляции теплоносителя для повышения эффективности функционирования отопительных установок пассажирских вагонов. Для ее достижения необходимо решить следующие задачи:

1) провести анализ конвективно-лучистого теплообмена на поверхности отопительных труб;

2) разработать методику нанесения покрытия на трубные участки красками с разной степенью черноты;

3) оценить эффективность теплоотдачи отопительных труб, покрашенных разными красками.

Рассмотрим более подробно решение поставленных задач.

Конвективно-лучистый теплообмен на поверхности отопительных труб

На поверхности отопительных труб происходят конвективный теплообмен с внутренним воздухом и лучистый теплообмен с поверхностями стен и внутреннего оборудования вагона. Интенсивность такого теплообмена оценивается коэффициентом теплоотдачи α [10]

$$\alpha = \alpha_к + \alpha_л,$$

где $\alpha_л$, $\alpha_к$ – коэффициенты теплоотдачи излучением и конвекцией, Вт/(м^2·К).

Для определения коэффициента теплоотдачи конвекцией используются зависимости критерия Нуссельта *Nu* от критериев Грисгофа *Gr* и Прандтля *Pr*:

$$Nu = c\,(Gr\,Pr)^n.$$

Определив *Nu*, находят конвективный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_к = \frac{Nu\lambda}{d}, \qquad (1)$$

здесь λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К); *d* – определяющий размер, в данном случае диаметр трубы, м.

Коэффициенты *c* и *n*, а также произведения *Gr* и *Pr* в формуле (1) определяются по данным таблицы, приведенной в [10].

Для разных тел коэффициент излучения различен [11]. Его значение обусловливается природой тела, состоянием его поверхности и температурой. Этот закон устанавливает зависимость плотности E_0 потока интегрального излучения тела от его температуры. Для абсолютно черного тела

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4,$$

где σ_0 – постоянная Стефана–Больцмана, $\sigma_0 = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2·К^4).

В технических расчетах этот закон применяется в более удобной форме:

$$\mathrm{E}_0 = c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

в которой c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный

$$c_0 = \sigma_0 \cdot 10^{-8} = 5{,}67 \text{ Вт/(м}^2\text{·К}^4\text{)}.$$

Следовательно, энергия излучения абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры.

Такой закон может быть использован и к реальным телам. Тогда он принимает вид

$$\mathrm{E} = c \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

здесь *c* – коэффициент излучения различных тел. Он меняется от 0 до 5,67.

Сопоставляя плотность потока собственного излучения тела с плотностью потока излуче-

ния абсолютно черного тела при той же температуре, получают другую характеристику тела, которая называется степенью черноты ε:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{c}{c_0}.$$

Значение ε меняется от 0 до 1, что удобно.

В данном случае для реального тела имеем

$$E = \varepsilon E_0 = \varepsilon c_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4.$$

Поток лучистого теплообмена между двумя серыми поверхностями в замкнутом пространстве, когда одна из поверхностей площадью F_2 обтекает другую площадью F_1, определяется по формуле

$$Q = \varepsilon_n c_0 F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right],$$

где выражение

$$\varepsilon_n = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{F_2}{F_1}\left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right)} \qquad (2)$$

называется приведенной степенью черноты тела.

Относительно нагревательных труб отопления F_2 – поверхность окружающего объекта (т. е. поверхность стен и внутреннего оборудования вагона), F_1 – поверхность нагревательных труб.

Если рассматривать формулу (2) применительно к теплообмену на единице поверхности тепловоспринимающей стенки, удельный тепловой поток излучения составит

$$q_л = \varepsilon_n c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right].$$

Принимая во внимание, что удельный тепловой поток конвекцией определяется по формуле

$$q_к = \alpha_к (t_{тр} - t_п),$$

где $t_{тр}$ – температура труб, $t_п$ – температура воздуха, а суммарный поток тепла q конвекцией и излучением равен

$$q = q_к + q_л, \qquad (3)$$

учитывая выражение (3), для расчета коэффициента теплопередачи излучением получают

$$\alpha_л = 0,04\varepsilon_п c_0 \left(\frac{T_т}{100}\right)^3. \qquad (4)$$

В формуле (4) $T_т = 0,5 \cdot (T_1 + T_2)$ – средняя температура тел, обменивающихся лучистым теплом.

Применительно к теплообмену между отопительными трубами и воздухом в вагоне индекс 1 относится к поверхности труб, индекс 2 – к окружающему трубу внутреннему оборудованию вагона.

Методика расчета равномерной теплоотдачи по длине труб

Вначале рассмотрим порядок подбора краски для окрашивания отдельных участков трубы для равномерной теплоотдачи.

Цвет краски определяется методом подбора степени черноты для каждого участка трубы. Для этого необходимо выполнить расчет общего теплопоступления от нагревательных труб отопления, окрашенных краской с единой степенью черноты, т. е. серой краской, по формуле

$$Q_Т = \alpha F (t_в - t_п),$$

где F – расчетная поверхность отопительных труб, м^2; $t_в$ и $t_п$ – температуры соответственно воды в трубах и воздуха в вагоне, °С.

Для дальнейшего расчета следует рассчитать среднюю мощность q одного участка длиной 1 м:

$$q = \frac{Q}{l}.$$

Полученное значение q будет использоваться как шаблонное в дальнейших расчетах. Вычислим требуемый коэффициент теплоотдачи $\alpha_{н}^{i}$ для первого участка трубы по формуле

$$\alpha_{н}^{i} = \frac{q}{F_i(t^{i}_{вх} + t^{i}_{вых}) \cdot 0,5 - t_{в}},$$

в которой $t^{i}_{вх}$, $t^{i}_{вых}$ – температура воды на входе и выходе i-го участка, °С; температура теплоносителя в различных точках вдоль трубы: $t_{вых} = t_{п} + (t_{вх} - t_{п})e^{-\alpha l}$; F_i – площадь i-го участка, м^2.

Значение коэффициента теплоотдачи конвекцией $\alpha_{к}^{i}$ данного участка трубы находим по формуле (1). Нужную степень черноты ε_{n}^{i} для данного участка можно получить следующим образом:

$$\varepsilon_{n}^{i} = \frac{\alpha_{н}^{i} - \alpha_{к}^{i}}{0,04c_0\left(\frac{T_{т}}{100}\right)^3}.$$

Краску подбирают со степенью черноты, близкой к значению ε_{n}^{i} [11, табл. 19] для данного участка нагревательной трубы. Производим расчет для всех последующих участков, для ветви нагревательных труб купейной стороны пассажирского вагона открытого типа модели 61–826 постройки Тверского вагоностроительного завода.

Исходные данные для расчета:

– трубы оребреные стальные сдвоенные, длина одной трубы l = 22 м;

– диаметр наружный D = 0,076 м;

– диаметр внутренний d = 0,07 м;

– коэффициент оребрения K_p = 2,9;

– площадь трубы F = 30,4 м^2;

– температура воды на входе в трубу $t_{вх}$ = = 75 °С;

– скорость естественной циркуляции w = = 0,025 м/с;

– коэффициент теплоотдачи трубы $\alpha_{н}$ = = 10,8 Вт/(м·К);

– температура воздуха в вагоне $t_{п}$ = 22 °С.

Результаты расчетов нагревательной трубы с равномерной теплоотдачей иллюстрирует рис. 2.

Первый участок длиной 4 м покрашен алюминиевой краской, второй длиной 7 м – бронзовой краской, третий длиной 7 м – белым лаком, четвертый длиной 4 м – черным матовым лаком.

Как следует из рис. 2, *б*, для трубы с одинаковой степенью черноты мощность участков снижается в направлении циркуляции пропорционально понижению температуры воды (рис. 2, *а*). Для трубы, окрашенной красками с разной степенью черноты (рис. 2, *в*), при понижении температуры воды (см. рис. 2, *а*) на всех участках нагревательной трубы обеспечивается равномерная теплоотдача, мощность колеблется в пределах 40 Вт от шаблонного значения q. Следовательно, изменения степени черноты путем покраски отдельных участков нагревательных труб разными красками позволяет равномерно распределить теплоотдачу нагревательных труб отопления по длине вагона.

Для наглядности график разделен на равные участки длиной 5,5 м и указана средняя мощность каждого участка. Как видно из рис. 2, для трубы с одинаковой степенью черноты мощность значения первого участка больше на 1190 Вт, чем последнего, для труб с разной степенью черноты мощность средних значений между участками не превышает 190 Вт.

Заключение

В работе рассмотрена научно-прикладная задача по усовершенствованию систем отопления пассажирских вагонов с целью повышения их эффективности. Установлено, что в настоящее время для обеспечения равномерной теплоотдачи применяются три способа: принудительная циркуляция воды в трубах; использование систем с нижней разводкой отопительных труб и включение отопительного контура калорифера; применение нагревательных труб с переменным шагом ребер.

Предложено техническое решение по обеспечению равномерной теплоотдачи отопительных труб путем нанесения специальных покрытий на отдельные участки красками с

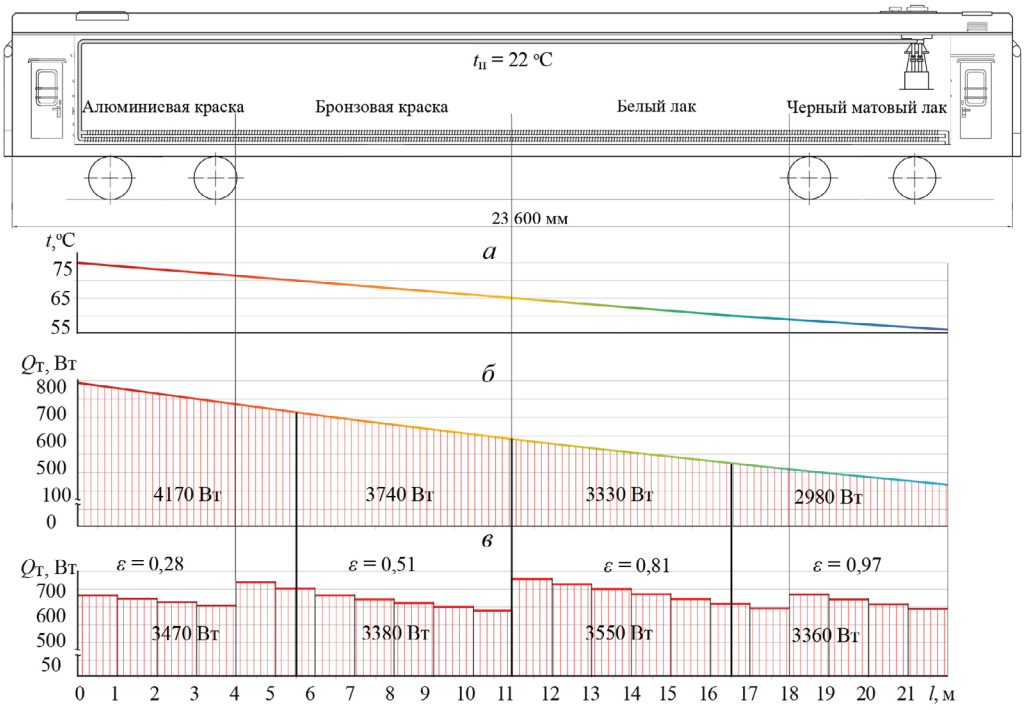


Рис. 2. Результаты расчетов нагревательных труб:
а – изменения температуры теплоносителя; *б*, *в* – теплоотдача нагревательных труб, покрашенных краской: *б* – с одинаковой степенью черноты ε = 0,9, *в* – с разной степенью черноты

разной степенью черноты. Разработана методика нанесения специальных покрытий трубных участков красками с различной степенью черноты, определен порядок подбора таких покрытий.

По сравнению с использованием труб системы отопления с переменным шагом ребер применение отопительных труб с нанесенным специальным покрытием, имеющим разную степень черноты, не только существенно упрощает конструкцию отопительной установки пассажирского вагона, но и повышает ее эффективность. Результаты исследований можно использовать не только при постройке новых вагонов, но и при модернизации отопительных установок в пассажирских вагонах эксплуатационного парка в условиях вагоноремонтных депо.

Библиографический список

1. Санитарные правила устройства, оборудования и эксплуатации пассажирских вагонов дальнего следования. ЦУВС–19. – М.: МПС СССР, 1984. – 31 с. (Введены в действие Постановлением Министерства здравоохранения Украины № 7 от 10.12.1997 г.)

2. Кудрин М. Ю. Способы повышения эффективности функционирования систем отопления и вентиляции пассажирских вагонов : дис. … канд. техн. наук, специальность: подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация: 05.22.07 / М. Ю. Кудрин. – СПб. : ПГУПС, 2006. – 114 с.

3. Теплотехнический расчет оребрения отопительных труб пассажирских вагонов 47 к/к и 47 д/к с использованием металлических съемных радиаторов конструкции завода им. Егорова. – СПб. : КВСЗ, 1995. – 12 с.

4. Жариков В. А. Климатические системы пассажирских вагонов / В. А. Жариков. – М. : Трансинфо, 2006. – 135 с.

5. Китаев Б. Н. Повышение эффективности теплообменных процессов в пассажирских вагонах / Б. Н. Китаев, В. А. Жариков. – М. : Транспорт, 1995. – 53 с.

6. Кукса Ю. Я. Перспективы модернизации пассажирских вагонов при проведении капитально-восстановительного ремонта / Ю. Я. Кукса, П. М. Мустафа, И. Ю. Хоменко // Железнодорожный транспорт Украины. – 2010. – № 2. – С. 28–30.

7. Хоменко І. Ю. Удосконалення систем енергетичного та холодильного обладнання пасажирських вагонів при капітальних ремонтах : дис. … канд. техн. наук, специальность : рухомий склад залізниць та тяга поїздів : 05.22.07 / І. Ю. Хоменко. – Дніпропетровськ : Національний університет залізного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, 2014. – 125 с.

8. Приходько В. И. Научные основы создания пассажирских вагонов для скоростных перевозок : монография / В. И. Приходько, С. В. Мямлин. – Днепропетровск : Изд-во Маковецкий, 2011. – 355 с.

9. Хоменко І. Ю. Розробка розрахункової тривимірної моделі пасажирського вагона для дослідження нестаціонарних теплових процесів / І. Ю. Хоменко // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта (23.05–24.05.2013) : тез. 73-й Междунар. науч.-практич. конференции. – Днепропетровск : ДНУЖТ, 2013. – С. 75–77.

10. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.

11. Зигель Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэл ; пер. с англ. ; под ред. Б. А. Хрусталева. – М. : Мир, 1975. – 935 с.

References

1. *Sanitarniye pravila ustroistva*, *oborudovaniya i ekspluatatsii passazhyrskykh vagonov dalnego sledovaniya. TsUVS–19* [*Sanitary regulations on the structure*, *equipment and maintenance of long-distance passenger cars. TsUVS–19 (The Russian Railways department of health)*]. Moscow, the USSR Ministry of Railways Publ., 1984, 31 p. (Brought into force by the decree of the Ministry of Public Health of Ukraine N 7 dated 10.12.1997). (In Russian)

2. Kudrin M. Y. *Sposoby povysheniya effektivnosty funktsionirovaniya system otopleniya i ventilyatsii passazhirskykh vagonov* [*The ways of efficiency improvement of heating and ventilation systems of passenger cars*]: diss. …Cand. Eng., railway rolling stock, hauling operations and electrification: 05.22.07. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2006, 114 p. (In Russian)

3. *Teplotekhnicheskiy raschet orebreniya otopitelnykh trub passazhirskykh vagonov 47 k/k i 47 d/k s ispolzovaniyem metallycheskykh syemnykh radiatorov konstruktsii zavoda im. Yegorova* [*Thermal design of finning of heating pipes for 47 k/k and 47 d/k passenger cars using metal adjustable radiators designed at the industrial plant named after Egorov*]. Saint Petersburg, Kryukovsky Railway Car Building Works, 1995, 12 p. (In Russian)

4. Zharikov V. A. *Klimatycheskiye ystemy passazhyrskykh vagonov* [*Climate systems of passanger cars*]. Moscow, Transinfo Publ., 2006, 135 p. (In Russian)

5. Kitayev B. N. & Zharykov V. A. *Povysheniye effektyvnosty teploobmennykh protsessov v passazhyrskykh vagonakh* [*Efficiency improvement of heat exchange processes in passenger cars*]. Moscow, Transport Publ., 1995, 53 p. (In Russian)

6. Kuksa Y. Y., Mustafa P. M. & Khomenko I. Y. Perspektyvy modernizatsii passazhyrskykh vagonov pry provedenii kapitalno-vosstanovitelnogo remonta [Modernization prospects of passenger cars in the process of overhaul reconditioning conduct]. *Zheleznodorozhniy transport Ukrainy* [*Railway transport of the Ukraine*], 2010, no. 2, pp. 28–30. (In Russian)

7. Khomenko I. Y. *Удосконалення систем енергетичного та холодильного обладання пасажирських вагонів при капітальних ремонтах:* diss. …Cand. Eng.: рухомий склад залізниць та тяга поїздів: 05.22.07. Дніпропетровськ, Національний університет залізного транспорту ім. акад. В. Лазаряна [Dnepropetrovsk National University of Railway Transport in the name of academician V. Lazaryan], 2014, 125 p. (In Ukrainian)

8. Prikhodko V. I. & Myamlyn S. V. *Nauchniye osnovy sozdaniyanpassazhyrskykh vagonov dlya skorostnykh perevozok:* monographiya [*Scientific foundations on the design of high-speed operation passenger cars:* study]. Dnepropetrovsk, Izd-vo Makovetskiy [Makovetskiy] Publ., 2011, 355 p. (In Russian)

9. Khomenko I. Y. Розробка розрахункової тривимірної моделі пасажирського вагона для дослідження нестаціонарних теплових процесів.

Problemy i perspektyvy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta (23.05–24.05.2013) [*Problems and prospects of development of railroad transport (23.05–24.05.2013)*]. Tez. *73-y mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [*Abstr. of the 73d International research and training conference*]. Dnepropetrovsk, DNUZhT Publ., 2013, pp. 75–77. (In Ukrainian)

10. Mikheyev M.A. & Mikheyeva I.M. *Osnovy teploperedachy* [*Heat transfer principles*]. Moscow, Energiya Publ., 1977, 344 p. (In Russian)

11. Siegel R. & Howell J. *Teploobmen izlucheniyem* [*Thermal radiation heat transfer*]. Tr. from Eng.; ed. by B.A. Khrustaleva. Moscow, Mir Publ., 1975, 935 p. (In Russian)

БЕЛОШИЦКИЙ Эдуард Васильевич – инженер-конструктор, e.beloshickiy@gmail.com; *МЯМЛИН Сергей Сергеевич – научный сотрудник, sergeymyamlin91@gmail.com («Проектно-конструкторское технологическое бюро» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна).

УДК 519.876.5:519.6:004.357

М. В. Гофман, А. А. Корниенко, Е. Т. Мирончиков

МЕТОДИКА ЦИФРОВОГО МАРКИРОВАНИЯ АУДИОСИГНАЛОВ ДЛЯ СКРЫТОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ЧЕРЕЗ ВОЗДУШНЫЙ АУДИОКАНАЛ

Дата поступления: 29.01.2018
Решение о публикации: 23.03.2018

Аннотация

Цель: Разработать методику цифрового маркирования аудиосигналов, ориентированную на передачу данных через воздушный аудиоканал. **Методы:** Используемые методы относятся к области теории информации и стеганографии. **Результаты:** Внедряемый цифровой маркер занимает весь слышимый частотный диапазон. Цифровой маркер кодирует один бит информации. Решение о значении переданного бита выносится на основании знака центрального значения взаимнокорреляционной функции. Предлагаются две методики построения цифрового маркера. Они специально ориентированы на частотные свойства обычных аудиосигналов. Невысокая вычислительная сложность данного метода маркирования позволяет использовать его для беспроводного обмена информацией между обычными смартфонами. Методики дают возможность выполнять цифровое маркирование как речевых, так и музыкальных аудиосигналов без появления каких-либо заметно слышимых артефактов. Информация внедряется в виде маркера в частотную область аудиосигнала путем амплитудной модуляции его частотных составляющих. **Практическая значимость:** Представленную модель скрытой передачи данных можно применять для неслышимой человеческому уху передачи информации через воздушный аудиоканал.

Ключевые слова: Цифровой маркер, аудиосигнал, скрытая передача данных, воздушный аудиоканал, акустическая связь, стегоаудиосигнал.

***Maksim V. Gofman**, Cand. Eng. Sci., associate professor, maxgof@gmail.com; **Anatoliy A. Kornyenko**, D. Eng. Sci., professor, head of a chair; **Yevgeniy T. Mironchikov**, D. Eng. Sci., professor (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) DIGITAL MARKING OF AUDIO SIGNALS PROCEDURE FOR HIDDEN ACOUSTIC COMMUNICATION VIA AERIAL AUDIO CHANNEL

Summary

Objective: To develop the procedure of digital marking of audio signals, aimed at data transmission via an aerial audio channel. **Methods:** The methods applied in the study refer to the theory of communication and steganography. **Results:** The introduced digital marker uses all audible frequency coverage. The digital marker codes one data bit. The decision on the value of the transferred bit is rendered on the basis of the central value sign of the cross-correlation function. Two methods were introduced for digital marker construction. They are purposely oriented at frequency properties of usual audio signals. Low computation complexity of the given marking procedure makes it possible to use it for wireless data communication between usual smartphones. The procedures provide the opportunity to perform digital marking both for speech and music audio signals without the emergence of any distinctly audible artifacts. Data is embedded in the form of a marker in audio signal frequency domain by means of amplitude modulation of its frequency components. **Practical importance:** The presented model of hidden data transmission can be applied in inaudible for the human ear data transmission via an aerial audio channel.

Keywords: Digital marker, audio signal, hidden data transmission, aerial audio channel, acoustic communication, stego audio signal.

Введение

Аудиопередача, в частности телефонная связь, широко используется в транспортной отрасли. Аудиопереговоры между диспетчером и машинистом, между машинистом и другими работниками поездной бригады обычно хранятся в специальных базах данных. Злоумышленник, используя записи из таких баз данных, может ввести в заблуждение, выдав себя, например, за диспетчера и воспроизведя записи машинисту, содержащие указания, неприемлемые в текущей ситуации. Такие действия могут привести к катастрофическим последствиям. Поэтому целесообразно вносить в аудиосигнал скрытую неслышимую информацию, опираясь на которую получатель, например, мог бы удостовериться в личности источника, а также времени создания записи. В этом случае маркировка аудиосигнала служит необходимой защитой от фальсификации сообщения.

Процедура цифрового маркирования аудиосигналов лежит в основе системы скрытой передачи данных с помощью этих сигналов. Она включает в себя три этапа: построение маркера, внедрение маркера в аудиосигнал и выделение маркера из маркированного аудиосигнала. Цифровое маркирование аудиосигнала предполагает создание из информации такого маркера и его внедрение в аудиосигнал таким образом, что становится возможным его выделить даже при условии, что маркированный аудиосигнал или стегоаудиосигнал подвергнется преднамеренной или ненамеренной атаке, т. е. процедура цифрового маркирования должна быть робастной к некоторого рода воздействиям.

Существующие методы маркирования в общем случае можно разделить на работающие во временно́й области и в областях преобразований [1]. Далее их можно подразделить на несколько подкатегорий. Так, методы из временно́й области включают методы с выравниванием по времени [2, 3] и методы [4–6], использующие эхо, тогда как методы из области преобразований можно подразделить на методы расширения спектра [7, 8], методы модуляции с индексным квантованием (от англ. quantization index modulation) [9, 10], методы «патчворка», или «лоскута» (от англ. patchwork) [11, 12].

Частым приложением процедуры цифрового маркирования является защита авторских прав при распространении аудио-, видео- и изображений в цифровых форматах. В этих случаях внедряемый сигнал либо сообщает получателю какие-то авторские данные или лицензионные ограничения, либо предотвращает или запрещает неавторизованное копирование. Другой пример приложения – внедряемый сигнал может либо разрешать, либо запрещать копирование некоторому копирующему устройству, которое проверяет внедряемый сигнал перед выполнением процедуры дупликации. Или же, например, согласованный с неким стандартом проигрыватель дисков может проверить наличие маркера, перед тем как решать проигрывать ли диск или нет. К приложениям методов цифрового маркирования относится и так называемое гибридное полосовое канальное цифровое аудиовещание [13].

В зависимости от рабочей частотной полосы воздушная акустическая связь может использовать как обычный смартфон, который способен проигрывать/записывать аудио (до 22 кГц), так и как ультразвуковой приемопередатчик (свыше 22 кГц). Поэтому любое устройство, оснащенное аудиоинтерфейсом, может быть применено как устройство аудиосвязи. Таким образом, появляется альтернативный интерфейс беспроводной связи между смартфонами, помимо имеющихся Wi-Fi и Bluetooth, которые часто выключены, для экономии батареи и/или предотвращения нежелательных подключений. Воздушная акустическая связь в частотном диапазоне до 22 кГц исследована в работах [14–17].

Далее в этой статье развивается подход, описанный в статьях [18, 19], использующий троекратное кодирование передаваемых информационных битов перед передачей через воздушный

аудиоканал. Предложенный в [18] подход показал свою устойчивость к искажающим влияниям воздушного аудиоканала. Однако он требовал применения двух различных последовательностей для кодирования значений бита информации. Особенностью разрабатываемого далее подхода является кодирование битов в знаке корреляционной функции, что уменьшает требуемое количество последовательностей до одной и тем самым увеличивает потенциально возможную скорость передачи информации. Процедура передачи состоит из трех этапов. Первый этап состоит в выборе кодового слова, соответствующего передаваемому биту, – построение маркера; второй – во внедрении этого кодового слова в аудиосигнал, в результате чего получается стегоаудиосигнал – маркированный аудиосигнал; третий – в восстановлении переданного бита из стегоаудиосигнала, после передачи через воздушный аудиоканал.

Построение маркера для аудиосигнала

Пусть с помощью аудиосигнала необходимо осуществить скрытую передачу через воздушный аудиоканал двоичного символа $x \in \{0,1\}$. Для выполнения процедуры кодирования информации – первого этапа цифрового маркирования – требуются три специальные последовательности, составленные из элементов множества $\{+1,-1\}$. Первые две последовательности

$$\boldsymbol{\alpha} = \begin{pmatrix} \alpha(1) & \alpha(2) & \dots & \alpha(N_\alpha) \end{pmatrix}, \tag{1}$$

$$\boldsymbol{\beta} = \begin{pmatrix} \beta(1) & \beta(2) & \dots & \beta(N_\beta) \end{pmatrix}, \tag{2}$$

должны обладать хорошими автокорреляционными свойствами.

С помощью третьей последовательности используется свойство обычных аудиосигналов иметь близкие спектральные характеристики смежных последовательностей отсчетов. Поэтому третья последовательность

$$\boldsymbol{\gamma} = \begin{pmatrix} \gamma(1) & \gamma(2) & \dots & \gamma(N_\gamma) \end{pmatrix} \tag{3}$$

должна обладать следующим свойством: ее подпоследовательности из +1-ц и –1-ц должны быть короткими, обычно чем короче, тем лучше.

Процесс получения кодового слова по двоичному символу x следующий. Если $x = 1$, то выбирается последовательность $\boldsymbol{\alpha}$, а если же $x = 0$ – то последовательность $-\boldsymbol{\alpha}$. Затем каждый элемент выбранной последовательности заменяется либо последовательностью $\boldsymbol{\beta}$, если он равен 1, либо последовательностью $-\boldsymbol{\beta}$, в противном случае. И, наконец, каждый элемент последовательности также подвергается замене: элемент, равный 1, заменяется на последовательность $\boldsymbol{\gamma}$, тогда как элемент, равный –1, – на последовательность $-\boldsymbol{\gamma}$. Итоговую последовательность можно представить в виде вектора-строки

$$\mathbf{y}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}, x) = \begin{pmatrix} y(1,\alpha(1),\beta(1),\gamma(1),x) & \dots & y(2,\alpha(1),\beta(1),\gamma(2),x) \dots \\ y(N_\alpha N_\beta N_\gamma, \alpha(N_\alpha), \beta(N_\beta), \gamma(N_\gamma), x) \end{pmatrix}, \tag{4}$$

здесь

$$y\left((i-1)N_\beta N_\gamma + (j-1)N_\gamma + k, \alpha(i), \beta(j), \gamma(k), x\right) = (2x-1)\alpha(i)\beta(j)\gamma(k),$$

где $i \in \{1,2,\ldots,N_\alpha\}$; $j \in \{1,2,\ldots,N_\beta\}$; $k \in \{1,2,\ldots,N_\gamma\}$. Если воспользоваться операцией кронекерова произведения, то

$$\mathbf{y}(\boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}, x) = (2x-1)\, \boldsymbol{\alpha} \otimes \boldsymbol{\beta} \otimes \boldsymbol{\gamma},$$

где $\otimes$ – это оператор кронекерова произведения.

Видно, что такой способ кодирования обладает небольшой скоростью, однако его легко адаптировать для передачи не одного бита, а последовательностей бит. Например, когда требуется передавать последовательности из четырех бит: $\mathbf{x}_0 = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)$, $\mathbf{x}_1 = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 1)$ и т. д. до $\mathbf{x}_{15} = (1 \quad 1 \quad 1 \quad 1)$. Тогда вместо одной последовательности $\boldsymbol{\alpha}$ используются несколько последовательностей $\boldsymbol{\alpha}_i$, где $i \in \{0,1, \ldots, 7\}$, которые, помимо хороших автокорреляционных свойств, имеют слабую взаимную корреляцию. В таком случае последовательность $\mathbf{x}_i$ можно кодировать последовательностью $\mathbf{y}(\boldsymbol{\alpha}_i, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}, 1)$, а последовательность $\mathbf{x}_{15-i}$ – последовательностью $\mathbf{y}(\boldsymbol{\alpha}_i, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}, 0)$. Если же применять еще и различные последовательности $\boldsymbol{\beta}$, обладающие хорошими автокорреляционными свойствами, но со слабой взаимной корреляцией, то можно добиться еще большей скорости передачи, так как в этом случае такими же будут корреляционные свойства у итоговых последовательностей $\mathbf{y}$.

Внедрение маркера в аудиосигнал

Внедрение маркера в аудиосигнал составляет второй этап предлагаемого процесса скрытой передачи информации. Пусть задан цифровой аудиосигнал

$$\mathbf{z} = (z(1) \quad z(2) \quad \ldots \quad z(N_Z)), \tag{5}$$

в котором $z(i)$ – это i-й отсчет цифрового аудиосигнала, принимающий значения из диапазона $[-1,1]$; N_Z – количество отсчетов, при этом

$$N_Z = K_{\text{блок}} N_{\text{блок}},$$

где

$$K_{\text{блок}} = N_\alpha N_\gamma,$$

$N_{\text{блок}}$ – четное число, удовлетворяющее неравенству

$$N_{\text{блок}} \geq 2(N_\beta + 1).$$

Элементы вектора (4) встраиваются в цифровой аудиосигнал (5), в результате получается такого же размера стегоаудиосигнал

$$\mathbf{z}' = (z'(1) \quad z'(2) \quad \ldots \quad z'(N_Z)), \tag{6}$$

здесь $z'(i) \in [-1,+1]$ – это i-й отсчет цифрового стегоаудиосигнала. Процесс встраивания начинается с разбиения вектора (5) на блоки, которые затем подвергаются прямому дискретному преобразованию Фурье, что позволяет перейти в частотную область и получить спект-

ральные линии соответствующих блоков отсчетов. Путем амплитудной модуляции построенных спектральных линий элементы вектора (4) встраиваются в скрывающий сигнал (5). Завершением процесса построения стегоаудиосигнала (6) являются применение обратного дискретного преобразования Фурье к модифицированным спектральным линиям, а также нормировка, в результате и получается временно́й сигнал (6). Далее приводится детальное описание этого процесса.

Блоки, на которые разбивается вектор (5), представляют собой векторы из отсчетов:

$$\mathbf{z}_{\text{блок}}(j)=\left(z\left(N_{\text{блок}}(j-1)+1\right)\ \ z\left(N_{\text{блок}}(j-1)+2\right)\ \ \ldots\ \ z\left(N_{\text{блок}}j\right)\right),$$

где $j\in\left\{1,2,\ldots,K_{\text{блок}}\right\}$. Блок подвергается прямому дискретному преобразованию Фурье, что дает вектор спектральных линий

$$\mathbf{Z}_{\text{блок}}(j)=\left(Z_{\text{блок}}(j,1)\ \ Z_{\text{блок}}(j,2)\ \ \ldots\ \ Z_{\text{блок}}(j,N_{\text{блок}})\right),$$

здесь

$$Z_{\text{блок}}(j,k)=\sum_{k=1}^{N_{\text{блок}}}z\left(N_{\text{блок}}(j-1)+k\right)\exp\left(-\frac{\imath 2\pi(j-1)(k-1)}{N_{\text{блок}}}\right),$$

$j\in\left\{1,2,\ldots,K_{\text{блок}}\right\}$, $k\in\left\{1,2,\ldots,N_{\text{блок}}\right\}$, $\imath=\sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Прежде чем описать процесс применяемой амплитудной модуляции, введем дополнительные объекты, которые нам потребуются. Пусть для j-го ($j\in\left\{1,2,\ldots,K_{\text{блок}}\right\}$) блока спектральных линий множества

$$\mathbf{A}_{\text{НЛ}}(j)=\left\{A_{\text{НЛ}}(j,1),A_{\text{НЛ}}(j,2),\ \ldots,A_{\text{НЛ}}\left(j,N_{\beta}\right)\right\}$$

и

$$\mathbf{A}_{\text{СВ}}(j)=\left\{A_{\text{СВ}}(j,1),A_{\text{СВ}}(j,2),\ \ldots,\ A_{\text{СВ}}\left(j,N_{\beta}\right)\right\}$$

обозначают номера модифицируемых спектральных линий и величины сил встраивания соответственно. Номера линий $A_{\text{НЛ}}(i,j)$ удовлетворяют следующим неравенствам:

$$1<A_{\text{НЛ}}(j,1)<A_{\text{НЛ}}(j,2)<\ldots<A_{\text{НЛ}}\left(j,N_{\beta}\right)\le\frac{N_{\text{блок}}}{2}.$$

Силы встраивания $A_{\text{СВ}}(j,i)$ представляют собой положительные вещественные числа, обычно значительно меньшие единицы, т. е. $A_{\text{СВ}}(j,i)\ll 1$.

Встраивание происходит в частотную область, а именно в амплитуду спектральных линий. Количество спектральных линий $N_{\text{блок}}$ в каждом блоке и число блоков $K_{\text{блок}}$ в получаемом стегоаудиосигнале (6) и исходном аудиосигнале не отличаются. Обозначим k-ю спектральную линию j-го блока отсчетов стегоаудиосигнала (6) символом $Z'_{\text{блок}}(j,k)$, тогда для первой половины блока спектральных линий будет выполняться равенство

$$Z'_{\text{блок}}(j,k)=\begin{cases}Z_{\text{блок}}(j,k)\left(1+A_{\text{СВ}}(j,i)\,y\left(m(j,i)\right)\right), \text{ если } k=A_{\text{НЛ}}(j,i),\\ Z_{\text{блок}}(j,k), \text{ иначе,}\end{cases}$$

здесь $j \in \{1,2,\ldots,K_{\text{блок}}\}$, $k \in \{1,2,\ldots,N_{\text{блок}}/2\}$, $i \in \{1,2,\ldots,N_{\beta}\}$,

$$m(j,i) = \big((j-1) \bmod N_{\gamma}\big) + 1 + (i-1)N_{\gamma} + \left[\frac{j-1}{N_{\gamma}}\right] N_{\gamma} N_{\beta},$$

где $[a]$ – целая часть вещественного числа a. Спектральные линии j-го блока $Z_{\text{блок}}(j,k)$ с номерами k из диапазона от $(N_{\text{блок}}/2)+1$ до $N_{\text{блок}}$ для сохранения свойства сопряженной симметричности также подвергаются изменениям в соответствии со следующим равенством:

$$Z'_{\text{блок}}(j,k) = \begin{cases} \left(Z'_{\text{блок}}(j, N_{\text{блок}} - k + 2)\right)^*, \text{ если } j \neq (N_{\text{блок}}/2)+1, \\ Z_{\text{блок}}(j,k), \text{ иначе,} \end{cases}$$

в котором $j \in \{1,2,\ldots,K_{\text{блок}}\}$, $k \in \{(N_{\text{блок}}/2)+1, (N_{\text{блок}}/2)+2,\ldots,N_{\text{блок}}\}$, $(a)^*$ – число, комплексно сопряженное числу a.

Таким образом, вместо исходных блоков спектральных линий получаются блоки модифицированных спектральных линий. Однако, чтобы перейти во временну́ю область, требуется выполнить обратное дискретное преобразование Фурье над каждым таким модифицированным блоком. Выполняя эти преобразования и объединяя их результаты, получим вещественный цифровой стегоаудиосигнал (6), элементы которого удовлетворяют равенству

$$z'\big((j-1)N_{\text{блок}} + i\big) = \frac{1}{N_{\text{блок}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{блок}}} Z'_{\text{блок}}(j,k) \exp\left(\frac{\imath 2\pi (i-1)(k-1)}{N_{\text{блок}}}\right), \tag{7}$$

где $j \in \{1,2,\ldots,K_{\text{блок}}\}$; $i \in \{1,2,\ldots,N_{\text{блок}}\}$; $\imath = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Величины (7) могут оказаться вне диапазона [1, 1]. Поэтому завершающим этапом построения стегоаудиосигнала (6) является нормировка значений его отсчетов. Мультипликативный нормирующий коэффициент, например, может быть получен на основании всех величин (7), таким образом:

$$\theta = \frac{1}{\max\left\{\left|z'(1)\right|, \left|z'(2)\right|, \ldots, \left|z'(N_{\text{z}})\right|\right\}},$$

где $|a|$ – абсолютное значение числа a. Или же нормировка может выполняться поблоково, в таком случае задержка перед отправкой стегоаудиосигнала в канал уменьшается.

Выделение скрытой информации из стегоаудиосигнала после его передачи через воздушный аудиоканал

Третий этап предлагаемого метода скрытой передачи информации состоит в выделении из стегоаудиосигнала, принятого микрофоном, внедренной информации. Стегоаудиосигнал (6) передается через воздушный аудиоканал. Пусть на выходе аудиоканала выполняется дискретизация с частотой F_s, равной частоте отправки отсчетов стегоаудиосигнала (6) в аудиоканал.

Таким образом из-за шумов на выходе канала, а также из-за отсутствия синхронизации между передатчиком и приемником получится последовательность отсчетов

$$r(1), r(2), \ \dots \ , r(N_{\text{Z}}), r(N_{\text{Z}}+1), \ \dots \ , \tag{8}$$

в общем случае отличающихся от переданных.

Чтобы из последовательности (8) выделить переданный сигнал (4), требуется определить ту подпоследовательность отсчетов, в которой он скрыт. Поиск начинается с того, что последовательность (8) разбивается на перекрывающиеся подпоследовательности одинаковой длины N_Z. Обозначим отдельную подпоследовательность вектором

$$\mathbf{r}(i_{\text{шаг}}) = \left(r(i_{\text{шаг}}) \quad r(i_{\text{шаг}}+1) \quad \dots \quad r(i_{\text{шаг}}+N_{\text{Z}}-1) \right), \tag{9}$$

в котором $i_{\text{шаг}} \in \{1, \ 2, \ \dots\}$.

Далее выполняются действия, из которых некоторые обратны выполненным процедурой встраивания. Так, выполняются дискретные преобразования Фурье над смежными блоками элементов вектора (9), при этом длина блока так же, как и в процедуре встраивания, равна $N_{\text{блок}}$; например, первый блок можно описать вектором

$$\left(r(i_{\text{шаг}}) \quad r(i_{\text{шаг}}+1) \quad \dots \quad r(i_{\text{шаг}}+N_{\text{блок}}-1) \right), \tag{10}$$

а второй блок – вектором

$$\left(r(i_{\text{шаг}}+N_{\text{блок}}) \quad r(i_{\text{шаг}}+N_{\text{блок}}+1) \quad \dots \quad r(i_{\text{шаг}}+2N_{\text{блок}}-1) \right), \tag{11}$$

и т. д. В результате преобразований каждый такой блок преобразуется в такой же размерности комплексный вектор – вектор спектральных линий. Обозначим i-ю спектральную линию j-го блока через

$$R(j,i,i_{\text{шаг}}) = \sum_{k=0}^{N_{\text{блок}}-1} r\left(i_{\text{шаг}}+(j-1)N_{\text{блок}}+k\right) \exp\left(-\frac{\imath 2\pi k(i-1)}{N_{\text{блок}}}\right), \tag{12}$$

здесь $j \in \{1,2,\dots,K_{\text{блок}}\}$, $i \in \{1,2,\dots,N_{\text{блок}}\}$, $\imath = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Вычислим сначала абсолютные значения тех спектральных величин (12), в которых $i \in \mathbf{A}_{\text{НЛ}}(j)$, а потом их натуральные логарифмы. Затем сформируем из результатов этих вычислений, выполненных для всех $j \in \{1,2,\dots,K_{\text{блок}}\}$, вектор

$$\mathbf{R}_{\text{НЛ}}(i_{\text{шаг}}) = \left(R_{\text{НЛ}}(1,i_{\text{шаг}}) \quad R_{\text{НЛ}}(2,i_{\text{шаг}}) \quad \dots \quad R_{\text{НЛ}}\left(K_{\text{блок}}N_{\beta},i_{\text{шаг}}\right) \right), \tag{13}$$

где

$$R_{\text{НЛ}}(k,i_{\text{шаг}}) = \ln\left| R\left(k_1(k), A_{\text{НЛ}}(k_1(k),k_2(k)), i_{\text{шаг}}\right)\right|,$$

$$k \in \{1, \ 2, \ \dots \ , K_{\text{блок}}N_{\beta}\},$$

$$k_1(k)=\left[\frac{k-1}{N_\beta}\right]+1,$$

$$k_2(k)=\left((k-1)\bmod N_\beta\right)+1.$$

Если же скрывающий сигнал (7) известен, то обычно после его вычитания

$$R_{\text{НЛ}}(k,i_{\text{шаг}})=\ln\left|R\left(k_1(k),A_{\text{НЛ}}\left(k_1(k),k_2(k)\right),i_{\text{шаг}}\right)\right|-\ln\left|Z\left(k_1(k),A_{\text{НЛ}}\left(k_1(k),k_2(k)\right)\right)\right|,$$

вероятность успешного детектирования значительно увеличивается.

Учитывая, что длина вектора (13) кратна $K_{\text{блок}}=N_\alpha N_\gamma$, его можно переформатировать в матрицу $\mathbf{D}(i_{\text{шаг}})$ размера $N_\gamma\times N_\alpha N_\beta$:

$$\mathbf{D}(i_{\text{шаг}})=\begin{pmatrix} D(1,1,i_{\text{шаг}}) & D(1,2,i_{\text{шаг}}) & \cdots & D(1,N_\alpha N_\beta,i_{\text{шаг}}) \\ D(2,1,i_{\text{шаг}}) & D(2,2,i_{\text{шаг}}) & \cdots & D(2,N_\alpha N_\beta,i_{\text{шаг}}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D(N_\gamma,1,i_{\text{шаг}}) & D(N_\gamma,2,i_{\text{шаг}}) & \cdots & D(N_\gamma,N_\alpha N_\beta,i_{\text{шаг}}) \end{pmatrix}, \tag{14}$$

в которой

$$D(i,j,i_{\text{шаг}})=R_{\text{НЛ}}(k,i_{\text{шаг}}),$$

где $k\in\{1,2,\ldots,K_{\text{блок}}N_\beta\}$, а зависимость между целыми числами i, j, k является следующей:

$$i=\left(\left[\frac{k-1}{N_\beta}\right]\bmod N_\gamma\right)+1,$$

$$j=\left[\frac{k-1}{N_\beta N_\gamma}\right]N_\beta+\left((k-1)\bmod N_\beta\right)+1.$$

Детектирование скрытого сигнала

Вычислим линейную комбинацию строк матрицы (14) путем умножения ее слева на вектор (3). Применим к элементам вектора, получаемого в результате этого умножения, функцию

$$\operatorname{sign}(a)=\begin{cases} 1, & \text{если } a\geq 0, \\ -1, & \text{если } a<0, \end{cases} \tag{15}$$

и найдем вектор

$$\mathbf{s}(i_{\text{шаг}})=\left(s(1,i_{\text{шаг}})\quad s(2,i_{\text{шаг}})\quad\ldots\quad s(N_\alpha N_\beta,i_{\text{шаг}})\right), \tag{16}$$

где

$$s\left(i,i_{\text{шаг}}\right)=\operatorname{sign}\left(\sum_{k=1}^{N_\gamma}\gamma\left(k\right)D\left(k,i,i_{\text{шаг}}\right)\right), \tag{17}$$

$i\in\{1,2,\ldots,N_\alpha N_\beta\}$. Результаты натурных экспериментов показали, что в некоторых случаях для повышения вероятности успешности передачи выгодно отказаться от применения функции (15) в равенстве (17), т. е. использовать такой вариант:

$$s\left(i,i_{\text{шаг}}\right)=\sum_{k=1}^{N_\gamma}\gamma\left(k\right)D\left(k,i,i_{\text{шаг}}\right). \tag{17a}$$

Переформатируем вектор (16) в матрицу

$$\mathbf{S}\left(i_{\text{шаг}}\right)=\begin{pmatrix} S\left(1,1,i_{\text{шаг}}\right) & S\left(1,2,i_{\text{шаг}}\right) & \cdots & S\left(1,N_\beta,i_{\text{шаг}}\right)\\ S\left(2,1,i_{\text{шаг}}\right) & S\left(2,2,i_{\text{шаг}}\right) & \cdots & S\left(2,N_\beta,i_{\text{шаг}}\right)\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ S\left(N_\alpha,1,i_{\text{шаг}}\right) & S\left(N_\alpha,2,i_{\text{шаг}}\right) & \cdots & S\left(N_\alpha,N_\beta,i_{\text{шаг}}\right)\end{pmatrix}, \tag{18}$$

в которой

$$S\left(i,j,i_{\text{шаг}}\right)=s\left(k,i_{\text{шаг}}\right),$$

где $k\in\left\{1,2,\ldots,N_\alpha N_\beta\right\}$, а зависимость между i, j, k определяется следующими равенствами:

$$i=\left[\frac{k-1}{N_\beta}\right]+1,\qquad j=\left(\left(k-1\right)\bmod N_\beta\right)+1.$$

Теперь вычислим скалярные произведения между вектором (2) и теми векторами, которые извлечены из (13), представляющие собой строки матрицы (18), скалярно умножив эту матрицу на вектор (2). К элементам вектора, полученного в результате этого умножения, применим функцию (15). И, наконец, затем вычислим скалярное произведение установленного вектора и вектора (1), что даст целое число

$$\rho_{\text{цифр}}\left(i_{\text{шаг}}\right)=\sum_{i=1}^{N_\alpha}\alpha\left(i\right)\operatorname{sign}\left(\sum_{k=1}^{N_\beta}S\left(i,k,i_{\text{шаг}}\right)\beta\left(k\right)\right), \tag{19}$$

лежащее в диапазоне от $-N_\alpha$ до N_α.

Решение о том, что в векторе (9) скрыт вектор (4), будет положительным, если будут выполняться три условия. Первое условие заключается в том, чтобы выполнялось неравенство

$$\left|\rho_{\text{цифр}}\left(i_{\text{шаг}}\right)\right|\geq\rho_{\text{порог}}, \tag{20}$$

где $\rho_{\text{порог}}$ – заданное положительное целое число, удовлетворяющее неравенству $\rho_{\text{порог}}\leq N_\alpha$.

Второе условие учитывает не только рассматриваемый вектор (9), но и $W_{\text{справа}}-1$ последующих векторов, а формулируется оно так: абсолютное значение $\left|\rho_{\text{цифр}}\left(i_{\text{шаг}}\right)\right|$ должно быть наибольшим среди всех абсолютных значений $\left|\rho_{\text{цифр}}\left(i_{\text{шаг}}+j\right)\right|$, где $j\in\{0,1,\ldots,W_{\text{справа}}-1\}$, т. е. должно выполняться равенство

$$\left|\rho_{\text{цифр}}\left(i_{\text{шаг}}\right)\right|=\max\left\{\left|\rho_{\text{цифр}}\left(i_{\text{шаг}}\right)\right|,\left|\rho_{\text{цифр}}\left(i_{\text{шаг}}+1\right)\right|,\ \ldots,\ \left|\rho_{\text{цифр}}\left(i_{\text{шаг}}+W_{\text{справа}}-1\right)\right|\right\}.$$

Обычно в качестве величины $W_{\text{справа}}$ следует брать положительное целое число, не меньшее произведения $N_{\text{блок}}N_{\gamma}$.

Для упрощения формулирования третьего условия введем сумму

$$\mu\left(i_{\text{шаг}}\right)=\sum_{i=1}^{N_\alpha}\left(\text{sign}\left(\rho_{\text{цифр}}\left(i_{\text{шаг}}\right)\right)\alpha(i)N_\beta-\sum_{k=1}^{N_\beta}S\left(i,k,i_{\text{шаг}}\right)\beta(k)\right)^2.$$

Итак, третье условие: для последовательности (9) $\mathbf{r}\left(i_{\text{шаг}}\right)$ должно выполняться равенство

$$\mu\left(i_{\text{шаг}}\right)=\min\left\{\mu\left(i_{\text{шаг}}+j_1\right),\ldots,\mu\left(i_{\text{шаг}}+j_K\right)\right\},$$

где $j_k\in\left\{j_1,\ldots,j_K\right\}\subseteq\left\{0,1,\ldots,W_{\text{справа}}-1\right\}$ – это такие целые числа, для которых

$$\left|\rho_{\text{цифр}}\left(i_{\text{шаг}}\right)\right|=\left|\rho_{\text{цифр}}\left(i_{\text{шаг}}+j_k\right)\right|.$$

Помимо описанного выше цифрового метода результаты натурных экспериментов показали полезность гибридного – цифро-аналогового – метода. Процедура цифро-аналогового корреляционного детектирования происходит следующим образом. Вначале вычисляется величина (19). Дальнейшие действия повторяют те, которые выполняются в цифровом подходе, однако в них не используется функция (15). Так, в цифро-аналоговом подходе элементы вектора (16) будут вычисляться по формуле (17а) и в общем случае окажутся вещественными числами. Матрица (18) будет составляться именно из вещественных значений (17а). В конце будет вычисляться величина

$$\rho_{\text{аналог}}\left(i_{\text{шаг}}\right)=\sum_{i=1}^{N_\alpha}\alpha(i)\sum_{k=1}^{N_\beta}S\left(i,k,i_{\text{шаг}}\right)\beta(k). \tag{21}$$

Этот подход называется цифро-аналоговым, так как решение о наличии скрытого сигнала принимается на основании величины не только (21), но и (19). Есть два требования, которым должен удовлетворять вектор (9), чтобы было вынесено положительное решение о наличии в нем скрытого сигнала. Первое требование совпадает с первым требованием цифрового корреляционного детектирования, определенным неравенством (20). Второе требование состоит в том, что величина (21) должна удовлетворять равенству

$$\left|\rho_{\text{аналог}}\left(i_{\text{шаг}}\right)\right|=\max\left\{\left|\rho_{\text{аналог}}\left(i_{\text{шаг}}\right)\right|,\left|\rho_{\text{аналог}}\left(i_{\text{шаг}}+1\right)\right|,\ldots,\left|\rho_{\text{аналог}}\left(i_{\text{шаг}}+W_{\text{справа}}-1\right)\right|\right\}.$$

Иногда оказывается полезным предъявлять еще и третье требование, заключающее в том, чтобы величина (21) превосходила заданный вещественный порог $\rho_{\text{апорог}}\left(i_{\text{шаг}}\right)$:

$$\rho_{\text{аналог}}\left(i_{\text{шаг}}\right)\geq\rho_{\text{апорог}}\left(i_{\text{шаг}}\right).$$

Выбор значения порога $\rho_{\text{апорог}}\left(i_{\text{шаг}}\right)$ зависит от условий распространения передаваемого стегоаудиосигнала. Также полезно сделать его зависимым от характеристик самого исходного аудиосигнала, однако в таком случае приемнику потребуются сведения об исходном аудиосигнале.

Следует отметить, что в цифро-аналоговом подходе при проверке первого требования может использоваться числовое значение $\rho_{\text{порог}}$, меньшее, чем оно в цифровом подходе, когда выполняется обработка одной и той же принятой последовательности отсчетов, но успешность детектирования при этом обычно оказывается выше.

Восстановление переданного информационного бита

Когда последовательность (9) удовлетворяет всем требованиям, указанным в выбранном способе корреляционного детектирования, она рассматривается, как содержащая скрытый сигнал (4). В таком случае значение скрытого бита вычисляется следующим образом:

$$x' = \begin{cases} 1, & \text{если} \quad \operatorname{sign}\left(\rho\left(i_{\text{шаг}}\right)\right) = 1, \\ 0, & \text{если} \quad \operatorname{sign}\left(\rho\left(i_{\text{шаг}}\right)\right) = -1, \end{cases}$$

где $\rho\left(i_{\text{шаг}}\right)$ – это величина либо (19), либо (21), в зависимости от выбранного способа детектирования. Укажем, что искажения в канале могут повлиять так, что значения принятого бита x' и переданного бита x могут не совпасть.

Две методики построения последовательностей γ

В обычных аудиосигналах смежные блоки отсчетов

$$\left(r\left(i_{\text{шаг}}\right) \quad r\left(i_{\text{шаг}}+1\right) \quad \ldots \quad r\left(i_{\text{шаг}}+jN_{\text{блок}}-1\right)\right),$$

в которых $j \in \left\{1,2,\ldots,K_{\text{блок}}\right\}$, обладают очень близкими спектральными характеристиками. Потому полезно использовать такую последовательность (3), которая при вычислении элементов вектора (16) учитывает данное свойство смежных блоков отсчетов. Опираясь на это свойство, элементы вектора (16) при небольшом шуме в канале и наличии скрытого сигнала (4) в рассматриваемом векторе (9) будут представлять собой слабо зашумленные элементы вектора (2).

Далее представим две методики построения последовательностей (3). Первая предполагает, что последовательность (3) выбирается такая, которая обладает хорошими автокорреляционными свойствами, но при этом в ней подпоследовательности из +1-ц или –1-ц имеют небольшую длину. Однако в процессе вычисления элементов вектора (16) (см. равенство (17) или (17а)) первая методика не применяет саму последовательность (3). Вместо нее используется другая последовательность γ′, определяемая следующим образом. Вначале вычисляется вектор **δ**, представляющий собой разность между первыми $N_\gamma - 1$ и последними $N_\gamma - 1$ элементами вектора (3):

$$\boldsymbol{\delta} = \left(\delta(1) \quad \delta(2) \quad \cdots \quad \delta\left(N_\gamma - 1\right)\right), \tag{22}$$

где

$$\delta(i) = \gamma(i) - \gamma(i+1), \quad i \in \left\{1,2,\ldots,N_\gamma - 1\right\};$$

смежные элементы вектора (3), которые равны между собой, приведут к появлению нулевого элемента в векторе (22). Пусть возрастающая последовательность положительных целых $i_1,\ldots,i_K$ составлена из порядковых номеров тех элементов вектора (22), которые не равны 0; при этом для простоты изложения будем считать, что $i_0 = 0$ и $i_{K+1} = N_\gamma$. Используя данные целые числа и элементы вектора (3), сформируем вектор

$$\boldsymbol{\gamma}' = \left(\gamma'(1) \quad \gamma'(2) \quad \ldots \quad \gamma'\left(N_\gamma\right)\right), \tag{23}$$

где

$$\gamma'(i) = \frac{\gamma(i)}{i_k - i_{k-1}},$$

для всякого $i_{k-1} < i \le i_k$ при $k \in \{1,2,\ldots,K+1\}$.

Еще раз следует отметить, что при применении этой методики именно вектор (23) используется вместо вектора (3) в процедуре выделения. Это позволяет частично учесть в процессе детектирования спектральное сходство смежных блоков отсчетов. При выборе последовательности (3) среди последовательностей одинаковой длины для первой методики следует отдавать предпочтение той, которая порождает такую последовательность (23), у которой абсолютное значение суммы элементов меньше; например, между двумя последовательностями Баркера $(1 \quad -1 \quad 1 \quad 1)$ и $(1 \quad -1 \quad -1 \quad -1)$ нужно выбирать вторую.

Вторая методика отличается от первой тем, что в ней используется некоторая последовательность

$$\boldsymbol{\varphi} = \left(\varphi(1) \quad \varphi(2) \quad \ldots \quad \varphi\left(N_\varphi\right)\right), \tag{24}$$

где $\varphi(i) \in \{+1,-1\}$, которая дублируется $N_{\text{дубль}}$ раз. Дублирование при выборе подходящего вектора (24) будет увеличивать отношение максимального значения к минимальной величине автокорреляционной функции последовательности (3). После дублирования вектора (24) и объединения копий каждый элемент объединенной последовательности заменяется на последовательность $\boldsymbol{\eta}$ четной длины N_η, первая половина которой состоит из одних единиц, а вторая – из минус единиц:

$$\boldsymbol{\eta} = \left(\eta(1) \quad \eta(2) \quad \ldots \quad \eta\left(N_\eta\right)\right), \tag{25}$$

здесь

$$\eta(i) = \begin{cases} 1, & \text{если} \quad i \le \dfrac{N_\eta}{2}, \\ -1, & \text{если} \quad i > \dfrac{N_\eta}{2}, \end{cases}$$

где $i \in \{1,2,\ldots,N_\eta\}$. При этом, когда выполняется замена, последовательность (25) масштабируется с коэффициентом, представляющим собой заменяемый элемент. В итоге после замены получается последовательность (3), длина которой равна $N_\gamma = N_{\text{дубль}} N_\varphi N_\eta$, а элементы удовлетворяют равенству

$$\gamma(j)=\eta\left(\left((j-1)\bmod N_{\eta}\right)+1\right)\varphi\left(\left(\left[\frac{j-1}{2}\right]\bmod N_{\varphi}\right)+1\right),$$

в котором $j\in\{1,2,\ldots,N_{\gamma}\}$, $[a]$ – целая часть числа a. Если использовать оператор произведения Кронекера, то последовательность (3) можно получить таким образом:

$$\boldsymbol{\gamma}=(1\quad 1\quad \ldots\quad 1)\otimes\boldsymbol{\varphi}\otimes\boldsymbol{\eta},$$

где первый вектор, составленный из одних единиц, имеет длину $N_{\text{дубль}}$, а $\otimes$ – это оператор произведения Кронекера. Во второй методике, в отличие от первой, последовательность (3) используется в процедуре вычисления элементов вектора (16). Значение N_{η} следует выбирать с учетом того, сколько смежных блоков отсчётов аудиосигнала имеют приблизительно одинаковые амплитудные спектры. Вторая методика уже при передаче учитывает спектральное сходство смежных блоков отсчётов.

Заключение

В статье сформулированы свойства, которыми следует наделить скрываемую последовательность, чтобы повысить ее робастность к искажающим влияниям воздушного аудиоканала, когда используется разработанный метод цифрового маркирования аудиосигналов. Предложены способы построения последовательностей, обладающих подходящими свойствами. Способ детектирования наличия скрытого сигнала (цифрового маркера) является слепым, так как не требует знания приемником скрывающего сигнала. Простота использованного метода скрытой передачи данных позволяет применять его в режиме реального времени без необходимости требовать от передатчика и приемника значительной вычислительной мощности.

Библиографический список

1. Hua G. Twenty years of digital audio watermarking – a comprehensive review / G. Hua, J. Huang, Y.Q. Shi, J. Goh, V.L. Thing // Signal Processing. – 2016. – Vol. 128. – P. 222–242.

2. Bassia P. Robust audio watermarking in the time domain / P. Bassia, I. Pitas, N. Nikolaidis // IEEE Transactions on multimedia. – 2001. – Vol. 3, N 2. – P. 232–241.

3. Lemma A.N. A temporal domain audio watermarking technique / A.N. Lemma, J. Aprea, W. Oomen, L.V.D. Kerkhof // IEEE Transactions on signal processing. – 2003. – Vol. 51, N 4. – P. 1088–1097.

4. Gruhl D. Echo hiding / D. Gruhl, A. Lu, W. Bender // International Workshop on Information Hiding. – Berlin, Heidelberg : Springer, 1996. – P. 295–315.

5. Hu P. Robust time-spread echo watermarking using characteristics of host signals / P. Hu, D. Peng, Z. Yi, Y. Xiang // Electronics Letters. – 2016. – Vol. 52, N 1. – P. 5–6.

6. Xiang Y. A dual-channel time-spread echo method for audio watermarking / Y. Xiang, I. Natgunanathan, D. Peng, W. Zhou, S. Yu // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 2012. – Vol. 7, N 2. – P. 383–392.

7. Kirovski D. Spread-spectrum watermarking of audio signals / D. Kirovski, H.S. Malvar // IEEE Transactions on signal processing. – 2003. – Vol. 51, N 4. – P. 1020–1033.

8. Verma C. Secure random sequence based frequency hoping spread spectrum audio watermarking / C. Verma, S. Tarar // International Journal of Engineering Science. – 2016. – Vol. 6, N 5. – P. 5026–5032.

9. Chen B. Quantization index modulation : A class of provably good methods for digital watermarking and information embedding / B. Chen, G. W. Wornell // IEEE Transactions on Information Theory. – 2001. – Vol. 47, N 4. – P. 1423–1443.

10. Tian H. Improving security of quantization-index-modulation steganography in low bit-rate speech streams / H. Tian, J. Liu, S. Li // Multimedia systems. – 2014. – Vol. 20, N 2. – P. 143–154.

11. Yeo I. K. Modified patchwork algorithm : A novel audio watermarking scheme / I. K. Yeo, H. J. Kim // IEEE Transactions on speech and audio processing. – 2003. – Vol. 11, N 4. – P. 381–386.

12. Xiang Y. Patchwork-based audio watermarking method robust to de-synchronization attacks / Y. Xiang, I. Natgunanathan, S. Guo, W. Zhou, S. Nahavandi // IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing (TASLP). – 2014. – Vol. 22, N 9. – P. 1413–1423.

13. Wang F. Simultaneous broadcasting of analog FM and digital signals by separating co-channel FM signals / F. Wang, J. Huang, X. Chen, G. Zhang, A. Men // IEEE Communications Letters. – 2016. – Vol. 20, N 11. – P. 2197–2200.

14. Lee H. Chirp signal-based aerial acoustic communication for smart devices / H. Lee, T. H. Kim, J. W. Choi, S. Choi // IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). – 2015. – P. 2407–2415.

15. Nandakumar R. Dhwani : secure peer-to-peer acoustic NFC / R. Nandakumar, K. K. Chintalapudi, V. Padmanabhan, R. Venkatesan // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. – 2013. – Vol. 43, N 4. – P. 63–74.

16. Wang Q. Messages behind the sound: real-time hidden acoustic signal capture with smartphones / Q. Wang, K. Ren, M. Zhou, T. Lei, D. Koutsonikolas, L. Su // Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. – ACM–2016. – P. 29–41.

17. Hanspach M. On covert acoustical mesh networks in air / M. Hanspach, M. Goetz // Journal of Communications. – 2013. – Vol. 8, N 11. – P. 758–767.

18. Гофман М. В. Методика скрытой передачи данных при связи через воздушный аудиоканал / М. В. Гофман // Труды СПИИРАН. – 2017. – Вып. 51. – С. 97–122.

19. Гофман М. В. Цифровое маркирование аудиосигналов для робастной скрытой акустической связи через воздушный аудиоканал / М. В. Гофман, А. А. Корниенко, М. В. Мирончиков, А. Б. Никитин // Труды СПИИРАН. – 2017. – Вып. 55. – С. 185–215.

References

1. Hua G., Huang J., Shi Y. Q., Goh J. & Thing V. L. Twenty years of digital audio watermarking – a comprehensive review. *Signal Processing*, 2016, vol. 128, pp. 222–242.

2. Bassia P., Pitas I. & Nikolaidis N. Robust audio watermarking in the time domain. *IEEE Transactions on multimedia*, 2001, vol. 3, no. 2, pp. 232–241.

3. Lemma A. N., Aprea J., Oomen W. & Kerkhof L. V. D. A temporal domain audio watermarking technique. *IEEE Transactions on signal processing*, 2003, vol. 51, no. 4, pp. 1088–1097.

4. Gruhl D., Lu A. & Bender W. Echo hiding. *International Workshop on Information Hiding*. Berlin, Heidelberg, Springer Press, 1996, pp. 295–315.

5. Hu P., Peng D., Yi Z. & Xiang Y. Robust time-spread echo watermarking using characteristics of host signals. *Electronics Letters*, 2016, vol. 52, no. 1, pp. 5–6.

6. Xiang Y., Natgunanathan I., Peng D., Zhou W. & Yu S. A dual-channel time-spread echo method for audio watermarking. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2012, vol. 7, no. 2, pp. 383–392.

7. Kirovski D. & Malvar H. S. Spread-spectrum watermarking of audio signals. *IEEE Transactions on signal processing*, 2003, vol. 51, no. 4, pp. 1020–1033.

8. Verma C. & Tarar S. Secure random sequence based frequency hoping spread spectrum audio watermarking. *International Journal of Engineering Science*, 2016, vol. 6, no. 5, pp. 5026–5032.

9. Chen B. & Wornell G. W. Quantization index modulation: A class of provably good methods for digital watermarking and information embedding. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2001, vol. 47, no. 4, pp. 1423–1443.

10. Tian H., Liu J. & Li S. Improving security of quantization-index-modulation steganography in low bit-rate speech streams. *Multimedia systems*, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 143–154.

11. Yeo I. K. & Kim H. J. Modified patchwork algorithm: A novel audio watermarking scheme. *IEEE Transactions on speech and audio processing*, 2003, vol. 11, no. 4, pp. 381–386.

12. Xiang Y., Natgunanathan I., Guo S., Zhou W. & Nahavandi S. Patchwork-based audio watermarking method robust to de-synchronization attacks. *IEEE/ACM Transactions on Audio*, *Speech and Language Processing (TASLP)*, 2014, vol. 22, no. 9, pp. 1413–1423.

13. Wang F., Huang J., Chen X., Zhang G. & A. Men A. Simultaneous broadcasting of analog FM and digital signals by separating co-channel FM signals. *IEEE Communications Letters*, 2016, vol. 20, no. 11, pp. 2197–2200.

14. Lee H., Kim T. H., Choi J. W. & Choi S. Chirp signal-based aerial acoustic communication for smart devices. *IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, 2015, pp. 2407–2415.

15. Nandakumar R., Chintalapudi K. K., Padmanabhan V. & Venkatesan R. Dhwani: secure peer-to-peer acoustic NFC. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2013, vol. 43, no. 4, pp. 63–74.

16. Wang Q., Ren K., Zhou M., Lei T., Koutsonikolas D. & Su L. Messages behind the sound: real-time hidden acoustic signal capture with smartphones. *Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, *ACM*–2016, pp. 29–41.

17. Hanspach M. & Goetz M. On covert acoustical mesh networks in air. *Journal of Communications*, 2013, vol. 8, no. 11, pp. 758–767.

18. Gofman M. V. Metodika skrytoy peredachy dannykh pry svyazy cherez vozdushniy audiokanal [The method of hidden data transmission via aerial audio channel communication]. *Trudy SPIIRAN* [*Proceedings of St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences*], 2017, issue 51, pp. 97–122. (In Russian)

19. Gofman M. V., Kornyenko A. A., Mironchikov M. V. & Nikityn A. B. Tsifrovoye markirovaniye audiosignalov dlya robastnoy skrytoy akustycheskoy svyazy cherez vozdushniy audiokanal [Digital marking of audio signals for robust hidden acoustic communication via aerial audio channel]. *Trudy SPIIRAN* [*Proceedings of St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences*], 2017, issue 55, pp. 185–215. (In Russian)

*ГОФМАН Максим Викторович – канд. техн. наук, доцент, maxgof@gmail.com; КОРНИЕНКО Анатолий Адамович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой; МИРОНЧИКОВ Евгений Тимофеевич – д-р техн. наук, профессор (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 537.427.6

К. К. Ким, И. С. Полунин

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОГО РАЗГРУЗОЧНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПОЛУВАГОНОВ

Дата поступления: 17.10.2017
Решение о публикации: 08.11.2017

Аннотация

Цель: Показать влияние гремучего газа и олефиновых соединений на эффективность работы электрогидроимпульсного разгрузочного комплекса для полувагонов. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: добиться увеличения мощности деструктивной силы в канале разряда за счет использования водородно-углеродной смеси газа H_2O_2 в электропатроне; определить параметры гремучего газа и его влияние на гидродинамические процессы в жидкости; создать конструкцию электропатрона. **Методы:** Так как большинство российских угольных залежей размещены вдали от выходов к морю (расстояние до ближайших портов составляет примерно 3,6–4,6 тыс. км), то в данной обстановке угледобывающие компании вынуждены пользоваться услугами железнодорожного транспорта. Отсюда возникают трудности разгрузки смерзшихся грузов из железнодорожных полувагонов в зимний период времени. Данная проблема очень актуальна и в связи с этим предлагается для восстановления сыпучести грузов применять дополнительно энергию взрыва гремучего газа для повышения силовых характеристик электрического импульсного разряда в жидкости и как следствие эффективности процесса восстановления сыпучести грузов. **Результаты:** Приведена блок-схема электрических соединений разгрузочного комплекса, как вариант исполнения для такой системы, а также рассмотрено применение высокоэффективного средства (ингибиторы), позволяющего управлять горением и взрывом водородно-воздушной смеси. **Практическая значимость:** На основе полученных данных возможно произвести расчет содержания количества олефиновых соединений для определения верхнего и нижнего пределов распространения пламени, а также границ времени импульса тока в канале разряда для более точного использования олефиновых соединений. Результаты могут быть применены при моделировании или лабораторных испытаниях.

Ключевые слова: Разгрузочный комплекс, «гремучий» газ, вагоноопрокидыватель, эффективность, электропатрон, канал разряда.

Konstantin K. Kim, D. Eng. Sci., professor; *** Igor S. Polunin,** postgraduate student, polunin.ig@gmail.com (Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University) ON EFFICIENCY IMPROVEMENT OF ELECTRO-HYDROIMPULSIVE DISCHARGING COMPLEX FOR OPEN-BOX CARS

Summary

Objective: Since the majority of Russian coalfields are away from outlets to the sea (the distance to the nearest ports comprises about 3,6–4,6 th. km), coal-mining companies have to command the services of railway transport in the present situation. Therefore, difficulties of discharging frozen coal from railway open-box cars emerge in winter period. To show the influence of firedamp and olefinic compounds on the efficiency of electric hydro-impulsive discharging complex operation for open-box cars. In order to achieve the goal in question it is necessary to solve the following tasks: to try for destructive power augmentation in discharge channel by means of applying carbonic-hydrogen blend of H_2O_2 gas in the light socket; to determine the parameters of firedamp and its influence on hydrodynamic processes in fluid; to create the design of a light socket. **Methods:** The problem in question is quite topical and thus it is suggested to additionally apply firedamp explosion energy for gas looseness recovery to improve power characteristics of electric pulsed discharge in liquid and as a consequence the efficiency of goods

looseness recovery process. **Results:** Block-diagram of discharging complex electrical connections was presented, as an alternative of embodiment for such system, as well as application of highly-effective facilities (inhibitors) was examined, making it possible to control combustion and explosion of hydrogen-air mixture. **Practical importance:** On the basis of the obtained data it is possible to perform calculations on the content of olefinic compounds quantity in order to identify upper and lower limits of flame propagation, as well as the time limits of current impulse for more precise application of olefinic compounds. The results may be applied in modeling and laboratory tests.

Keywords: Discharging complex, firedamp, car dumper, efficiency, light socket, discharge channel.

Введение

От конструкции вагонов напрямую зависит сохранность грузов, эффективность и скорость перевозок, безопасность движения поездов, использование грузоподъемности и вместимости на максимум, обеспечение комплексной механизации погрузочно-разгрузочных работ и сокращение простоя вагонов под грузовыми операциями.

Выделяют следующие способы разгрузки полувагонов с углем с помощью: 1) ковшовых экскаваторов и грейферов; 2) разгрузочных люков; 3) элеваторных ковшов; 4) вагоноопрокидывателей.

Выбор типа технологии выгрузки угля определяется климатическими условиями региона, требуемой производительностью и конструктивными особенностями вагонов.

С наступлением первых заморозков в портах Российской Федерации обостряется проблема выгрузки смерзшихся грузов, подавляющим большинством которых является экспортный уголь. Перерабатывающая способность многих портов в зимний период снижается более чем в 2 раза.

На способе разгрузки вагоноопрокидывателя основан разгрузочный комплекс (RU 120633, B65G67/30, МПК B65G69/20) [1–5]. При разгрузке смерзшихся сыпучих грузов в зимнее время, например угля или щебня, в данном разгрузочном комплексе есть вероятность примерзания разгружаемого груза к стенкам полувагона, что, в свою очередь, ведет к возникновению аварийных ситуаций при перевороте полувагона в вагоноопрокидывателе. В связи с отмеченным недостатком существующий разгрузочный комплекс характеризуется низкой эффективностью.

Цель работы – показать влияние «гремучего» газа и олефиновых соединений на эффективность работы электрогидроимпульсного разгрузочного коплекса для полувагонов. Для ее достижения необходимо решить следующие задачи:

– добиться повышения мощности деструктивной силы в канале разряда за счет использования водородно-углеродной смеси газа H_2O_2 в электропатроне;

– определить параметры «гремучего» газа и его влияние на гидродинамические процессы в жидкости;

– создать конструкцию электропатрона.

Разгрузочный комплекс, основанный на способе разгрузки вагоноопрокидывателя, и его модернизация

Разгрузочный комплекс RU 120633 содержит боковой вагоноопрокидыватель (рис. 1), включающий в себя рамный мост с колоннами для ротора с приводами его вращения, накаты надвига и схода полувагонов, расположенные по обоим торцам бокового вагоноопрокидывателя, соединенного тягой с устройством для очистки путей от просыпи сыпучих материалов, и толкатель полувагонов.

Недостатком данного разгрузочного комплекса является небольшая разрушающая способность канала разряда, вызывающая некачественное разрыхление смерзшегося груза и аварийные ситуации, что ведет к низкой эффектив-

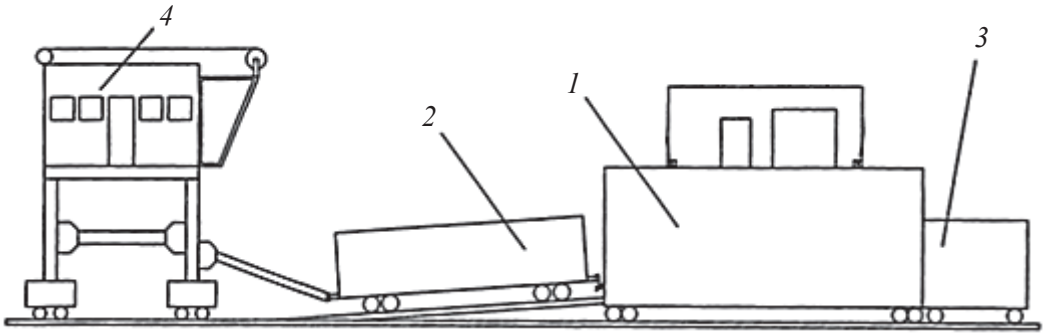


Рис. 1. Общая схема разгрузочного комплекса: *1* – вагоноопрокидыватель; *2* – полувагон; *3* – устройство для очистки путей от просыпи сыпучих материалов; *4* – толкатель полувагонов

ности такого комплекса. Поэтому было предложено следующее конструктивное решение.

Усовершенствованный разгрузочный комплекс дополнительно содержит (рис. 2) источник постоянного тока, ЭВМ, установленные на рамном мосту вагоноопрокидывателя. Электропатрон состоит из корпуса, в котором установлены электроды, датчика давления и детектора утечки водорода. Первый электрод электропатрона соединен с положительным выходом источника постоянного тока, второй электрод – с отрицательным выходом источника постоянного тока, датчик давления – с первым выходом ЭВМ, а детектор утечки водорода – со вторым выходом, вход ЭВМ предназначен для подключения к источнику переменного тока.

Параметры «гремучего» газа

Для того чтобы использовать «гремучий» газ – смесь 2 об.Н + 1 об.О, с пределами температурного воспламенения 560–570 °С, в предлагаемом методе были найдены опытные данные скорости «гремучего» газа [6–10]:

• скорость распространения взрывной волны для этой смеси равна 2810 м/с;

• скорость взрывных волн, подобно скорости звука, не зависит от начального давления;

• применение олефиновых соединений позволяет управлять горением и взрывом гремучей смеси. В качестве наиболее эффективных ингибиторов применительно к горению смесей водорода в воздухе предлагается использовать олефиновые соединения, например бутилен C_4H_8.

Принцип действия

В начальный момент времени от источника постоянного тока на первый электрод подается положительный потенциал, а на второй – отрицательный. В цепи начинает протекать ток, и на электроде с положительным потенциалом будет выделяться кислород, а на электроде с отрицательным потенциалом – водород. Иными словами, в электропатроне происходит электролиз воды, что приводит к образованию смеси газов водорода (H_2) и кислорода (O_2): $H_2O \rightarrow H_2 + 0{,}5O_2$.

Применение олефиновых соединений позволяет замедлить реакцию горения «гремучего» газа на необходимое время. Все зависит от процентного соотношения их во взрывчатой смеси. Практика показывает, что примеси олефинов в количестве даже нескольких процентов снижает верхний концентрационный предел распространения пламени, т. е. затрудняет раннее воспламенение «гремучего» газа [11–16].

Затем конденсаторная батарея разряжается через коммутатор на электропатрон, в котором инициируется искровой разряд (рис. 3). В результате искрового разряда распространяется

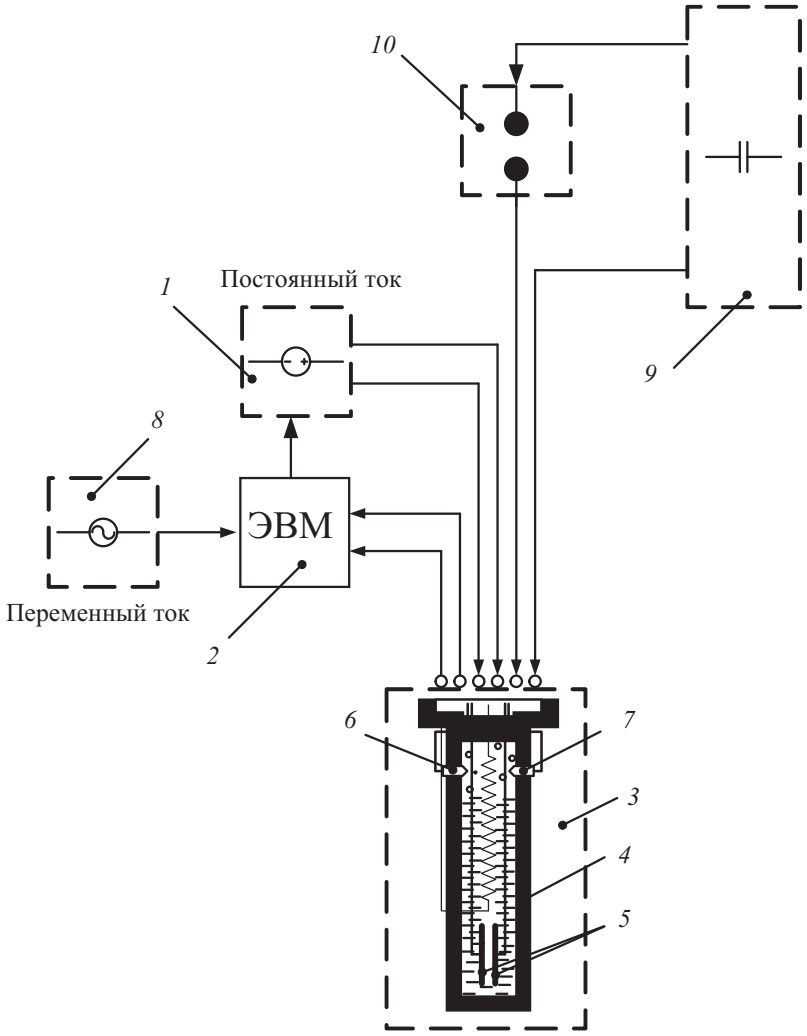


Рис. 2. Блок-схема электрических соединений разгрузочного комплекса:
1 – источник постоянного тока; *2* – ЭВМ; *3* – электропатрон; *4* – корпус электропатрона;
5 – электроды; *6* – датчик давления; *7* – датчик утечки водорода;
8 – источник переменного тока; *9* – конденсаторная батарея; *10* – коммутатор

ударная волна, вызванная как электрогидравлическим эффектом (эффектом Юткина), так и взрывом «гремучего» газа, который, благодаря олефиновым соединениям, воспламеняется в определенные границы времени стадии заднего фронта (*a*–*b*) порядка 30 мкс. Эта волна передается смерзшемуся грузу полувагона, разрушая и рыхля последний.

Заключение

Использование водородно-углеродной смеси газа H_2O_2 в электропатроне позволяет повысить разрушающую мощность электропатрона и, как следствие, эффективность разрушения смерзшегося груза разгрузочного комплекса № 120633. Таким образом, создается возможность снизить количество и мощность конденсаторных установок, что приведет к снижению материальных затрат и повысит КПД разгрузочного комплекса.

Для заметного торможения процесса требуются малые количества ингибиторов, при которых другие свойства реакционных смесей фактически не изменяются и не заслоняют эффект ингибирования как в режимах воспламенения и распространения пламени, так и в режиме детонации.

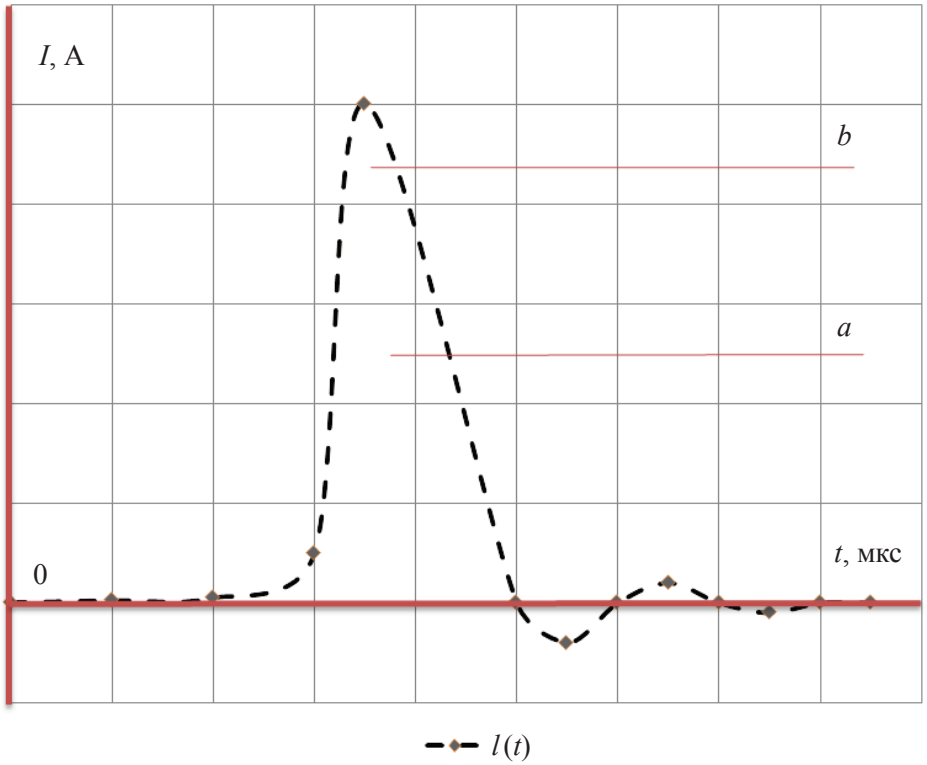


Рис. 3. График импульса тока в канале разряда

Ингибиторы коррозионно безопасны, не токсичны и недороги. Они успешно прошли тестовые испытания.

Библиографический список

1. Полезная модель «Разгрузочный комплекс» RU 120633, МПК B65G67/30, B65G69/20 : патент / К. К. Ким, М. А. Шпилев ; заявитель и патентообладатель Петерб. гос. ун-т путей сообщения. – Заявл. 05.05.2012 г. ; опубл. 27.09.2012 г. – Бюл. № 27.

2. Ким К. К. К вопросу об эффективной технологии разгрузки смерзшегося угля / К. К. Ким, М. А. Шпилев // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 1 (38). – С. 66–67.

3. Ким К. К. Рыхление смерзшегося угля электрогидравливческим методом / К. К. Ким, М. А. Шпилев // Мир транспорта. – 2013. – № 2. – С. 48–56.

4. Ким К. К. Анализ пространственно-временной структуры напряженного состояния смерзшегося угля при воздействии квазиточечных импульсных источников нагружения / К. К. Ким, М. А. Шпилев // Электроснабжение и электрооборудование транспорта. – 2013. – № 4. – С. 12–18.

5. Ким К. К. Электрогидроимпульсная установка для разрыхления смерзшегося угля / К. К. Ким, М. А. Шпилев // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2016. – Вып. 106. – С. 123–131.

6. Льюис Б. Горение, пламя и взрывы в газах. – 2-е изд. / Б. Льюис, Г. Эльбе ; пер. с англ. ; под ред. К. И. Щелкина, А. А. Борисова. – М. : Мир, 1968. – 592 с.

7. Глинка Н. Л. Общая химия / Н. Л. Глинка. – Л. : Химия, Ленингр. отд., 1985. –702 с.

8. Юткин Л. Я. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л. Я. Юткин. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд., 1986. – 253 с.

9. Семкин Б. В. Основы электроимпульсного разрушения материалов / Б. В. Семкин, А. Ф. Усов, В. И. Курец. – СПб. : Наука, 1993. – 276 с.

10. Поздеев В. А. Прикладная гидродинамика электрического разряда в жидкости / В. А. Поздеев. – Киев : Наукова думка, 1980. – 192 с.

11. Кондриков Б. Н. Взрывные превращения электрической энергии / Б. Н. Кондриков, А. И. Вовченко, В. Э. Анников, В. В. Иванов. – Киев : Наукова думка, 1987. – 128 с.

12. Наугольных К. А. Электрические разряды в воде / К. А. Наугольных, Н. А. Рой. – М. : Наука, 1971. – 154 с.

13. Вовк И. Т. Управление электрогидроимпульсными процессами / И. Т. Вовк, В. Б. Друмирецкий, Е. В. Кривицкий, Л. Е. Овчинникова. – Киев : Наукова думка, 1984. – 188 с.

14. Бум Ф. А. Физика взрыва / Ф. А. Бум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер. – М. : Гос. изд-во физ-мат. лит., 1959. – 800 с.

15. Арсентьев В. В. К теории импульсных разрядов в жидкой среде / В. В. Арсентьев // Журн. прикл. математики и теор. физики. – 1965. – № 5. – С. 51–57.

16. Сажин Б. С. Химическое подавление воспламенения и взрыва водородно-воздушной и метено-воздушной смесей / Б. С. Сажин, В. В. Козляков, Д. Л. Раков, В. Н. Саранцев // Успехи в химии и химической технологии. – 2011. – Т. XXXV, № 6 (122). – С. 112–115.

References

1. *Poleznaya model "Razgruzochniy kompleks" RU 120633*, *MPK B65G67/30*, *B65G69/20:* patent [*Utility model "Discharging complex" RU 120633*, *IPC B65G67/30*, *B65G69/*20]: patent / K. K. Kim, M. A. Shpilev; patent applicant and patent holder Petersburg State Transport University. – Appl. 05.05.2012; publ. 27.09.2012. – Bul. N 27. (In Russian)

2. Kim K. K. & Shpilev M. A. K voprosu ob effektivnoy tekhnologii razgruzky smerzshegosya uglya [On effective workable technology of discharging frozen coal]. *Transport of the Russian Federation*, 2012, no. 1 (38), pp. 66–67. (In Russian)

3. Kim K. K. & Shpilev M. A. Rykhleniye smerzshegosya uglya elektrogidravlycheskym metodom [Frozen coal ripping by means of electro-hydraulic method]. *Mir transporta* [*The world of transport*], 2013, no. 2, pp. 48–56. (In Russian)

4. Kim K. K. & Shpilev M. A. Analyz prostranstvenno-vremennoy struktury napryazhennogo sostoyaniya smerzshegosya uglya pry vozdeistvii kvazitochechnykh impulsnykh istochnikov nagruzheniya [The analysis of spatiotemporal structure of frozen coal stress condition under the influence of quasi-zero-dimensional impulsive energy sources of loading]. *Ekektrosnabzheniya i elektrooborudovaniya transporta* [*Electric power supply and transport electrical equipment*], 2013, no. 4, pp. 12–18. (In Russian)

5. Kim K. K. & Shpilev M. A. Elektrogidroimpulsnaya ustanovka dlya razrykhleniya smerzshegosya uglya [Electrical hydro-impulsive unit for ripping frozen coal]. *Vestnik Mosk. gos. tekh. un-ta im. N. E. Baumana* [*Proceedings of Bauman Moscow State Technical University. Mechanical engineering series*], 2016, issue 106, pp. 123–131. (In Russian)

6. Lewis B. & Elbe G. *Goreniye*, *plamya i vzryvy v gazakh.* 2-ye izd. [*Combustion*, *flames and explosions of gases.* 2nd ed.]. Tr. from Eng.; ed. by K. I. Shchelkin, A. A. Borisov. Moscow, Mir Publ., 1968, 592 p. (In Russian)

7. Glinka N. L. *Obshchaya khimiya* [*General chemistry*]. Leningrad, Chemistry, Leningr. sec., 1985, 702 p. (In Russian)

8. Yutkin L. Y. *Elektrogidravlycheskiy effect i yego primeneniye v promyshlennosty* [*Electrohydraulic effect and its application in industry*]. Leningrad, Mechanical engineering, Leningr. sec., 1986, 253 p. (In Russian)

9. Semkin B. V., Usov A. F. & Kurets V. I. *Osnovy elektroimpulsnogo razrusheniya materialov* [*The foundations of electro-impulsive rupture of materials*]. Saint Petersburg, Nauka Publ., 1993, 276 p. (In Russian)

10. Pozdeyev V. A. *Prikladnaya gidrodinamika elektricheskogo razryada v zhidkosty* [*Applied hydrodynamics of electrical discharge in fluid*]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1980, 192 p. (In Russian)

11. Kondrikov B. N., Vovchenko A. I., Annikov V. E. & Ivanov V. V. *Vzryvniye prevrashcheniya elektricheskoy energii* [*Explosive transformations of electric power*]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1987, 128 p. (In Russian)

12. Naugolnykh K. A. & Roy N. A. *Elektrycheskiye razryady v vode* [*Electrical discharges in water*]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 154 p. (In Russian)

13. Vovk I. T., Drumiretskiy V. B., Krivitskiy E. V. & Ovchinnikova L. Y. *Upravleniye elektrogidroimpulsnymy protsessamy* [*Electro-hydroimpulsive processes*

control]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1984, 188 p. (In Russian)

14. Bum F.A., Stanyukovich K.P. & Shekhter B.I. *Fizika vzryva* [*Physics of explosions*]. Moscow, Gos. izd-vo fiz-mat. lit. (State Publishing House of Literature on physics and mathematics) Publ., 1959, 800 p. (In Russian)

15. Arsentyev V.V. K teorii impulsnykh razryadov v zhydkoy srede [On the theory of impulsive discharges in liquid medium]. *Zhurn. prikl. matematiky i teor. fiziky* [*Journal of appl. mathematics and theor. physics*], 1965, no. 5, pp. 51–57. (In Russian)

16. Sazhyn B.S., Kozlyakov V.V., Rakov D.L. & Sarantsev V.N. Khimicheskoye podavleniye vosplameneiya i vzryva vodorodno-vozdushnoy i metano-vozdushnoy smesey [Chemical suppression of flaming and explosion of hydrogen-aerial and methane-aerial mixtures]. *Progress in chemistry and chemical engineering*, 2011, vol. XXXV, no. 6 (122), pp. 112–115. (In Russian)

КИМ Константин Константинович – д-р техн. наук, профессор; *ПОЛУНИН Игорь Сергеевич – аспирант, polunin.ig@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 69

З. А. Альдреби

МОНИТОРИНГ И ПАСПОРТИЗАЦИЯ НАИБОЛЕЕ ИЗВЕСТНЫХ ПАМЯТНИКОВ АРХИТЕКТУРЫ В СИРИИ

Дата поступления: 05.02.2018
Решение о публикации: 23.03.2018

Аннотация

Цель: Обследование и фиксирование состояния сейсмостойкости строительных конструкций памятников архитектуры в Сирии, которые подвергались различным воздействиям землетрясений в прошлом и военных действий в настоящем, чтобы иметь возможность усилить, реставрировать или восстанавливать их. **Методы:** Использовались в основном визуальный способ и методы неразрушающего контроля при обследовании строительных конструкций зданий и сооружений. Кроме того, эти памятники архитектуры находятся под защитой специализированного учреждения Организации Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры, что обязывает нас сохранить их по возможности в первоначальном виде. Были сфотографированы объекты и дополнительно использованы официальные доклады Генерального директората древностей и музеев Сирии. **Результаты:** Данные обследования состояния памятников архитектуры Сирии собраны в таблицы, в том числе описания повреждений строительных конструкций и указаны способы их устранения. **Практическая значимость:** Результаты проведенного обследования можно использовать для укрепления, реставрации или восстановления описываемых объектов, так как их необходимо сохранить для будущих поколений. В дальнейшем можно будет обобщать и распространять рассмотренные методы обследования и ремонта на другие похожие объекты не только в Сирии, но и в других странах, что существенно сэкономит материальные затраты.

Ключевые слова: Визуальный способ, мечеть, мусульманская архитектура, фортификационная архитектура, замок, строительные конструкции, землетрясение, военные действия, трещина, колонна, купол, портик, капитальный ремонт.

***Ziad A. Aldrebi**, postgraduate student, zialdd67@gmail.com (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) MONITORING AND CERTIFICATION OF THE MOST KNOWN MONUMENTS OF ARCHITECTURE IN SYRIA

Summary

Objective: Survey and fixing of engineering structures seismic stability of architectural monuments in Syria, which were subjected to various impacts of earthquakes in the past and military operations in the present in order to be able to strengthen or restore these architectural monuments. **Methods:** The visual

method and methods of non-destructive testing were mostly used in the survey of engineering structures of buildings and constructions. In addition, these architectural monuments are protected by the specialized agency of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, which obliges us to preserve their original form as far as possible. The objects were photographed and the official reports of the General Directorate of Antiquities and Museums of Syria were additionally used. **Results:** The results of the survey, summarized in tables, describe structural damage in buildings and ways of its elimination. **Practical importance:** The results of the survey can be used to strengthen or restore the described objects, since the latter need to be preserved for the future generations. In the sequel, it will be possible to generalize and distribute the examined inspection and repair methods to other similar facilities not only in Syria, but also in other countries, which will significantly save material costs.

Keywords: Visual method, mosque, muslim architecture, fortification architecture, castle, engineering structures, earthquake, hostilities, crack, column, dome, portico, major overhaul.

Введение

На территории современной Сирии существует большое количество памятников архитектуры, которые были построены в существовавших там различных государствах и цивилизациях. Некоторые из них сохранились до наших дней. Но землетрясения, прошедшие на территории Сирии, приводили к их повреждениям, а в некоторых случаях к полному разрушению. Ситуация осложнилась тем, что на территории Сирии велись и ведутся активные военные действия, влияющие на состояния этих объектов. При обследовании рассматриваемых зданий и сооружений применялись способы оценки состояния строительных конструкций: визуальный и неразрушающий контроль [1–10].

Выполнены обследование и паспортизация наиболее известных памятников архитектуры в Сирии, информация о которых приведена в специальных анкетных карточках (табл. 1–3) с использованием методик, представленных в работах [11–14].

Великая (Большая) Мечеть Омейядов в г. Алеппо

Мечеть является крупнейшим и старейшим мусульманским объектом культового значения в г. Алеппо. Она включена в список Всемирного наследия ЮНЕСКО (рис. 1, табл. 1).

Замок Крак де Шевалье в провинции Хомс

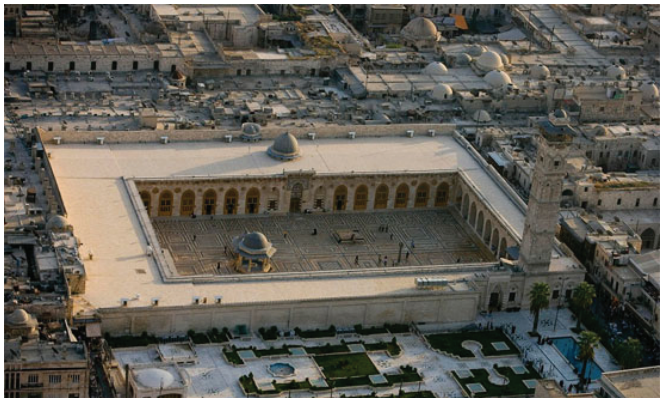
Замок был возведен на утесе на высоте около 600 м. Окружающая его стена была построена с утолщением внизу и дозорными башнями. За внешней стеной существуют двор и множество внутренних помещений. Замок включен в список Всемирного наследия ЮНЕСКО (рис. 2, табл. 2).

Мечеть аль-Адилия в г. Алеппо

В середине двора мечети расположен крытый куполом фонтан для омовения верующих. Также в мечети имеются крытые портики с колоннами и арками. Форма минарета мечети цилиндрическая, построен он в османском стиле и находится с западной стороны (рис. 3, табл. 3).

При анализе полученных данных обследования объектов использовалась классификация зданий по уязвимости, предложенной в шкале EMS-98 [12–14]. Было выявлено, что здания имеют различные повреждения в виде трещин в несущих и ненесущих конструкциях. Информация об основных повреждениях в конструкциях обследованных объектов была внесена в «Анкетные карточки». На их основе была выполнена оценка сейсмической уязвимости

а



б

Рис. 1. Великая(Большая) Мечеть Омейядов в г. Алеппо:
а – до войны; *б* – после войны

ТАБЛИЦА 1. Анкетная карточка результатов обследования

1	**Общие данные**
1.1	**Дата и время проведения обследования:** 2017 г.
1.2	**Наименование объекта:** Великая (Большая) Мечеть Омейядов
1.3	**Адрес:** Сирия, город Алеппо
1.4	**Год строительства:** VIII в.
1.5	**Архитектура:** Мусульманская
1.6	**План здания:** Прямоугольный с прямоугольным двором размерами 105×78 м
1.7	**Фотография здания:** Рис. 1
1.8	**Капитальный ремонт или реконструкция здания:** В XII и XX вв.
1.9	**Тип здания:** Каменное
1.10	**Тип грунтов:** Суглинок
1.11	**Тип фундамента:** Бутовый
1.12	**Крыша:** Плоская с одним куполом
2	**Заключение о состоянии здания:** В результате прошлых землетрясений имелись горизонтальные, вертикальные и крестообразные трещины в несущих и ненесущих конструкциях. В результате военных действий минарет полностью разрушен, обнаружено множество сколов, выбоин в наружных стенах**,** трещин различных размеров и направлений в колоннах, на фасадах, также следы от пожаров
3	**Необходимость выполнения ремонтных мероприятий, усиления или сноса:** Необходимы выполнение ремонтных и восстановительных мероприятий, а также усиление конструкций и колонн. Эти повреждения требуют срочного вмешательства

а *б*

Рис. 2. Замок Крак де Шевалье в провинции Хомс:
а – до войны; *б* – фасад рыцарского зала после войны

ТАБЛИЦА 2. Анкетная карточка результатов обследования

1	**Общие данные**
1.1	**Дата и время проведения обследования:** 2017 г.
1.2	**Наименование объекта:** Замок Крак де Шевалье
1.3	**Адрес:** Сирия, провинция Хомс
1.4	**Год строительства:** XI в.
1.5	**Архитектура:** Средневековая фортификационная архитектура
1.6	**План здания:** План замка имеет эллиптическую форму с двумя стенами в виде концентрических эллипсов с размерами примерно 230×160 м
1.7	**Фотография здания:** Рис. 2
1.8	**Капитальный ремонт или реконструкция здания:** В XII и XX вв.
1.9	**Тип здания:** Каменное
1.10	**Тип грунтов:** Суглинок
1.11	**Тип фундамента:** Бутовый
1.12	**Крыша:** Плоская
2	**Заключение о состоянии здания:** Имелись трещины в несущих и ненесущих конструкциях, повреждения в некоторых башнях в результате прошлых землетрясений. В результате военных действий частично поврежден рыцарский зал, наблюдаются разрушения на стенах с выпадением камней, множество сколов, выбоин, трещин различных размеров в колоннах и на фасаде, также следы от пожаров
3	**Необходимость выполнения ремонтных мероприятий, усиления или сноса:** Необходимы выполнение ремонтных мероприятий, усиление конструкций и колонн

а *б*

Рис. 3. Мечеть аль-Адилия в г. Алеппо:
а – до войны; *б* – после войны

ТАБЛИЦА 3. Анкетная карточка результатов обследования

1	**Общие данные**
1.1	**Дата и время проведения обследования:** 2017 г.
1.2	**Наименование объекта:** Мечеть аль-Адилия в г. Алеппо
1.3	**Адрес:** Сирия, город Алеппо
1.4	**Год строительства:** XVI в.
1.5	**Архитектура:** Османская мусульманская архитектура
1.6	**План здания:** Квадратный, длина его стороны 15,6 м, план двора мечети прямоугольный с двумя входами – западным и восточным
1.7	**Фотография здания:** Рис. 3
1.8	**Капитальный ремонт или реконструкция здания:** В XX в.
1.9	**Тип здания:** Каменное
1.10	**Тип грунтов:** Суглинок
1.11	**Тип фундамента:** Бутовый
1.12	**Крыша:** Плоская с куполами
2	**Заключение о состоянии здания:** В результате прошлых землетрясений имелись горизонтальные, вертикальные и крестообразные трещины. В результате военных действий частично разрушены фасад, портик и некоторые колонны. Поврежден крытый фонтан, обнаружено множество сколов, выбоин и трещины в несущих и ненесущих конструкциях, в колоннах и на фасаде
3	**Необходимость выполнения ремонтных мероприятий, усиления или сноса:** Необходимы выполнение ремонтных и восстановительных мероприятий, а также усиление конструкций и колонн

ТАБЛИЦА 4. Степени уязвимости конструкций архитектурных памятников в Сирии

Объект	Год постройки, век	Тип здания по конструктивному решению	Местонахождение	*Степень существующих повреждений	Степень повреждений от землетрясений			Степень повреждений в результате военных действий
					9 баллов	8 баллов	7 баллов	
Великая (Большая) Мечеть Омейядов	VIII	Каменное	г. Алеппо	d3	d3	d3	d2	d3
Замок Крак де Шевалье	XI		Провинция Хомс	d2	d3	d3	d2	d2
Мечеть аль-Адилия	XVI		г. Алеппо	d3	d3	d3	d2	d3

* Расшифровка степени повреждений [12, 14]:
- d1 – ничтожно малые или незначительные повреждения;
- d2 – умеренные повреждения;
- d3 – значительные или тяжелые повреждения;
- d4 – очень тяжелые повреждения;
- d5 – полное разрушение.

объектов при 7-, 8- и 9-балльных землетрясениях, она представлена в табл. 4. В районах с сейсмической активностью износ происходит быстрее, в результате чего жесткость зданий и сооружений уменьшается, тем самым увеличиваются периоды колебаний [12, 15–17].

Заключение

Выполненный анализ рассматриваемых объектов, наиболее характерных для арабского зодчества, показал, что один из объектов – замок Крак де Шевалье имеет степень повреждений при землетрясении от 7 до 9 баллов от d2 до d3, что соответствует умеренным и тяжелым повреждениям, в результате военных действий – d2.

Оценка степени повреждений строительных конструкций двух мечетей исламского зодчества (Великой мечети Омейядов и Мечети аль-Адилия), которые находятся в г. Алеппо, показал, что при землетрясениях от 7 до 9 баллов степень повреждений соответствует d2–d3, а при военных действиях – d3.

Эти результаты свидетельствуют о том, что характер повреждений меняется от умеренных до тяжелых.

На основании проведенного анализа рекомендуется:

• для замка Крак де Шевалье выполнить капитальный ремонт строительных конструкций и восстановить их несущую способность;

• в мечетях осуществить капитальный ремонт стеновых строительных конструкций, колонн, покрытия и восстановить их несущую способность, а кроме того воссоздать разрушенный минарет Великой мечети Омейядов в г. Алеппо.

Библиографический список

1. Всеобщая история архитектуры : в 12 т. / гл. ред. Н. В. Баранов ; Гос. ком. по гражданскому строительству и архитектуре при Госстрое СССР ; Науч.-исслед. ин-т теории и перспективных проблем советской архитектуры. –Т. 1 : Архитектура древнего мира / отв. ред. О. Х. Халпахчьян. – М. : Стройиздат, 1970.– 512 с.

2. Всеобщая история архитектуры : в 12 т. / гл. ред. Н. В. Баранов ; Гос. ком. по гражданскому строительству и архитектуре при Госстрое СССР ; Науч.-исслед. ин-т теории и перспективных проблем советской архитектуры. –Т. 2 : Архитектура античного мира (Греция и Рим) / отв. ред. В. Ф. Маркузон. – М. : Стройиздат, 1973. – 712 с.

3. Всеобщая история архитектуры : в 12 т. / гл. ред. А. В. Власов ; Гос. ком. по гражданскому строительству и архитектуре при Госстрое СССР ; Науч.-исслед. ин-т теории и перспективных проблем советской архитектуры. –Т. 8 : Архитектура стран Средиземноморья, Африки и Азии VI–XIX вв. / отв.ред. Ю. С. Яралов. – М. : Стройиздат, 1969.– 491 с.

4. Белаш Т. А. Анализ повреждений памятников архитектуры Сирии, полученных в результате землетрясений и военных действий / Т. А. Белаш, З. А. Альдреби // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2016. – № 5. – С. 58–63.

5. Омар Х. М. Механизмы землетрясений и напряженное состояние земной коры в Сирии / Х. М. Омар, Р. Э. Татевосян, Ю. Л. Ребецкий // Вестн. КРАУНЦ. – Науки о Земле. – 2012. – Вып. 20. – С. 139–148.

6. Трифонов В. Г. Неотектоника, современная геодинамика и сейсмическая опасность Сирии / В. Г. Трифонов, А. Е. Додонов, Д. М. Бачманов, Т. П. Иванова, А. С. Караханян. – М. : ГЕОС, 2012. – 216 с.

7. The General Directorate of Antiquities and Museum (DGAM). – URL : http://www.dgam.gov.sy (дата обращения : 22.07.2017).

8. Asor Cultural Heritage Initiatives. – URL : http://www.asor-syrianheritage.org (дата обращения : 18.07.2016).

9. Sbeinati M. R. The historical earthquakes of Syria : an analysis of large and moderate earthquakes from 1365 B. C. to 1900 A. D. / M. R. Sbeinati, R. Darawcheh, M. Mouty // Annals of Geophysics. – 2005. – Vol. 48, N 3. – P. 347–435.

10. Шуази О. История архитектуры : в 2 т. / О. Шуази ; пер. с фр. ; под ред. Н. И. Брунова ; общ.

ред. Ю. К. Милова, А. А. Сидорова. – М. : Изд-во Всесоюз. академии архитектуры, 1937. – Т. 2. – 692 с.

11. Бержинская Л. П. Анализ существующих методик паспортизации зданий в сейсмических районах / Л. П. Бержинская // Материалы Всерос. совещания «Современная геодинамика и сейсмичность Центральной Азии». – Иркутск : ИЗК СО РАН, 2005. – С. 309–312.

12. Сангинов А. М. Обследование состояния сейсмостойкости строительных конструкций зданий культурно-исторического наследия в Таджикистане / А. М. Сангинов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2017. – № 4. – С. 59–63.

13. Шебалин Н. В. Об оценке сейсмической интенсивности / Н. В. Шебалин // Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности / отв. ред. А. Г. Назаров. – М. : Наука, 1975. – С. 87–109.

14. Grünthal G. European Macroseismic Scale 1998 / ed. G. Grünthal. – Luxembourg : Cahiers du Centre Européen de Geodynamique et de Seismologie, 1998. – Vol. 15. – 99 p.

15. Alafandi R. Umayyad Mosque in Aleppo yesterday, today and tomorrow / R. Alafandi, A. A. Rahim // International Journal of Arts & Sciences. – 2014. – N 07 (05). – P. 319–347.

16. Саркисов Д. Ю. Сейсмостойкость зданий и сооружений. Курс лекций : учеб. пособие для студентов специальности 271101 «Строительство уникальных зданий и сооружений» / Д. Ю. Саркисов. – Томск : ТГАСУ, 2015. – 156 с.

17. Салганик М. П. Синтезированные акселерограммы для имитации сейсмических воздействий интенсивности 7, 8 и 9 баллов / М. П. Салганик, М. Е. Грошев, В. В. Штейнберг // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1987. – Вып. 28. – С. 174–184.

References

1. *Vseobshchaya istoriya arkhitektury* [*The general history of architecture*]. V 12 t./Gl. red. N. V. Baranov; Gos. kom. po grazhd. stroitelstvu i arkhitekture pry Gosstroye SSSR. Nauch-issled. In-t teorii i perspektyvnykh problem sovetskoy arkhitektury. T. 1: Arkhitektura drevnego mira/otv. red. O. K. Khalpakhchyan (In 12 vol./chief ed. N. V. Baranov; State committee in civil engineering and architecture under Gosstroi USSR. Research Institute of theory and perspective problems of the Soviet architecture. Vol. 1: Architecture of the Ancient World/responsible ed. O. H. Khalpakhchyan). Moscow, Stroiizdat Publ., 1970, 512 p. (In Russian)

2. *Vseobshchaya istoriya arkhitektury* [*The general history of architecture*]. V 12 t./Gl. red. N. V. Baranov; Gos. kom. po grazhd. stroitelstvu i arkhitekture pry Gosstroye SSSR. Nauch-issled. In-t teorii i perspektyvnykh problem sovetskoy arkhitektury. T. 2: Arkhitektura antichnogo mira (Gretsiya i Rim)/otv. red. V. F. Markuzon (In 12 vol./chief ed. N. V. Baranov; State committee in civil engineering and architecture under Gosstroi USSR. Research Institute of theory and perspective problems of the Soviet architecture. Vol. 2: Architecture of the Ancient World (Greece and Rome)/responsible ed. A. V. Markuzon. Moscow, Stroiizdat Publ., 1973, 712 p. (In Russian)

3. *Vseobshchaya istoriya arkhitektury* [*The general history of architecture*]. V 12 t./Gl. red. A. V. Vlasov; Gos. kom. po grazhd. stroitelstvu i arkhitekture pry Gosstroye SSSR. Nauch-issled. In-t teorii i perspektyvnykh problem sovetskoy arkhitektury. T. 8: Arkhitektura stran Sredizemnomorya, Afriky i Azii VI–XIX vv./otv. red. Y. S. Yaralov (In 12 vol./chief ed. A. V. Vlasov; State committee in civil engineering and architecture under Gosstroi USSR. Research Institute of theory and perspective problems of the Soviet architecture. Vol. 8: Architecture of the countries of the Mediterranean, Africa and Asia VI–XIX centuries/resp. ed. Y. S. Yaralov. Moscow, Stroiizdat Publ., 1969, 491 p. (In Russian)

4. Belash T. A., Aldrebi Z. A. Analyz povrezhdeniy pamyatnikov arkhitektury Sirii, poluchennykh v rezultate zemlyatryaseniy i voyennykh deistviy [The analysis of damage of architectural monuments of Syria, obtained as a result of earthquakes and military operations]. *Seismostoikoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy* [*Earthquake engineering. Constructions safety*], 2016, no. 5, pp. 58–63. (In Russian)

5. Omar H. M., Tatevosyan R. E., Rebetski Yu. L. Mekhanizmy zemlyatryaseniy i napryazhennoye sostoyaniye zemnoy kory v Sirii [Mechanisms of earthquakes and the stress state of the earth's crust in Syria]. *Vestnik KRAUNTs. Nauky o Zemle* [*Proceedings of KRAUNTs. Sciences about the Earth*], 2012, issue 20, pp.139–148. (In Russian)

6. Trifonov V.G., Dodonov A.E., Bachmanov D.M., Ivanova T.P., Karakhanyan A.S. *Neotektonika*, *sovremennaya geodynamika i seysmycheskaya opasnost Sirii* [*Neotectonics*, *modern geodynamics and seismic hazard of Syria*]. Moscow, GEOS Publ., 2012, 216 p. (In Russian)

7. *The General Directorate of Antiquities and Museum (DGAM)*. URL: http://www.dgam.gov.sy (accessed: 22.07.2017).

8. *Asor Cultural Heritage Initiativies*. URL: http://www.asor-syrianheritage.org/(accessed: 18.07.2016).

9. Sbeinati M.R., Darawcheh R. & Mouty M. The historical earthquakes of Syria: an analysis of large and moderate earthquakes from 1365 B.C. to 1900 A.D. *Annals of Geophysics*, 2005, vol. 48, no. 3, pp. 347–435.

10. Choisy Auguste. *Istoriya arkhitektury* [*The history of architecture*]. V 2 t. Per. s fr.; pod red. N.I. Brunova; obshch. red. Y.K. Milova, A.A. Sidorova, in 2 vol. Tr. from Fr.; ed. by N.I. Brunov; under the general ed. of Y.K. Milov, A.A. Sidorov. Moscow, Izd-vo Vsesoyz. akademii literatury [All-Union Academy of Architecture] Publ., 1937, vol. 2, 692 p. (In Russian)

11. Berzhinskaya L.P. Analyz sushchestvuyushchykh metodik pasportizatsii zdaniy v seismycheskykh raionakh [Analysis of the existing methods for certification of buildings in seismic regions]. *Materialy Vseros. soveshchaniya "Sovremennaya geodinamika i seismychnost Tsentralnoy Azii"* [*Materials of All-Russian session "Modern geodynamics and seismicity in Central Asia"*]. Irkutsk, IZK SO RAN (Institute of the Earth's Crust Siberian Branch Russian Academy of Sciences), 2005, pp. 309–312. (In Russian)

12. Sanginov A.M. Obsledovaniye sostoyaniya seismostoikosty stroitelnykh konstruktsiy zdaniy kulturno-istorichskogo naslediya v Tadzhykistane [Study of the seismic safety state of building structures for cultural and historic buildings in Tajikistan]. *Seismostoikoye stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy* [*Constructions safety. Earthquake engineering*], 2017, no. 4, pp. 59–63. (In Russian)

13. Shebalin N.V. Ob otsenke seismicheskoy intensivnosty [On estimation of seismic intensity]. *Seismycheskaya shkala i metody izmereniya seysmicheskoy intensivnosty* [*The seismic scale and methods of measurement of seismic intensity*]. Otv. red. A.G. Nazarov. Moscow, Nauka Publ., 1975, pp. 87–109. (In Russian)

14. Grünthal G. *European Macroseismic Scale 1998* / ed. G. Grünthal. Luxembourg, Cahiers du Centre Européen de Geodynamique et de Seismologie Publ., 1998, vol. 15, 99 p.

15. Alafandi R., Rahim A.A. Umayyad Mosque in Aleppo yesterday, today and tomorrow. *International Journal of Arts & Sciences*, 2014, no. 07 (05), pp. 319–347.

16. Sarkisov D.Y. *Seismostoikost zdaniy i sooruzheniy* [*Seismic stability of buildings and structures*]. Kurs lektsiy: uchebnoye posobiye dlya studentov spetsialnosty 271101 "Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy" [Course of lectures: a textbook for students of specialty 271101 "Construction of unique buildings and structures"]. Tomsk, TSUAB Publ., 2015, 156 p. (In Russian)

17. Salganik M.P., Groshev M.E. & Shteinberg V.V. Sintezyrovanniye akselerogrammy dlya imitatsii seismycheskykh vozdeistviy intensivnosty 7, 8 i 9 ballov [Synthesized accelerograms for simulating seismic effects of intensity 7, 8 and 9 points]. *Voprosy inzhenernoy seismologii* [*Issues of engineering seismology*], 1987, vol. 28, pp. 174–184. (In Russian)

АЛЬДРЕБИ Зиад Ахмад – аспирант, zialdd67@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 681.518.5:004.052.32

Д. В. Ефанов, А. М. Костроминов, А. Д. Манаков, А. В. Макшанов, В. А. Шаров

МОДУЛЬНО–МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ВЗВЕШЕННЫЕ КОДЫ С СУММИРОВАНИЕМ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПО ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ТЕСТОВЫХ КОМБИНАЦИОННЫХ СХЕМ

Дата поступления: 01.02.2018
Решение о публикации: 16.04.2018

Аннотация

Цель: Исследование особенностей влияния выбора модуля при формировании модульно-взвешенного кода с суммированием на структурную избыточность систем функционального контроля логических схем автоматики. **Методы:** Применяются методы теории информации и кодирования, теории дискретных устройств и технической диагностики дискретных систем. **Результаты:** Проанализированы характеристики структурной избыточности систем функционального контроля, построенных на основе модульно-модифицированных кодов с суммированием взвешенных информационных разрядов с последовательностью весовых коэффициентов, образующей натуральный ряд чисел. В эксперименте с набором тестовых комбинационных схем MCNC Benchmarks показано, что использование представленных кодов позволяет организовывать системы функционального контроля, обладающие меньшей структурной избыточностью, чем классическая система дублирования. **Практическая значимость:** Полученные результаты наряду с данными известных работ в этой области позволяют судить о перспективах применения модульно-модифицированных взвешенных кодов с суммированием при решении задач построения контролепригодных дискретных систем.

Ключевые слова: Техническая диагностика, система функционального контроля, код Бергера, модульно-модифицированный взвешенный код с суммированием, структурная избыточность.

***Dmitriy V. Efanov**, D. Eng. Sci., associate professor, TrES-4b@yandex.ru (Russian University of Transport (MIIT)); **Aleksandr M. Kostrominov**, D. Eng. Sci., professor, triak@mail.wplus.net; **Aleksandr D. Manakov**, D. Eng. Sci., associate professor, manakoff_2@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University); **Andrey V. Makshanov**, D. Eng. Sci., professor, andrey.makshanov@mail.ru (Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping); **Victor A. Sharov**, D. Eng. Sci., professor, vasharov_miit@mail.ru (Russian University of Transport (MIIT)) MODIFIED MODULUS WEIGHT-BASED SUM CODES IN EXPERIMENT ON ORGANIZATION OF CONCURRENT ERROR DETECTION SYSTEMS OF COMBINATIONAL BENCHMARKS

Summary

Objective: To study the specificities of the effect of unit selection when building modulus weight-based sum codes on structural redundancy of concurrent error detection systems of logical circuits of automatics. **Methods:** The methods of the theory of informatics and coding, the theory of discrete devices and engineering diagnostics of discrete systems were applied. **Results:** Characteristics of structural redundancy of concurrent error detection systems were analyzed, built on the basis of modified modulus codes with summation of weight-based data bits with weight coefficients, generating the sequence of natural numbers. In the experiment with a set of combinational benchmarks MCNC Benchmarks it was shown that the use of presented codes makes it possible to organize concurrent error detection systems, possessing lower structural redundancy than a classical duplication system**. Practical importance**: The obtained results alongside with data of the known studies in this sphere make it possible to consider the prospects of modified modulus weight-based sum codes application when solving the tasks of building testable discrete systems.

Keywords: Engineering diagnostics, concurrent error detection system, Berger code, modified modulus weight-based sum code, structural redundancy.

Важную роль как на транспорте, так и в промышленности играют системы автоматического управления и контроля. Именно они позволяют реализовывать технологические алгоритмы с соблюдением всех условий безопасности [1].

При разработке и конструировании надежных и безопасных систем управления используются разнообразные методы: резервирование программных и аппаратных средств, применение схем с самоконтролем и самопроверяемых реализаций, методов периодического и непрерывного мониторинга технического состояния отдельных блоков и компонентов [2–4]. Одним из действенных мероприятий по обеспечению надежности технических объектов на аппаратном уровне является наделение их свойством обнаружения неисправностей путем снабжения самопроверяемыми схемами встроенного контроля (другими словами, создание систем функционального контроля [5, 6]).

Рассмотрим особенности систем функционального контроля, реализованных на основе метода вычисления контрольных разрядов. Данный метод предполагает при синтезе системы функционального контроля использование какого-либо помехоустойчивого блочного равномерного кода [7–15]. К распространенным классам таких кодов относятся коды с суммированием, или (m,k)-коды (m и k – значения длин информационного и контрольного векторов). За счет простых процедур кодирования и приемлемых характеристик обнаружения ошибок в информационных векторах (m,k)-коды дают возможность построения систем функционального контроля с низкими аппаратурными затратами (структурной избыточностью) и высокой степенью достоверности результата диагностирования.

Системы функционального контроля логических схем

Структурная схема системы функционального контроля на основе (m,k)-кодов изображена на рис. 1. В ней объектом диагностирования является блок $F(x)$, реализующий ряд булевых функций $f_1, f_2, \ldots, f_m$. Технические средства диагностирования (схема контроля) включают в себя блок контрольной логики $G(x)$ и самопроверяемый тестер, образованный генерато-

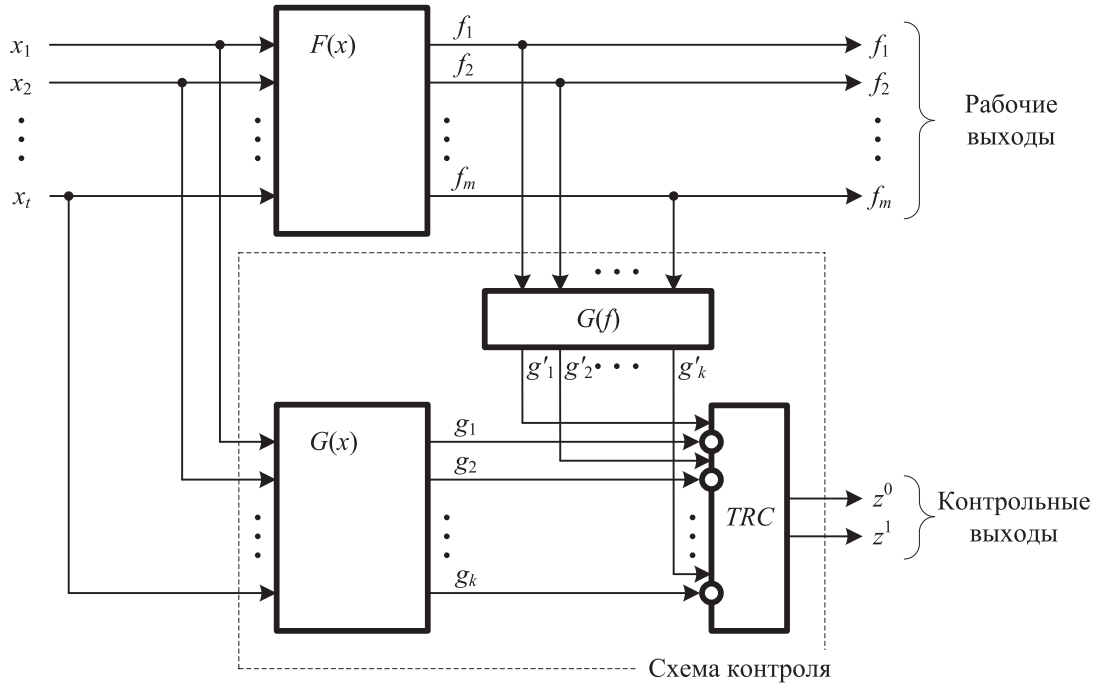


Рис. 1. Структурная схема системы функционального контроля

ром контрольных разрядов $G(f)$ и компаратором *TRC*. Блок $G(x)$ формирует контрольные функции $g_1, g_2, \ldots, g_k$ по значениям входных воздействий системы функционального контроля. Блок $G(f)$ формирует альтернативные контрольные функции $g'_1, g'_2, \ldots, g'_k$, вычисленные по значениям выходных функций объекта диагностирования. Компаратор же сравнивает одноименные функции, вырабатывая при этом сигнал контроля $<z^0\ z^1>$.

Компаратор является «последним сторожем» в системе функционального контроля и реализуется в виде самопроверяемой схемы сжатия парафазных сигналов [16]. По этой причине входные воздействия от одного из блоков, например $G(x)$, предварительно инвертируются. Это позволяет контролировать возникающие в системе функционального контроля неисправности по проявлениям их в форме искажений входных сигналов компаратора. При наличии неисправности в одном из блоков системы функционального контроля на контрольных выходах формируется непарафазный сигнал <00> либо <11>. Особенности конкретной реализации схемы контроля зависят от того, какой (m,k)-код лежит в основе системы диагностирования, от выбранной элементной базы и способа технической реализации схем.

В работах [17–21] показано, что применение классических кодов с суммированием и их модификаций оправдано не только с точки зрения накладных расходов и структурной избыточности систем функционального контроля, но и с позиции обнаружения ошибок в объекте диагностирования. Большое количество работ, например [22, 23], посвящено вопросам улучшения тех или иных свойств классических кодов с суммированием (кодов Бергера [24]) по обнаружению ошибок в информационных векторах. В библиографии работы [7] приведен расширенный список ссылок на другие модифицированные равномерные блочные коды.

Следует отметить, что одним из перспективных способов модификации является взвешивание разрядов информационных векторов с последующими процедурами вычисления наименьших неотрицательных вычетов сумм весовых коэффициентов единичных информационных разрядов и формирования поправочных коэффициентов [25–27]. Данная работа посвящена исследованию влияния выбора модуля при построении модифицированного взвешенного кода с суммированием на показатели структурной избыточности систем функционального контроля.

Модульно-модифицированные взвешенные коды

Модульно-модифицированные взвешенные коды с суммированием строятся по следующим правилам:

1) разрядам информационного вектора приписываются весовые коэффициенты из натурального ряда чисел, начиная с младшего разряда;

2) выбирается и фиксируется величина модуля $M \in \{2;\ 4;\ 8;\ \ldots\ ;\ 2^{\lceil \log_2(m+1)\rceil-1}\}$;

3) рассчитывается сумма весовых коэффициентов единичных информационных разрядов – число $V = \sum_{i=1}^{m} w_i f_i$, где w_i – весовой коэффициент i-го разряда, f_i – значение i-го разряда;

4) определяется наименьший неотрицательный вычет числа V по модулю M – число $V(\mathrm{mod}\, M)$;

5) вычисляется поправочный коэффициент α, равный сумме по модулю два (*XOR*) значений разрядов, занимающих четные позиции в информационном векторе: $\alpha = f_2 \oplus f_4 \oplus \ldots \oplus f_m$, если m – четное число, и $\alpha = f_2 \oplus f_4 \oplus \ldots \oplus f_{m-1}$, если m – нечетное число;

6) формируется число $W = \alpha M + V(\mathrm{mod}\, M)$;

7) число W представляется в двоичном виде и записывается в разряды контрольного вектора.

Введем обозначение для представленных кодов – *RWSM*(m,k)-коды, для которых модуль определяется величиной $M = 2^{\lceil \log_2(m+1)\rceil-1}$, по избыточности соответствуют классическим кодам Бергера. Выделим такой частный слу-

чай модульно-модифицированных взвешенных кодов в отдельный класс – *RWS*(*m*,*k*)-коды [28].

На рис. 2 приведена классификация модульно-модифицированных взвешенных кодов с суммированием.

Результаты экспериментов с системой тестовых комбинационных схем

Известно [28], что *RWS*(*m*,*k*)- и *RWSM*(*m*,*k*)-коды обладают улучшенными характеристиками обнаружения ошибок в информационных векторах по сравнению с классическими и модульными кодами с суммированием. Возникает вопрос практической направленности: насколько эффективным может оказаться приложение данных кодов в системах функционального контроля с точки зрения структурной избыточности?

Для решения поставленной задачи был проведен ряд экспериментов с системой тестовых комбинационных схем MCNC Benchmarks [29]. В ходе эксперимента для отобранных тестовых комбинационных схем осуществлялась реализация систем функционального контроля по *RWS*(*m*,*k*)-, *RWS*8(*m*,*k*)-, *RWS*4(*m*,*k*)- и *RWS*2(*m*,*k*)-кодам с последующей оценкой параметра сложности технической реализации. Для каждой тестовой схемы с использованием программного комплекса расчета характеристик разделимых кодов, разработанного при участии авторов, были получены файлы-описания всех блоков системы функционального контроля (см. рис. 1) в формате *.pla. Затем с помощью известного интерпретатора SIS [30] и библиотеки функциональных элементов stdcell2_2.genlib были определены условные показатели площади систем функционального контроля, занимаемые ими на кристалле (в условных единицах библиотеки). Кроме того, для каждой тестовой схемы была вычислена площадь системы дублирования.

Полученные в ходе экспериментов данные приведены в табл. 1–4 для систем функционального контроля, реализованных по *RWS*(*m*,*k*)-, *RWS*8(*m*,*k*)-, *RWS*4(*m*,*k*)- и *RWS*2(*m*,*k*)-кодам. В столбцах *CED* (concurrent error-detection system) каждой таблицы записаны данные по площадям систем функционального контроля, реализованных по классической структурной схеме (см. рис. 1); в столбцах *CED*-μ – для систем функционального контроля, в которых блоки основной и контрольной логики реализованы совместно путем объединения их выходов и последующей оптимизации структуры средствами SIS. В столбцах δ и χ рассчитаны показатели структурной избыточности систем функционального контроля: доля площади, занимаемой системой функционального контроля на основе (*m*,*k*)-кода, от площади системы дублирования при раздельной реализации блоков основной и контрольной логики (δ) и совместной (χ).

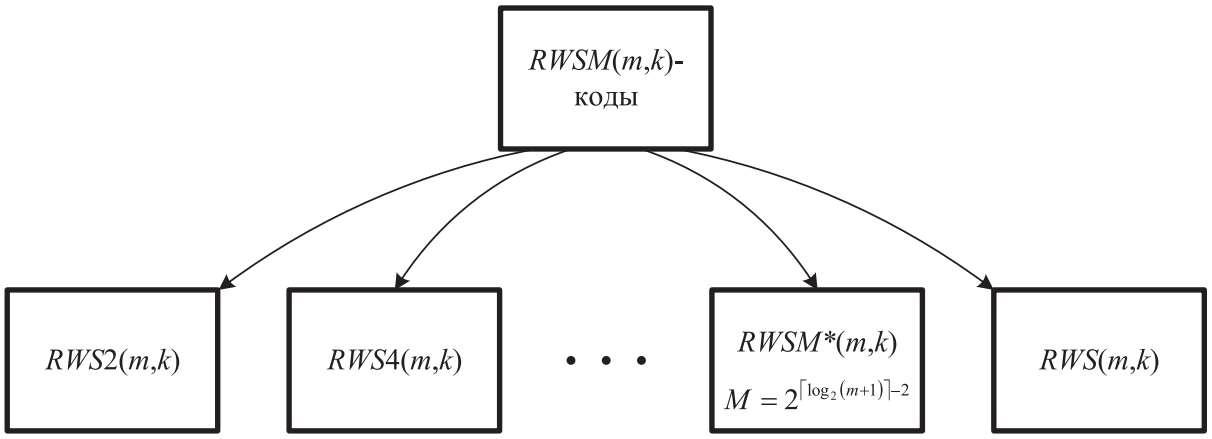


Рис. 2. Классификация модульно-модифицированных взвешенных кодов с суммированием

ТАБЛИЦА 1. Показатели сложности технической реализации систем функционального контроля на основе *RWS*(*m*,*k*)-кодов

№	Контрольная схема	Число входов	Число выходов	Площадь контрольной схемы, усл. ед.	Показатели сложности технической реализации систем функционального контроля				
					Дублирование	*CED*	*CED*-μ	δ,%	χ,%
1	newtpla2	10	4	840	2320	1960	1520	84,483	65,517
2	dist	8	5	6968	14784	13176	11496	89,123	77,76
3	newcwp	4	5	440	1728	1360	944	78,704	54,63
4	root	8	5	3496	7840	6552	5104	83,571	65,102
5	max512	9	6	9632	20320	17000	14392	83,661	70,827
6	max1024	10	6	17816	36688	31464	28608	85,761	77,976
7	dc1	4	7	976	3216	2680	1360	83,333	42,289
8	dekoder	4	7	736	2736	2520	1232	92,105	45,029
9	wim	4	7	712	2688	2432	1200	90,476	44,643
10	br1	12	8	3608	8688	7984	5872	91,897	67,587
11	br2	12	8	2952	7376	7072	4808	95,879	65,184
12	mlp4	8	8	7224	15920	17400	13464	109,296	84,573
13	t3	12	8	1768	5008	5704	3560	113,898	71,086
14	inc	7	9	2376	6432	7840	3776	121,891	58,706
15	ex1010	10	10	43296	88480	85032	80704	96,103	91,212
16	b10	15	11	9168	20432	21008	14584	102,819	71,378
17	gary	15	11	10688	23472	24448	17216	104,158	73,347
18	in0	15	11	10704	23504	24464	17216	104,084	73,247
19	m1	6	12	3064	8432	9856	2592	116,888	30,74
20	m2	8	16	10096	23328	33304	7952	142,764	34,088
21	m3	8	16	13464	30064	37240	7824	123,869	26,024
22	m4	8	16	18704	40544	44832	13800	110,576	34,037
23	tms	8	16	6784	16704	29424	7384	176,149	44,205
24	b2	16	17	40952	85248	77576	33744	91	39,583
25	in1	16	17	40952	85248	77576	33744	91	39,583
Средние значения								102,54	57,934

Анализ показателей δ и χ позволяет охарактеризовать системы функционального контроля, реализованные по модульно-модифицированным взвешенным кодам с суммированием.

Прежде всего следует отметить, что для большинства тестовых комбинационных схем доля площади, занимаемой системой на кристалле, от площади системы дублирования при контроле на основе *RWS*(*m*,*k*)-кода лежит

ТАБЛИЦА 2. Показатели сложности технической реализации систем функционального контроля на основе *RWS*8(*m*,*k*)-кодов

№	Контрольная схема	Число входов	Число выходов	Площадь контрольной схемы, усл. ед.	Показатели сложности технической реализации систем функционального контроля				
					Дублирование	*CED*	*CED*-μ	δ,%	χ,%
1	m2	8	16	10096	23328	21736	7384	93,176	31,653
2	m3	8	16	13464	30064	25560	7280	85,019	24,215
3	m4	8	16	18704	40544	32488	12352	80,13	30,466
4	tms	8	16	6784	16704	17992	6752	107,711	40,421
5	b2	16	17	40952	85248	58328	32400	68,422	38,007
6	in1	16	17	40952	85248	58328	32400	68,422	38,007
Средние значения								83,813	33,795

ТАБЛИЦА 3. Показатели сложности технической реализации систем функционального контроля на основе *RWS*4(*m*,*k*)-кодов

№	Контрольная схема	Число входов	Число выходов	Площадь контрольной схемы, усл. ед.	Показатели сложности технической реализации систем функционального контроля				
					Дублирование	*CED*	*CED*-μ	δ,%	χ,%
1	br1	12	8	3608	8688	6264	3240	72,099	37,293
2	br2	12	8	2952	7376	5320	4312	72,126	58,46
3	mlp4	8	8	7224	15920	13696	11040	86,03	69,347
4	t3	12	8	1768	5008	3952	3200	78,914	63,898
5	inc	7	9	2376	6432	5344	3392	83,085	52,736
6	ex1010	10	10	43296	88480	72384	71888	81,808	81,248
7	b10	15	11	9168	20432	16400	12928	80,266	63,273
8	gary	15	11	10688	23472	19528	15248	83,197	64,963
9	in0	15	11	10704	23504	19544	15248	83,152	64,874
10	m1	6	12	3064	8432	6440	2312	76,376	27,419
11	m2	8	16	10096	23328	15056	6232	64,54	26,715
12	m3	8	16	13464	30064	18848	6752	62,693	22,459
13	m4	8	16	18704	40544	25408	11392	62,668	28,098
14	tms	8	16	6784	16704	11144	6016	66,715	36,015
15	b2	16	17	40952	85248	51512	31232	60,426	36,637
16	in1	16	17	40952	85248	51512	31232	60,426	36,637
Средние значения								73,408	48,13

ТАБЛИЦА 4. Показатели сложности технической реализации систем функционального контроля на основе *RWS*2(*m*,*k*)-кодов

№	Контрольная схема	Число входов	Число выходов	Площадь контрольной схемы, усл. ед.	Показатели сложности технической реализации систем функционального контроля				
					Дублирование	*CED*	*CED*-μ	δ, %	χ, %
1	newtpla2	10	4	840	2320	1512	1224	65,172	52,759
2	dist	8	5	6968	14784	11072	9304	74,892	62,933
3	newcwp	4	5	440	1728	912	640	52,778	37,037
4	root	8	5	3496	7840	5536	4336	70,612	55,306
5	max512	9	6	9632	20320	14448	11992	71,102	59,016
6	max1024	10	6	17816	36688	26640	24080	72,612	65,635
7	dc1	4	7	976	3216	1720	1128	53,483	35,075
8	dekoder	4	7	736	2736	1488	808	54,386	29,532
9	wim	4	7	712	2688	1392	832	51,786	30,952
10	br1	12	8	3608	8688	5032	2744	57,919	31,584
11	br2	12	8	2952	7376	4384	2168	59,436	29,393
12	mlp4	8	8	7224	15920	11072	8912	69,548	55,98
13	t3	12	8	1768	5008	2888	2744	57,668	54,792
14	inc	7	9	2376	6432	3864	2752	60,075	42,786
15	ex1010	10	10	43296	88480	62280	63088	70,389	71,302
16	b10	15	11	9168	20432	13104	10904	64,135	53,367
17	gary	15	11	10688	23472	15800	12960	67,314	55,215
18	in0	15	11	10704	23504	15816	12960	67,291	55,14
19	m1	6	12	3064	8432	4264	1912	50,569	22,676
20	m2	8	16	10096	23328	12360	5000	52,984	21,433
21	m3	8	16	13464	30064	16096	6088	53,539	20,25
22	m4	8	16	18704	40544	22256	10488	54,893	25,868
23	tms	8	16	6784	16704	8552	5512	51,197	32,998
24	b2	16	17	40952	85248	46984	29176	55,114	34,225
25	in1	16	17	40952	85248	46984	29176	55,114	34,225
Средние значения								60,56	42,779

в диапазоне 80–95 %. Применение *RWSM*(*m*,*k*)-кодов взамен *RWS*(*m*,*k*)-кодов позволяет уменьшить данный показатель. Например, для *RWS*8(*m*,*k*)-кода для некоторых комбинационных схем получены значения δ < 70 %, для *RWS*4(*m*,*k*)-кода – δ < 65 % и для *RWS*2(*m*,*k*)-кода – δ < 55 %. На рис. 3 приводятся в графической форме данные по показателю δ для систем функционального контроля тестовых комбинационных схем, реализованных на

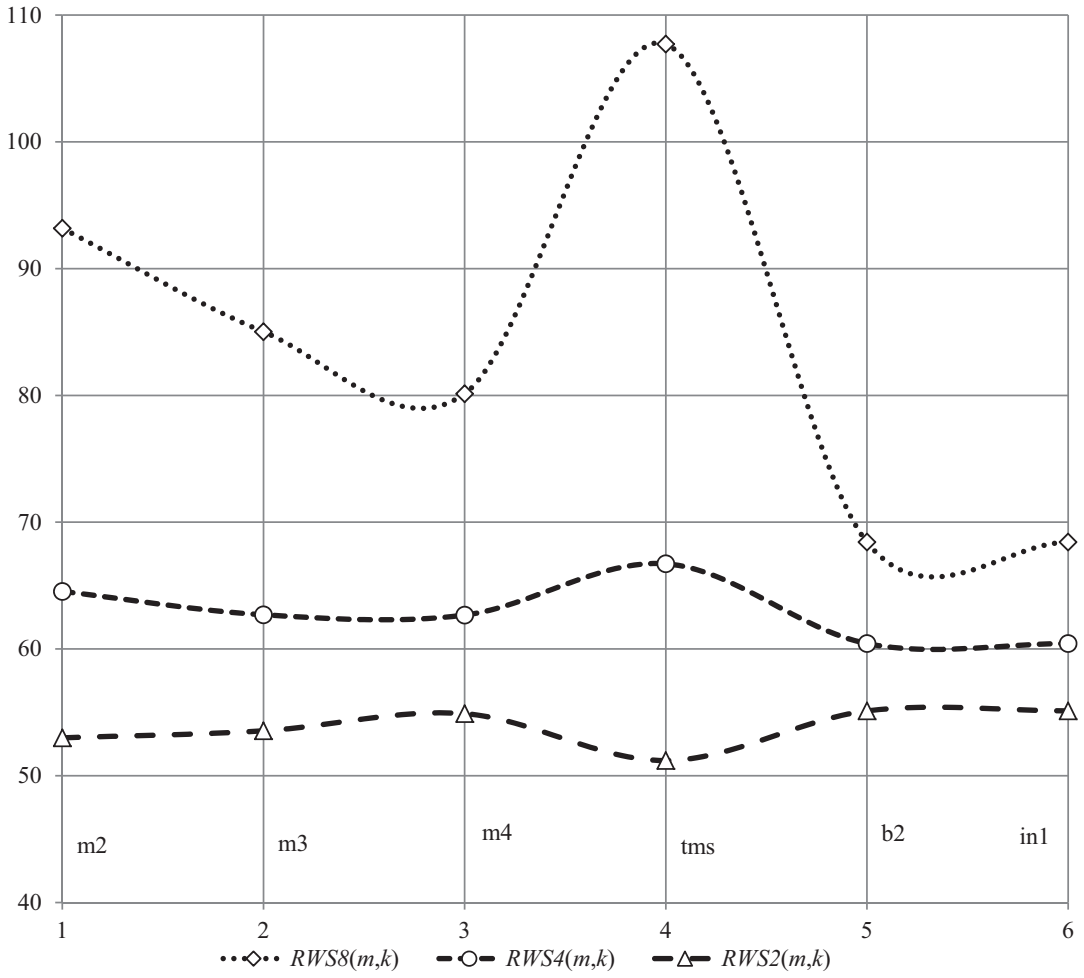


Рис. 3. Значение показателя δ для *RWSM*(*m*,*k*)-кодов с различными значениями *M*

основе *RWSM*(*m*,*k*)-кодов. Они наглядно демонстрируют эффект уменьшения площади при понижении модуля.

Полученные данные, вообще, свидетельствуют о том, что достигается уменьшение площади, сравнимое со значением для классического кода паритета [31]. Анализ показателя χ говорит о еще большем понижении структурной избыточности системы функционального контроля по сравнению с системой с раздельной реализацией блоков основной и контрольной логики.

Заключение

В ходе экспериментов установлено, что использование *RWS*(*m*,*k*)- и *RWSM*(*m*,*k*)-кодов при организации систем функционального контроля позволяет получать структуры с меньшей избыточностью, чем при применении классической системы дублирования. Установлены следующие средние значения показателя δ: для *RWS*(*m*,*k*)-кода – 102,54 %, для *RWS*8(*m*,*k*)-кода – 83,813 %, для *RWS*8(*m*,*k*)-кода – 73,408 % и для *RWS*2(*m*,*k*)-кода – 60,56 %. Следует пояснить полученный результат для *RWS*(*m*,*k*)-кода: примерно для 60 % тестовых схем показатель δ < 100 %, однако в выборке присутствуют «неудобные» для заданного кода тестовые схемы, дающие сложные по реализации структуры, например схемы «m2» и «tms». Этот эффект наблюдается и при использовании для контроля схемы «tms» *RWS*8(*m*,*k*)-кода. С каждым уменьшением модуля в 2 раза площадь систем функционального контроля тестовых

комбинационных схем уменьшается примерно на 10%.

Результаты работы могут быть учтены при решении задач организации систем функционального контроля комбинационных логических схем автоматики и вычислительной техники. При этом в совокупности могут анализироваться такие важные показатели дискретных устройств как структурная избыточность и обнаруживающая способность. Однако они зависят не только от выбранной структуры реализации системы функционального контроля и разделимого кода, но и от используемой функциональной базы (от схем низкой степени интеграции до схем с высокой и сверхвысокой степенями интеграции элементов).

Библиографический список

1. Гавзов Д. В. Методы обеспечения безопасности дискретных систем / Д. В. Гавзов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 8. – С. 3–50.

2. Согомонян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян, Е. В. Слабаков. – М. : Радио и связь, 1989. – 208 с.

3. Сапожников В. В. Самопроверяемые дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.

4. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : монография / Д. В. Ефанов. – СПб. : ПГУПС, 2016. – 171 с.

5. Nicolaidis M. On-Line testing for VLSI–A compendium of approaches / M. Nicolaidis, Y. Zorian // Journal of Electronic Testing : Theory and Applications. – 1998. – N 12. – P. 7–20. DOI: 10.1023/A:1008244815697

6. Mitra S. Which concurrent error detection scheme to choose? / S. Mitra, E. J. McCluskey // Proceedings of International Test Conference. New Jersey, USA, Atlantic City. – 3–5 October 2000. – P. 985–994. DOI: 10.1109/TEST.2000.894311

7. Piestrak S. J. Design of self-testing checkers for unidirectional error detecting codes / S. J. Piestrak. – Wrocław : Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. – 111 p.

8. Pradhan D. K. Fault-tolerant computer system design / D. K. Pradhan. – New York : Prentice Hall, 1996. – 560 p.

9. Matrosova A. Yu. Self-checking synchronous FSM network design with low overhead / A. Yu. Matrosova, I. Levin, S. A. Ostanin // VLSI Design. – 2000. – Vol. 11, issue 1. – P. 47–58. DOI: 10.1155/2000/46578

10. Das D. Low cost concurrent error detection based on Modulo Weight-Based codes / D. Das, N. A. Touba, M. Seuring, M. Gossel // Proceedings of IEEE 6th International On-Line Testing Workshop (IOLTW). – Spain, Palma de Mallorca, July 3–5, 2000. – P. 171–176.

11. Fujiwara E. Code design for dependable systems : Theory and practical applications / E. Fujiwara. – London et all. : John Wiley & Sons, 2006. – 720 p.

12. Göessel M. New methods of concurrent checking : Edition 1 / M. Göessel, V. Ocheretny, E. Sogomonyan, D. Marienfeld. – Dordrecht : Springer Science+ Business Media B. V., 2008. – 184 p.

13. Сапожников В. В. Взвешенные коды с суммированием для организации контроля логических устройств / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Электронное моделирование. – 2014. – Т. 36, № 1. – С. 59–80.

14. Пивоваров Д. В. Организация систем функционального контроля комбинационных логических схем на основе метода логического дополнения по равновесному коду «1 из 5» / Д. В. Пивоваров // Автоматика на транспорте. – 2017. – Т. 3, № 4. – С. 605–624.

15. Пивоваров Д. В. Построение систем функционального контроля многовыходных комбинационных схем методом логического дополнения по равновесным кодам / Д. В. Пивоваров // Автоматика на транспорте. – 2018. – Т. 4, № 1. – С. 131–149.

16. Huches J. L. A. Design of totally self-checking comparators with an Arbitrary Number of Inputs / J. L. A. Huches, E. J. McCluskey, D. J. Lu // IEEE Transactions on Computers. – 1984. – Vol. C-33, N 6. – P. 546–550.

17. Das D. Synthesis of circuits with low-cost concurrent error detection based on Bose-Lin codes / B. Das, N. A. Touba // Journal of Electronic Testing : Theory and Applications. – 1999. – Vol. 15, issue 1–2. – P. 145–155. DOI: 10.1023/A:1008344603814

18. Sogomonyan E. S. Design of self-testing and online fault detection combinational circuits with weakly independent outputs / E. S. Sogomonyan, M. Gössel // Journal of Electronic Testing : Theory and Applications. – 1993. – Vol. 4, issue 4. – P. 267–281. DOI : 10.1007/BF00971975

19. Busaba F. Y. Self-checking combinational circuit design for single and unidirectional multibit errors / F. Y. Busaba, P. K. Lala // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. – 1994. – Issue 1. – P. 19–28. DOI: 10.1007/BF00971960

20. Гессель М. Исследование комбинационных самопроверяемых устройств с независимыми и монотонно независимыми выходами / М. Гессель, А. А. Морозов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 1997. – № 2. – С. 180–193.

21. Das D. Low cost concurrent error detection based on modulo weight-based codes / D. Das, N. A. Touba, M. Seuring, M. Gossel // Proceedings of IEEE 6th International On-Line Testing Workshop (IOLTW). – Spain, Palma de Mallorca, July 3–5, 2000. – P. 171–176.

22. Сапожников В. В. Новые структуры систем функционального контроля логических схем / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, В. В. Дмитриев // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 2. – С. 127–143.

23. Блюдов А. А. О кодах с суммированием единичных разрядов в системах функционального контроля / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 8. – С. 131–145.

24. Berger J. M. A note on error detection codes for asymmetric channels / J. M. Berger // Information and Control. – 1961. – Vol. 4, issue 1. – P. 68–73. DOI: 10.1016/S0019-9958 (61)80037-5

25. Efanov D. Sum code formation with minimum total number of undetectable errors in data vectors / D. Efanov, V. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov, D. Nikitin // Proceedings of 13th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2015). – Batumi, Georgia, September 26–29, 2015. – P. 141–148. DOI : 10.1109/EWDTS.2015.7493112

26. Efanov D. On one method of formation of optimum sum code for technical diagnostics systems / D. Efanov, V. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov //Proceedings of 14th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016). – Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016. – P. 158–163. DOI : 10.1109/EWDTS.2016.7807633

27. Сапожников В. В. Коды с суммированием с последовательностью весовых коэффициентов, образующей натуральный ряд чисел, в системах функционального контроля / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Электронное моделирование. – 2017. – Т. 39, № 5. – С. 37–58.

28. Ефанов Д. В. Код с суммированием с высокой обнаруживающей способностью в области малой кратности ошибок для задач технической диагностики дискретных систем / Д. В. Ефанов // Наука и техника транспорта. – 2017. – № 4. – С. 55–63.

29. Collection of Digital Design Benchmarks. – URL : http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks (дата обращения : 16.04.2018).

30. SIS : A System for Sequential Circuit Synthesis / E. M. Sentovich, K. J. Singh, L. Lavagno, C. Moon, R. Murgai, A. Saldanha, H. Savoj, P. R. Stephan, R. K. Brayton, A. Sangiovanni-Vincentelli. – Berkeley : Electronics Research Laboratory, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, 1992. – 4 May. – 45 p.

31. Ghosh S. Synthesis of low power CED circuits based on parity codes / S. Ghosh, S. Basu, N. A. Touba // Proceedings of 23rd IEEE VLSI Test Symposium (VTS'05), 2005. – P. 315–320.

References

1. Gavzov D. V., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov Vl. V. Metody obespecheniya bezopasnosty diskretnykh system [Security methods for discrete systems]. *Avtomatika i telemekhanika* [*Automation and remote control*], 1994, no. 8, pp. 3–50. (In Russian)

2. Sogomyan E. S. & Slabakov E. V. *Samoproveryayemiye ustroistva i otkazoustoichiviye systemy* [*Self-testing checkers and fail-safe systems*]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1989, 208 p. (In Russian)

3. Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov Vl. V. *Samoproveryyemiye diskretniye ustroistva* [*Self-testing discrete devices*]. Saint Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1992, 224 p. (In Russian)

4. Efanov D. V. *Funktsionalniy control i monitoring ustroistv zheleznodorozhnoy avtomatiky i telemekhaniky:* monografiya [*Concurrent error detection and monitoring of devices of railway automatics and remote control:* study]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2016, 171 p. (In Russian)

5. Nicolaidis M. & Zorian Y. On-Line testing for VLSI-A compendium of approaches. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1998, no. 12, pp. 7–20. DOI: 10.1023/A:1008244815697

6. Mitra S. & McCluskey E. J. Which concurrent error detection scheme to choose. *Proceedings of International Test Conference.* New Jersey, USA, Atlantic City. 3–5 October 2000, pp. 985–994. DOI: 10.1109/TEST.2000.894311

7. Piestrak S. J. *Design of self-testing checkers for unidirectional error detecting codes.* Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej Press, 1995, 111 p.

8. Pradhan D. K. *Fault-tolerant computer system design.* New York, Prentice Hall Press, 1996, 560 p.

9. Matrosova A. Yu., Levin I. & Ostanin S. A. Self-checking synchronous FSM network design with low overhead. *VLSI Design*, 2000, vol. 11, issue 1, pp. 47–58. DOI: 10.1155/2000/46578

10. Das D., Touba N. A., Seuring M. & Gossel M. Low cost concurrent error detection based on Modulo Weight-Based codes. *Proceedings of IEEE 6th International On-Line Testing Workshop (IOLTW).* Spain, Palma de Mallorca, July 3–5, 2000, pp. 171–176.

11. Fujiwara E. *Code design for dependable systems*: *Theory and practical applications.* London et all., John Wiley & Sons, 2006, 720 p.

12. Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E. & Marienfeld D. *New methods of concurrent checking: Edition 1. Dordrecht*, *Springer Science+Business Media B. V.*, 2008, 184 p.

13. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. & Efanov D. V. Vsveshenniye kody s summirovaniyem dlya organizatsii kontrolya logicheskykh ustroistv [Weight-based sum codes for control organization of logical devices]. *Elektronnoye modelirovaniye* [*Electronic simulation*], 2014, vol. 36, no. 1, pp. 59–80. (In Russian)

14. Pivovarov D. V. Organizatsiya system funktsionalnogo kontrolya kombinatsionnykh logicheskykh skhem na osnove metoda logicheskogo dopolneniya po ravnovesnomu kodu “1 iz 5” [Organization of concurrent error detection systems of combinational logical circuits on the basis of the Boolean complement method by “1 out 5” constant-weight code]. *Avtomatika na transporte* [*Automatics on transport*], 2017, vol. 3, no. 4, pp. 605–624. (In Russian)

15. Pivovarov D. V. Postroyeniye system funktsionalnogo kontrolya mnogovykhodnykh kombinatsionnykh skhem metodom logicheskogo dopolneniya po ravnovesnym kodam [Building of concurrent error detection systems of multi-output combinational circuits using the Boolean complement method by constant-weight codes]. *Avtomatika na transporte* [*Automatics on transport*], 2018, vol. 4, no. 1, pp. 131–149. (In Russian)

16. Huches J. L. A., McCluskey E. J. & Lu D. J. Design of totally self-checking comparators with an Arbitrary Number of Inputs. *IEEE Transactions on Computers*, 1984, vol. C-33, no. 6, pp. 546–550.

17. Das D. & Touba N. A. Synthesis of circuits with low-cost concurrent error detection based on Bose-Lin codes. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1999, vol. 15, issue 1–2, pp. 145–155. DOI: 10.1023/A:1008344603814

18. Sogomonyan E. S. & Gössel M. Design of self-testing and on-line fault detection combinational circuits with weakly independent outputs. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1993, vol. 4, issue 4, pp. 267–281. DOI: 10.1007/BF00971975

19. Busaba F. Y. & Lala P. K. Self-checking combinational circuit design for single and unidirectional multibit errors. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1994, issue 1, pp. 19–28. DOI: 10.1007/BF00971960

20. Gessel M., Morozov A. A., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov Vl. V. Issledovaniye kombinatsionnykh skhem samoproveryayemykh ustroistv s nezavisimymy i monotonno nezavisimymy vykhodamy [The study of combinational self-testing checkers with independent and unidirectional independent outputs]. *Avtomatika i telemekhanika* [*Automation and remote control*], 1997, no. 2, pp. 180–193. (In Russian)

21. Das D., Touba N. A., Seuring M. & Gossel M. Low cost concurrent error detection based on modulo weight-based codes. *Proceedings of IEEE 6th International On-Line Testing Workshop (IOLTW).* Spain, Palma de Mallorca, July 3–5, 2000, pp. 171–176.

22. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. & Dmitriyev V. V. Noviye struktury system funktsionalnogo kontrolya logicheskykh skhem [The new architecture for concurrent error detection systems of logical circuits]. *Avtomatika i telemekhanika* [*Automation and remote control*], 2017, no. 2, pp. 127–143. (In Russian)

23. Blyudov A. A., Efanov D. V. Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov Vl. V. O kodakh s summirovaniyem yedinichnykh razryadov v systemakh funktsionalnogo kontrolya [On codes with summation of unit bits in concurrent error detection systems]. *Avtomatika i telemekhanika* [*Automation and remote control*], 2014, no. 8, pp. 131–145. (In Russian)

24. Berger J. M. A note on error detection codes for asymmetric channels. *Information and Control*, 1961, vol. 4, issue 1, pp. 68–73. DOI: 10.1016/S0019-9958-(61)80037-5

25. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl. & Nikitin D. Sum code formation with minimum total number of undetectable errors in data vectors. *Proceedings of 13th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2015)*. Batumi, Georgia, September 26–29, 2015, pp. 141–148. DOI: 10.1109/EWDTS.2015.7493112

26. Efanov D., Sapozhnikov V. & Sapozhnikov Vl. On one method of formation of optimum sum code for technical diagnostics systems. *Proceedings of 14th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016)*. Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016, pp. 158–163. DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807633

27. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. & Efanov D. V. Kody s summirovaniyem s posledovatelnostyu vesovykh koeffitsientov, obrazuyushchey naturalniy ryad chisel, v systemakh funktsionalnogo kontrolya [Sum codes with sequence of weight coefficients, generating the sequence of natural numbers, in concurrent error detection systems]. *Elektronnoye modelirovaniye* [*Electronic simulation*], 2017, vol. 39, no. 5, pp. 37–58. (In Russian)

28. Efanov D. V. Kod s summirovaniyem s vysokoy obnaruzhyvayushchey sposobnostyu v oblasty maloy kratnosty oshybok dlya zadach tekhnicheskoy diagnostiky diskretnykh system [Sum code with high detection ability in the range of low multiplicity of errors for the tasks of engineering diagnostics of discrete systems]. *Nauka i tekhnika transporta* [*Transport science and engineering*], 2017, no. 4, pp. 55–63. (In Russian)

29. *Collection of Digital Design Benchmarks*. URL: http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks (accessed: 16.04.2018).

30. *SIS: A System for Sequential Circuit Synthesis* / E. M. Sentovich, K. J. Singh, L. Lavagno, C. Moon, R. Murgai, A. Saldanha, H. Savoj, P. R. Stephan, R. K. Brayton, A. Sangiovanni-Vincentelli. Berkeley, Electronics Research Laboratory, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, 1992, 4 May, 45 p.

31. Ghosh S., Basu S. & Touba N. A. Synthesis of low power CED circuits based on parity codes. *Proceedings of 23rd IEEE VLSI Test Symposium (VTS'05)*, 2005, pp. 315–320.

*ЕФАНОВ Дмитрий Викторович – д-р техн. наук, доцент, TrES-4b@yandex.ru (Российский университет транспорта (МИИТ)); КОСТРОМИНОВ Александр Михайлович – д-р техн. наук, профессор, triak@mail.wplus.net; МАНАКОВ Александр Демьянович – д-р техн. наук, доцент, manakoff_2@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); МАКШАНОВ Андрей Владимирович – д-р техн. наук, профессор, andrey.makshanov@mail.ru (Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова); ШАРОВ Виктор Александрович – д-р техн. наук, профессор, vasharov_miit@mail.ru (Российский университет транспорта (МИИТ)).