

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 13, выпуск 2(47), 2016

ISSN (Print) 1815-588X

Учредитель и издатель

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

Адрес учредителя и издателя

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

Адрес редакции

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

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

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

Журнал зарегистрирован

в Российском индексе научного цитирования РИНЦ

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

Журнал имеет институт рецензирования

Журнал распространяется

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

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Научный редактор

А. К. Канаев, д-р техн. наук, доцент

Выпускающий редактор

С. А. Зинченко

Ответственный секретарь

Е. В. Моисеева

Перевод на английский язык

Д. И. Иванов

Верстка

А. А. Стуканова

Редактор сайта

Л. А. Стрелкова

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

Ситаж Марек, профессор, Силезский технический
университет, Польша

Христов Христо, профессор, Технический
университет, София, Болгария

РЕДКОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Подписано в печать с оригинал-макета 04.07.2016.

Формат 60×90 1/8. Бумага офсетная. Печать МФУ.

Усл. печ. л. 23,5. Уч.-изд. л. 14,1. Установочный тираж 300 экз.
Заказ 659. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ПГУПС

190031, СПб., Московский пр., 9.

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT
UNIVERSITY Vol. 13, Is. 2(47) – 2016

ISSN (Print) 1815-588X

Founder and publisher

Federal State Budgetary Educational Institution
of Higher Education «Petersburg State Transport
University»

Founder and publisher address

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

Editorial address

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

e-mail: izvestia@izvestiapgups.org

Mass media registration certificate number

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

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

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

The Journal has the Peer-review division

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

JOURNAL STAFF

Editor-in-chief

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

Deputy chief editor

V. Sapozhnikov, D.Eng., Professor

Science editor

A. Kanayev, D.Eng., Associate Professor

Executive editor

S. Zinchenko

Executive secretary

E. Moiseeva

English translation

D. Ivanov

Layout

A. Stukanova

Online content editor

L. Strelkova

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

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

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

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

Marek Sitazh, Professor, Silesian University
of Technology, Poland

Khristo Khristov, Professor, Technical University
of Sofia, Bulgaria

EDITORIAL TEAM

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

© Petersburg State Transport University, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

В. П. Бельтюков, А. В. Сенникова Влияние осевых нагрузок на одиночный выход рельсов	105
В. П. Бельтюков Оптимизация системы содержания верхнего строения железнодорожного пути	112
Г. И. Богданов, И. И. Рыбина, А. А. Антонюк Расчетно-теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния пролетного строения разводного моста раскрывающейся системы	121
Ю. П. Бороненко, Ю. Б. Житков Уточнение силовой характеристики связи кузова вагона с тележками при перевалке на плоских пятниках	133
А. Т. Бурков, М. М. Мирсаитов Режимы электротяговой сети при эксплуатации электровозов ВЛ-80Р и УТУ-1	146
Н. В. Евглевская, Г. А. Бекбаев, А. А. Привалов, Д. Н. Шахматов Модуль поддержки принятия решений по управлению информационной безопасностью телекоммуникационной сети единого дорожного диспетчерского центра управления перевозками ОАО «РЖД» на основе рационального выбора организационно-технических мероприятий	161
Ю. И. Ефименко, М. В. Четчуев, А. Г. Филиппов Особенности расчета эксплуатационных показателей, нелинейно связанных с размерами работы станций	172
А. М. Костроминов, С. А. Рахманин, Б. О. Смирнов, О. Н. Тюляндин Контроль состояния ридер-антенного тракта аппаратуры СБПП в условиях электродепо метрополитена	180
А. А. Мигров, В. В. Кучук, А. С. Хрущёв, С. В. Орлов Применение современных программ 3D-моделирования для модернизации подвижного состава железнодорожного транспорта	187
Н. С. Нестерова, Вл. А. Анисимов Сбалансированная система показателей для оценки стратегий развития мультимодальной транспортной сети	197
А. Б. Никитин, С. Т. Болтаев Обеспечение безопасности на станционных переездах при организации высокоскоростного движения на действующих линиях	206
А. Б. Никитин, С. Т. Болтаев, А. М. Глыбовский Особенности реализации функций электрической централизации для высокоскоростных поездов на линиях смешанного движения	215

А. Б. Никитин, В. А. Грошев

Автоматизация контроля хода технологического процесса станции в режиме реального времени 229

С. В. Чижов, В. С. Прокопович, Э. Т. Яхшиев

Обоснование надёжности конструкции дисперсно-армированного пролётного строения под высокоскоростные железнодорожные магистрали в условиях Республики Узбекистан 239

С. В. Чижов, Э. Т. Яхшиев, Л. К. Дьяченко

Оценка безопасности мостов с учётом динамического фактора надёжности 247

→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**Я. С. Ватулин, С. К. Коровин, М. С. Коровина, С. В. Орлов, Д. А. Потахов, Е. А. Потахов**

Безопасное применение мобильных подъёмников с рабочими платформами на основе результатов натурных и виртуальных экспериментов 255

Д. В. Ефанов

Применение равновесного кода «2 из 4» при организации систем функционального контроля 269

М. Р. Черепанова

Исследование влияния значения модуля кода с суммированием на структурную избыточность систем функционального контроля 279



УДК 625.172

В. П. Бельтюков, А. В. Сенникова**ВЛИЯНИЕ ОСЕВЫХ НАГРУЗОК НА ОДИНОЧНЫЙ ВЫХОД РЕЛЬСОВ**

Дата поступления: 19.04.2016

Решение о публикации: 23.05.2016

Цель: Выявить, применить и сравнить показатели интенсивности накопления одиночного выхода рельсов от пропущенного тоннажа под влиянием различных осевых нагрузок. **Методы:** Применялись сбор, анализ и обработка статистических данных, полученных из отчетной документации путейских подразделений по средствам автоматизированных систем управления АСУ-Путь. **Результаты:** Показана необходимость исследования одиночного выхода рельсов от пропущенного тоннажа при влиянии различных осевых нагрузок. На основе математической модели работы верхнего строения пути разработана методика оценки одиночного выхода рельсов. На основе анализа статистических данных определена численная среднесетевая величина коэффициентов и параметров, наиболее подходящих для одиночного выхода рельсов. Разработана методика определения средних осевых нагрузок на двухпутных участках железнодорожного пути с ярко выраженным различием грузопотоков в четном и нечетном направлениях. Для исследования одиночного выхода рельсов при влиянии различных осевых нагрузок двухпутные участки железнодорожного пути выбраны таким образом, чтобы по одному из путей преобладало движение тяжелых грузовых поездов, а по второму – порожних поездов. Построены зависимости одиночного выхода рельсов от пропущенного тоннажа на участках обращения подвижного состава со средними осевыми нагрузками 9,8 и 21,9 тонн на ось, произведен сравнительный анализ построенных зависимостей. **Практическая значимость:** По разработанной методике оценки одиночного выхода рельсов можно определять оптимальный срок службы рельсов в пути, объем работ при текущем обслуживании железнодорожного пути, а также назначать ремонты пути.

Железнодорожный путь, одиночный выход рельсов, пропущенный тоннаж, осевые нагрузки, интенсивность выхода рельсов, прогнозирование.

Vladimir P. Beltyukov, Cand. Eng., assistant professor, bw@peterlink.ru; ***Anna V. Sennikova**, postgraduate student, sennikova.anna.1988@mail.ru (Petersburg State Transport University) **INFLUENCE OF AXIAL LOADING ON INDIVIDUAL RAIL DAMAGE**

Objective: To determine, apply and compare variables of intensity of accumulation of individual rail damage from shipped tonnage under the influence of various axial loadings. **Methods:** Statistical data obtained from reporting documentation of track units operating ASU-Put automatic control systems was collected, analysed and processed. **Results:** The study demonstrated the need to study the dependency of individual rail damage from shipped tonnage under the influence of various axial loadings. On the basis of mathematical simulation of operation of track superstructure, a method for evaluation of individual rail damage was developed. On the basis of analysis of statistical data, numerical network-average value of coefficients and parameters that is most suitable for individual rail damage was identified. A method for calculation of average axial loads at double-track railway sections with pronounced difference in up-and-down train cargo flows was developed. For a study of individual rail damage under the influence of various axial loads double-track railway sections are selected so that traffic on one of the tracks consisted primarily of heavy freight trains, and on the other of unloaded trains. Dependencies of individual

rail damage from shipped tonnage at sections of circulation of rolling stock with average axial loads of 9.8 and 21.9 tonnes per axle were calculated, comparative analysis of obtained dependencies was undertaken. **Practical importance:** The method of evaluation of individual rail damage thus developed will allow to determine optimal service life for rails in the track, the volume of work in line maintenance, and to set track repairs.

Railway track, individual rail damage, shipped tonnage, axial loads, intensity of rail damage, forecasting.

Рельсы – самый металлоемкий элемент верхнего строения пути, поэтому даже незначительное увеличение срока службы рельсов дает большую экономию металла. В настоящее время идет поиск технических конструктивных и технологических решений, которые позволили бы увеличить срок службы железнодорожных рельсов [1].

Срок службы рельсов характеризуется наработкой тоннажа брутто, пропущенного по железнодорожному пути.

В настоящее время не учитывается влияние на срок службы рельсов осевых нагрузок, хотя их повышение снижает срок службы рельсов и увеличивает затраты труда на текущее содержание пути [4, 8, 12–15].

Частота приложения нагрузок от подвижного состава и величина осевых нагрузок существенно влияют на интенсивность одиночного выхода рельсов [2, 3, 11], поэтому необходимо разработать методику оценки одиночного выхода рельсов на участках с различными осевыми нагрузками.

Целью исследования является получение и использование показателей интенсивности накопления одиночного выхода рельсов при влиянии различных осевых нагрузок.

Математическая модель одиночного выхода рельсов

В Петербургском государственном университете путей сообщения создана модель работы верхнего строения пути [5–7, 10], которая предусматривает четыре этапа работы верхнего строения пути:

1) приработки (стабилизации) после ремонта;

2) нормальной эксплуатации;
3) ухудшения состояния пути;
4) стабилизации состояния пути при большом объеме планово-предупредительных работ текущего содержания.

В этом случае зависимость, которая наиболее верно характеризует физическую сущность работы верхнего строения пути, имеет вид

$$\Omega(x) = B \frac{m}{t_0} x^{m-1} + C + A \times \left[1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \right] \left(\frac{\eta}{\frac{x}{\beta} \ln(\eta) + 1} \right),$$

где $\Omega(x)$ – интенсивность отказов; B – коэффициент, учитывающий наличие множества элементов в системе; m – параметр формы в период приработки; t_0 – параметр масштаба в период приработки; x – пропущенный тоннаж, млн т брутто; C – фоновая интенсивность отказов, вызванных случайными факторами и не зависящая от пропущенного тоннажа; A – коэффициент при функции, которая описывает период стабильной работы пути и ухудшения состояния, учитывающий многоэлементность системы; β – параметр масштаба в период нормальной эксплуатации; α – параметр формы в период нормальной эксплуатации; η – коэффициент полноты восстановления ресурса.

Таким образом, задача сводится к определению численных величин коэффициентов и параметров, наиболее подходящих для одиночного выхода рельсов.

Поскольку задачей было выявить только влияние осевых нагрузок на интенсивность

одиночного выхода рельсов, большая часть параметров зависимости определена на основе исследования статистических данных для всех условий эксплуатации сети железных дорог ОАО «РЖД» по базам данных АСУ-Путь, она соответствует среднесетевым значениям: $B = 19,9$; $m = 0,0288$; $t_0 = 0,169$; $C = 0,001$; $A = 12,0$; $\eta = 0,9$.

При этом зависимость примет вид

$$\Omega(x) = 3,3912x^{-0,9712} + 10,8 \left[1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha}} \right] + 0,001 + \frac{\frac{x}{\beta} \ln(0,9) + 1}{\beta},$$

Следующий этап расчетов сводится к определению оставшихся параметров, характеризующих работу рельсов, α , β и k построению зависимости одиночного выхода рельсов от пропущенного тоннажа под влиянием различных осевых нагрузок.

Выбор участков железнодорожного пути для анализа одиночного выхода рельсов

Ранее в ПГУПС был исследован одиночный выход рельсов в зависимости от грузонапряженности и скорости движения поездов [9]. Выяснилось, что с увеличением грузонапряженности или скорости движения поездов интенсивность одиночного выхода рельсов возрастала не всегда. Из этого был сделан вывод, что влияние осевых нагрузок на интенсивность одиночного выхода рельсов значительно больше, чем влияние скорости движения поездов и грузонапряженности.

Исследования одиночного выхода рельсов от пропущенного тоннажа с различными осевыми нагрузками осложняется тем, что в паспортных данных верхнего строения пути осевые нагрузки не учитываются, поэтому потребовалось разработать методику определения спектра осевых нагрузок. В основе этой методики рассматривались два типа участков

железнодорожного пути с различным спектром нагрузок: по одному пути преобладает движение тяжелых грузовых поездов, по второму – порожних поездов.

Для выявления величины осевых нагрузок выбрали 12 двухпутных участков (рис. 1), на которых ярко выражено различие грузопотоков в четном и нечетном направлениях: Буй – Киров, Москва – Юдино, Юдино – Екатеринбург, Бекасово-Сорт. – Яганово, Яганово – Воскресенск, Самара – Челябинск, Челябинск – Карбышево, Новообразцовое – Самара, Тайшет – Иркутск, Иркутск – Чита, Чита – Хабаровск, Хабаровск – Владивосток. Осевую нагрузку для каждого пути участка определяли по формуле

$$P_i = \frac{\Gamma_i}{\Gamma_{\text{ср}}} P_{\text{ср}},$$

где P_i – осевая нагрузка для i -го пути, тонн на ось; Γ_i – грузонапряженность пути, для которого определяется осевая нагрузка, млн ткм брутто на км в год; $\Gamma_{\text{ср}}$ – средняя грузонапряженность на рассматриваемом участке, млн ткм брутто на км в год; $P_{\text{ср}}$ – средняя осевая нагрузка, тонн на ось.

Для анализа и построения графиков одиночного выхода рельсов участки были разбиты на целые километры. В расчеты вошли только те километры, на всем протяжении которых эксплуатационные и конструктивные характеристики одинаковы:

- исключались километры, расположенные на станциях, так как на станционные километры попадают неисправности стрелочных переводов, что искажает анализ одиночного выхода рельсов;
- исключались километры, на которые попадали круговые кривые: для анализа круговых кривых необходима более детальная разбивка пути (по пикетам);
- исключались километры, на которых расчетный срок службы (отношение пропущенного тоннажа и грузонапряженности) и фактический срок службы (разность текущего года и года последнего капитального ремонта

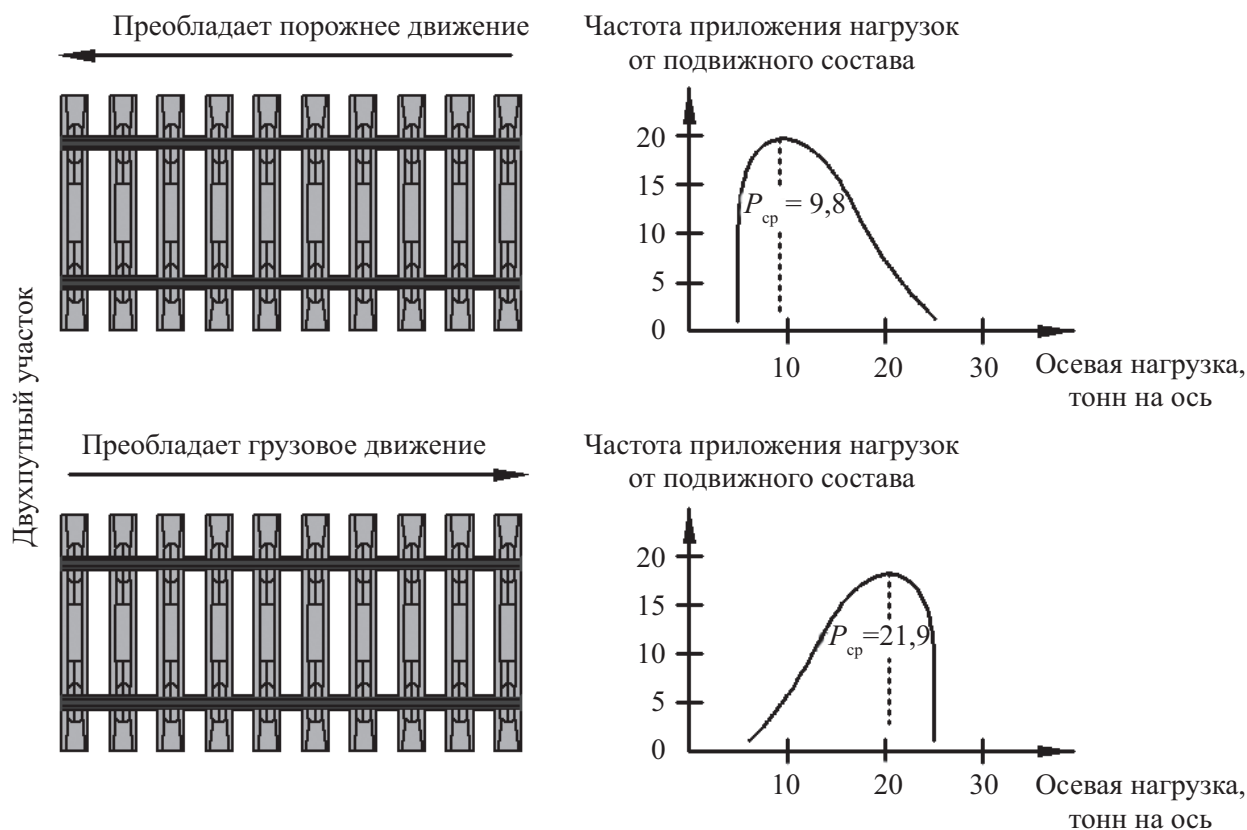


Рис. 1. Двухпутные участки с ярко выраженным различным грузопотоком

пути) различаются больше чем в 3 раза. Это объясняется тем, что на этих километрах грузонапряженность резко возросла или упала (изменились условия эксплуатации), поэтому данные не будут описывать точную интенсивность одиночного выхода рельсов;

- принимались в расчет километры только с новыми рельсами производства Новокузнецкого металлургического комбината типа Р65 с качеством термоупрочнения Т1 с приведенным износом 0–12 мм и без бокового и волнообразного износа. У переложенных рельсов неизвестны условия эксплуатации до переукладки, а значит, и природа их дефектов;

- принимались в расчет километры только с новыми железобетонными шпалами с типом креплений КБ, с щебеночным балластом толщиной от 35 мм и более, и с бесстыковой конструкцией пути, чтобы исключить влияние посторонних факторов на одиночный выход рельсов.

Итого для расчета было выбрано 2238 км.

Результаты анализа одиночного выхода рельсов

Результаты исследования одиночного выхода рельсов от пропущенного тоннажа со средними осевыми нагрузками 9,8 и 21,9 тонн на ось показаны на рис. 2. Видно, что интенсивность одиночного выхода рельсов на участках с осевыми нагрузками 21,9 и 9,8 тонн на ось до наработки тоннажа 400 млн т брутто на одном уровне, а затем на участках с осевыми нагрузками 21,9 тонн на ось возрастает в 3,15 раза по сравнению с нагрузкой 9,8 тонн на ось.

Заключение

Разработана методика определения средних осевых нагрузок на участках с ярко выра-

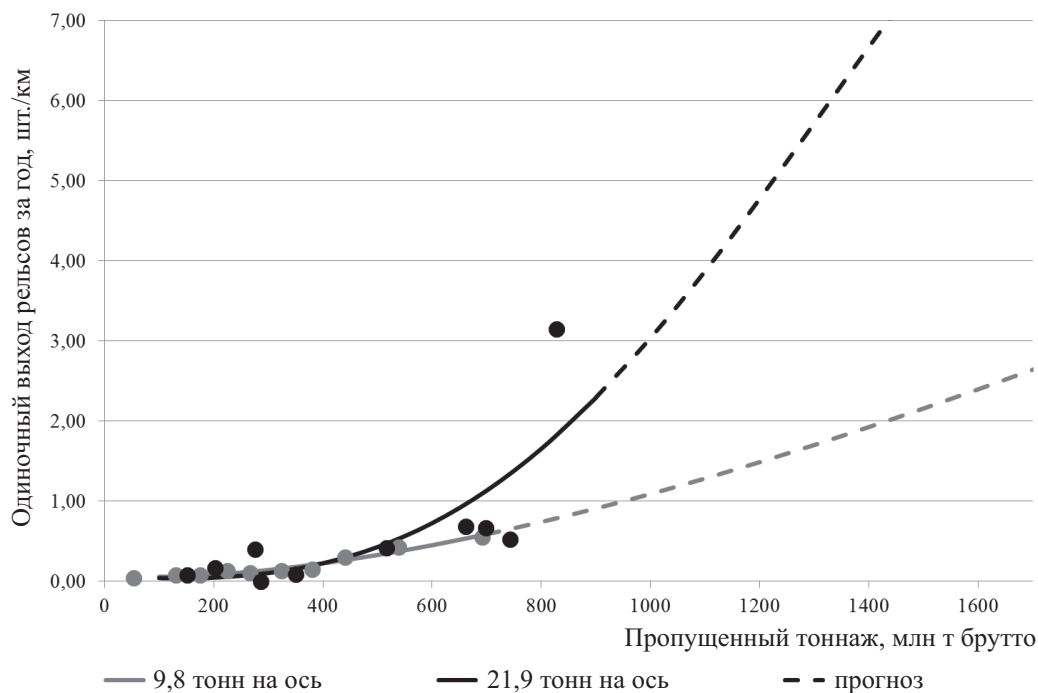


Рис. 2. Одиночный выход рельсов в зависимости от пропущенного тоннажа

женными различиями грузопотоков в четном и нечетном направлениях.

На основании созданной математической модели работы верхнего строения пути проанализирован одиночный выход рельсов на участках с различными осевыми нагрузками. Анализ показал превышение роста одиночного выхода рельсов на участках обращения вагонов с высокими осевыми нагрузками более чем в 3 раза после наработки тоннажа свыше 400 млн т брутто.

Результаты исследования могут быть использованы при оценке ресурса железнодорожных рельсов в условиях обращения подвижного состава с высокими осевыми нагрузками.

Библиографический список

1. Абдурашитов А. Ю. О разработке комплекса мер по реализации требований стратегии развития ОАО «РЖД» в части повышения срока службы пути до 1,5 млрд т брутто к 2015 г. и 2,5 млрд т брутто к 2030 г. при обеспечении безопасности движения

и минимизации стоимости жизненного цикла конструкции пути / А. Ю. Абдурашитов // Проблемы трансфера современных технологий в экономику Забайкалья и железнодорожный транспорт : материалы международной научно-практической конференции, 13–14 окт. 2011 г., г. Чита. – Чита: ЗаБИЖТ, 2011. – С. 69–87.

2. Алехин А. Л. Прогнозирование одиночного выхода рельсов, сваренных алюминотермитным способом / А. Л. Алехин, Л. С. Блажко, Н. С. Никеров // Изв. ПГУПС. – 2010. – Вып. 2 (23). – С. 51–55.

3. Аманова М. В. Оценка суммарного одиночного выхода рельсов при обращении по ним разнотипного подвижного состава / М. В. Аманова // Промышленный транспорт Казахстана. – 2012. – № 3. – С. 14–18.

4. Амелин С. В. Интенсивность накопления остаточных деформаций пути при воздействии вагонной нагрузки 250 кН/ось / С. В. Амелин, Л. С. Блажко, М. П. Смирнов, В. И. Смирнов ; Ленингр. ин-т инж. ж.-д. трансп. – Л., 1982. – Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 30.08.82. № 1797-жд.

5. Бельтюков В. П. Планирование ремонтов пути в условиях интенсивной его эксплуатации : дис. ...

канд. тех. наук : 05.22.06 / В. П. Бельтюков. – Л. : ЛИИЖТ, 1990. – 275 с.

6. Бельтюков В. П. Разработка методик прогнозирования технического состояния пути, затрат на содержание пути и оптимизации содержания пути по экономическим критериям / В. П. Бельтюков // Путь XXI века : сб. науч. трудов междунар. науч.-практич. конф. 2 июня 2011 г., Санкт-Петербург / под ред. проф. Л. С. Блажко. – СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения. – 2012. – С. 25–32.

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

8. Блажко Л. С. Техничко-технологическая оценка усиления конструкции пути на участках обращения подвижного состава с осевыми нагрузками до 300 кН : дис. ... д-ра тех. наук : 05.22.06 / Л. С. Блажко. – СПб., 2003. – 331 с.

9. Сенникова А. В. Влияние скорости движения поездов на одиночный выход рельсов в пути / А. В. Сенникова // Путь XXI века : сб. науч. трудов междунар. науч.-практич. конф. 14–15 фев. 2013 г., Санкт-Петербург / под ред. проф. Л. С. Блажко. – СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения. – 2013. – С. 42.

10. Симонюк И. А. Прогнозирование интенсивности накопления остаточных деформаций верхнего строения железнодорожного пути для среднесрочного планирования путевых работ : дис. ... канд. тех. наук : 05.22.06 / И. А. Симонюк. – СПб., 2014. – 147 с.

11. Сухов И. Ф. Оценка влияния повышения осевых нагрузок вагонов на долговечность рельсов / И. Ф. Сухов, Г. И. Тарнопольский // Механика деформируемого тела и расчет сооружений. – Новосибирск : НИИЖТ, 1980. – С. 21–29.

12. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь : учеб. для вузов / Г. М. Шахунянц. – 3-е изд. – М. : Транспорт, 1987. – 479 с.

13. Шахунянц Г. М. О сроках службы рельсов / Г. М. Шахунянц // Путь и путевое хозяйство. – 1971. – № 10. – С. 15–18.

14. Шахунянц Г. М. Работа пути и расходы на его содержание / Г. М. Шахунянц // Сб. науч. тр. МИИТ. – Вып. 491. – М., 1976. – С. 3–67.

15. Шахунянц Г. М. Техничко-экономические расчеты в путевом хозяйстве железных дорог / Г. М. Шахунянц. – М. : Трансжелдориздат, 1939. – 242 с.

References

1. Abdurashitov A. Yu. O razrabotke kompleksa mer po realizatsii trebovaniy strategii razvitiya OAO RZhD v chasti povysheniya sroka sluzhby puti do 1,5 mlrd t brutto k 2015 g. i 2,5 mlrd t brutto k 2030 g. pri obespechenii bezopasnosti dvizheniya i minimizatsii stoimosti zhiznennogo tsikla konstruktii puti [On Development of a Set of Measures for Realisation of Requirements of Russian Railways JSC Development Strategy Regarding Increasing Term of Track Service to 1.5bn t Total Weight by 2015 and to 2.5bn t Total Weight by 2030 Whilst Ensuring Traffic Safety and Minimising Cost of Track Element Life Cycle]. *Problemy transferta sovremennykh tekhnologiy v ekonomiku Zabaykalya i zheleznodorozhnyy transport: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Problems of Transferring Modern Technologies into Transbaikalia Territory Economics and Railway Transport: Papers of Int. Research and Practice Conf.)* Oct. 13–14, 2011, Chita, Transbaikalia Railway Transport Institute. Chita, ZabIZhT, 2011. Pp. 69–87.

2. Alekhin A. L., Blazhko L. S. & Nikerov N. S. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2010, Is. 2 (23), pp. 51–55.

3. Amanova M. V. *Promyshlennyy transport Kazakhstana – Industrial Transport of Kazakhstan*, 2012, no. 3, pp. 14–18.

4. Amelin S. V., Blazhko L. S., Smirnov M. P. & Smirnov V. I. Intensivnost nakopleniya ostatochnykh deformatsiy puti pri vozdeystvii vagonnoy nagruzki 250 kN / os [Intensity of Accumulation of Permanent Track Deformations under the Influence of Carriage Burden of 250 kN / axle], Leningrad Railway Transp. Eng. Inst. Lenngrad, 1982.

5. Beltyukov V. P. Planirovaniye remontov puti v usloviyakh intensivnoy yego ekspluatatsii [Planning for Track Repairs under Conditions of Its Intense Operation]. Leningrad, LIIZhT, 1990. 275 p.

6. Beltyukov V. P. Razrabotka metodik prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya puti, zatrat na soderzhaniye puti i optimizatsii soderzhaniya puti po

ekonomicheskim kriteriyam [Development of Methods for Forecasting Technical Condition of the Track, Track Maintenance Expenses and Optimisation of Track Maintenance by Economic Criteria]. *Put XXI veka: sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (21st Century Track: Coll. Sci. Papers of the Int. Research and Practice Conf.)*. Jun. 2, 2011, St. Petersburg; ed. L. S. Blazhko. St. Petersburg, Petersburg Transp. Univ., 2012. Pp. 25-32.

7. Beltyukov V. P. *Put i putevoye khozyaystvo – Track and Track Facilities*, 2013, no. 2, pp. 23-25.

8. Blazhko L. S. Tekhniko-tekhnologicheskaya otsenka usileniya konstruksii puti na uchastkakh obrashcheniya podvizhnogo sostava s osevyimi nagruzkami do 300 kN [Technical and Technological Evaluation of Strengthening of Track Design at Sections where Rolling Stock with Axial Loads of up to 300 kN Operates]. St. Petersburg, 2003. 331 p.

9. Sennikova A. V. Vliyaniye skorosti dvizheniya poyezdov na odinochnyy vykhod relsov v puti [Influence of Train Movement Speed on Individual Rail Damage on the Track]. *Put XXI veka: sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (21st Century Track: Coll. Sci. Papers of the Int. Research and Practice Conf.)*. Feb. 14–15, 2013, St Petersburg; ed. L. S. Blazhko. St Petersburg, Petersburg Transp. Univ., 2013. Pp. 42.

10. Simonyuk I. A. Prognozirovaniye intensivnosti nakopleniya ostatochnykh deformatsiy verkhnegostroyeniya zheleznodorozhnogo puti dlya srednesrochnogo planirovaniya putevykh rabot [Forecasting Intensity of Accumulation of Permanent Deformations of Railway Track Superstructure for Mid-Term Planning of Track Works]. St. Petersburg., 2014. 147 p.

11. Sukhov I. F. & Tarnopolskiy G. I. Otsenka vliyaniya povysheniya osevykh nagрузок vagonov na dolgovechnost relsov [Evaluation of Influence of Increasing Carriage Axial Loads on Rail Longevity. *Mekhanika deformiruyemogo tela i raschet sooruzheniy (Mechanics of Deformed Body and Structure Calculations)*. Novosibirsk, NIIZhT, 1980. Pp. 21-29.

12. Shakhunyants G. M. Zheleznodorozhnyy put: uchebnik dlya vuzov [Railway Track: Univ. Course Book]. Moscow, Transport, 1987. 479 p.

13. Shakhunyants G. M. *Put i putevoye khozyaystvo – Track and Track Facilities*, 1971, no. 10, pp. 15-18.

14. Shakhunyants G. M. Rabota puti i raskhody na yego sodержaniye [Track Operation and Expenses on Its Maintenance]. Moscow, 1976. Pp. 3-67.

15. Shakhunyants G. M. Tekhniko-ekonomicheskiye raschety v putevom khozyaystve zheleznnykh dorog [Technical and Economic Calculations in Railway Track Facilities]. Moscow, Transzhedorizdat, 1939. 242 p.

БЕЛЬТЮКОВ Владимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, bw@peterlink.ru *СЕННИКОВА Анна Владимировна – аспирант, sennikova.anna.1988@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 625.172

В. П. Бельтюков**ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ СОДЕРЖАНИЯ
ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ**

Дата поступления: 19.04.2016

Решение о публикации: 19.05.2016

Цель: Разработать методы оптимизации содержания железнодорожного пути на основе анализа изменения его технического состояния и затрат на его содержание. **Методы:** Применены методы системного анализа, теории управления, методологии оптимального управления. **Результаты:** Создана методика оптимизации системы содержания верхнего строения железнодорожного пути на основе достижения минимальной стоимости жизненного цикла конструкции. Сделан вывод, что решения по конструкции, техническому обслуживанию и ремонтам пути должны приниматься на основе анализа их влияния на стоимость жизненного цикла, а прогнозирование затрат на перспективу – опираться на общие закономерности изменения состояния пути и историю изменения состояния пути. **Практическая значимость:** Использование комплекса разработанных моделей и методик позволит повысить эффективность ведения путевого хозяйства, принимать оптимальные управленческие решения, минимизировать общие затраты на содержание пути.

Железнодорожный путь, путевое хозяйство, верхнее строение пути, техническое обслуживание, оптимизация содержания.

Vladimir P. Beltyukov, Cand. Eng., assistant professor, bw@peterlink.ru (Petersburg State Transport University) OPTIMISATION OF MAINTENANCE SYSTEM FOR RAILWAY SUPERSTRUCTURE

Objective: To develop methods for optimisation of railway maintenance based on analysis of changes of its technical state and maintenance expenses. **Methods:** Methods of systemic analysis, management theory and optimal control were applied. **Results:** A method for optimisation of railway superstructure maintenance system was created, based on achieving minimal cost of structure life cycle. It was concluded that solutions regarding design, technical maintenance and track repairs should be made on the basis of analysis of their influence on life-cycle cost, and long-term expense forecast should be based on common patterns of changes in track condition and on history of changes in the track condition. **Practical importance:** Application of the set of models and methods developed would allow to increase efficiency of maintenance of track facilities, to make optimal managerial decisions, and to minimise general track maintenance expenses.

Railway track, track facilities, track superstructure, technical maintenance, maintenance optimisation.

Путевое хозяйство – одна из основных отраслей железнодорожного транспорта. На него приходится более половины основных фондов

и 20–30% эксплуатационных расходов железных дорог. Высокий уровень затрат требует оптимизации системы управления путевым

хозяйством, поскольку в ней остается много нерешенных задач.

Первая проблема – неэффективность методик планирования путевых работ. В настоящее время для планирования ремонтов пути используются критерии, изложенные в нормативных документах ОАО «РЖД» [11, 14], однако эта система планирования имеет ряд недостатков. Во-первых, критериев несколько, и они могут давать противоречивые варианты решений. Во-вторых, планы в ходе их выполнения значительно изменяются, так как техническое состояние пути не прогнозируется, а разнообразие эксплуатационных условий не учитывается. В связи с этим руководство инфраструктурного комплекса понимает, что необходимо изменить подход к планированию путевых работ [9].

Вторая проблема – накопленные данные о состоянии пути неэффективно используются при планировании. Без учета тенденций изменения состояния пути невозможно оценить расходы на его содержание и эффективность планов.

Третья проблема – недостаточная экономическая обоснованность решений. Например, для всех условий эксплуатации нормативы рекомендуют практически одни и те же конструкции пути.

Для создания методики оптимизации системы содержания верхнего строения железнодорожного пути необходимо решить следующие задачи:

- создать модели работы верхнего строения пути на этапах жизненного цикла, учитывающие технические и экономические факторы;
- выявить факторы, влияющие на изменение состояния пути и определить степень их влияния в рамках модели;
- определить оптимальную продолжительность жизненного цикла пути;
- оптимизировать стоимость жизненного цикла (СЖЦ).

Основы оптимизации разработаны в научных исследованиях работников кафедры «Железнодорожный путь» ПГУПС [2–5, 15].

Оптимизация системы содержания верхнего строения пути с применением теории стоимости жизненного цикла

Наиболее эффективный способ управления состоянием объектов – оптимизация СЖЦ. Для расчетов в качестве СЖЦ верхнего строения пути целесообразно принять период от одного капитального ремонта (реконструкции) до следующего [1]. Общая СЖЦ верхнего строения пути $S_{сжц}$ может быть выражена как сумма затрат на работы по ремонту пути, его текущее содержание и на последующую утилизацию верхнего строения пути в соответствии с методиками ОАО «РЖД» [6, 8, 10], при этом надо учитывать возвратную стоимость материалов и затраты в других хозяйствах, связанные с состоянием пути (предоставление «окон», ограничения скорости движения, на тягу поездов и ремонт подвижного состава).

Оптимальным считается решение, при котором выполняется условие минимума СЖЦ, отнесенного к продолжительности цикла t :

$$\frac{S_{сжц}}{t} = \min, \text{ руб./год.}$$

Принцип решения можно показать на примере (рис. 1). Угол наклона линий, соединяющих точки начала и конца цикла, соответствует годовым затратам на техническое обслуживание и ремонт. Наилучшим является вариант с минимальной СЖЦ, отнесенной к одному году. В приведенном примере – это вариант № 1.

Универсальная модель работы верхнего строения пути

Классическая модель нарастания отказов, использованная в УРРАН, состоит из трех периодов: приработки, нормальной эксплуатации и ухудшения состояния объекта. Считается, что при достижении предельного уровня интенсивности отказов следует выполнять ремонт. Но есть несколько факторов, в резуль-

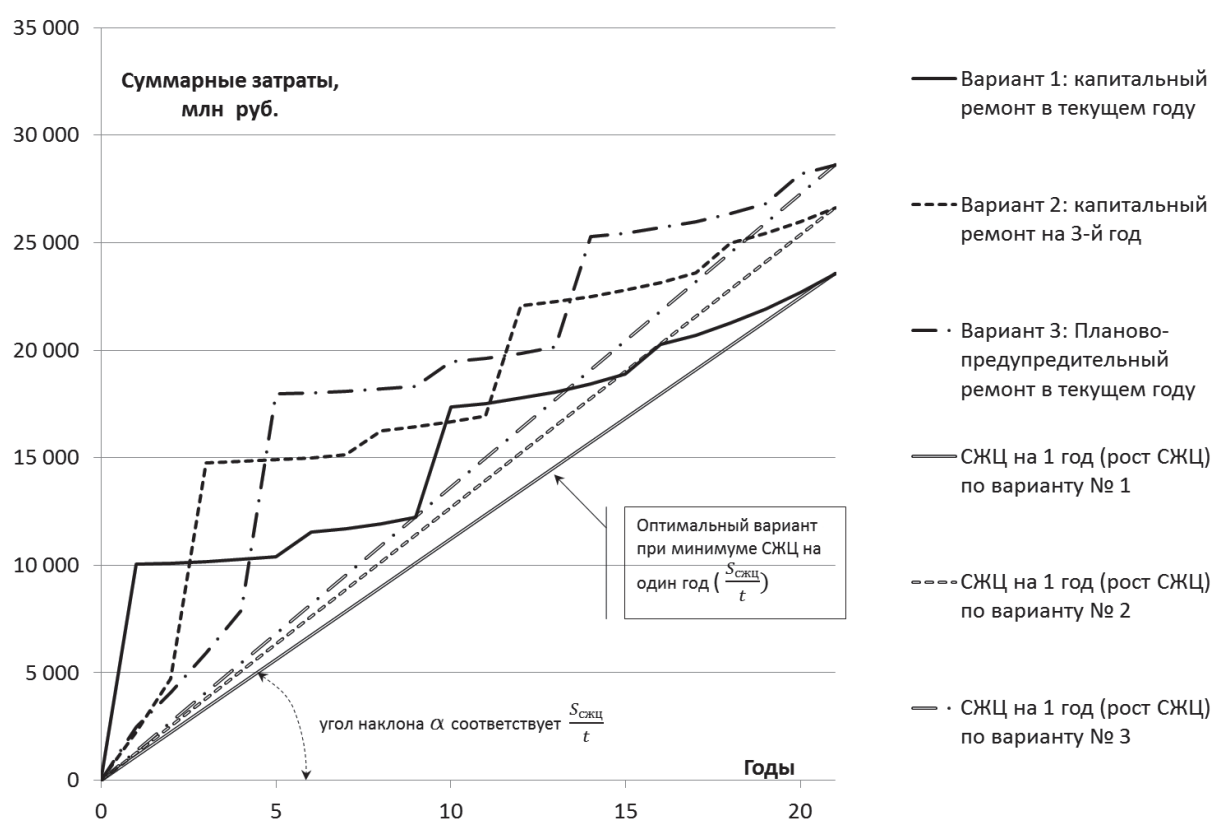


Рис. 1. Решение задачи оптимизации стоимости жизненного цикла для нескольких вариантов распределения ремонтов по годам. Ломаные линии показывают накопление расходов для каждого варианта по годам; прямые линии, соединяющие начало и конец периода, – нарастание стоимости жизненного цикла

тате действия которых вид этой зависимости для железнодорожного пути будет отличаться от классического:

1) конечность числа элементов, входящих в конструкцию пути. Интенсивность отказов и число отступлений не могут превысить некоторую величину (например, не может быть более 80 дефектных рельсов на 1 км при их длине 25 м);

2) уровень и качество текущего содержания. Если расходуются большие средства на текущее содержание, то уровень дефектности может стабилизироваться и даже снижаться. Но из низкого уровня дефектности нельзя делать вывод, что ремонта не требуется. Может быть, целесообразнее выполнить ремонт пути, чем тратить средства на его текущее содержание.

В ПГУПС для решения оптимизационных задач по содержанию железнодорожного пути

разработана технико-экономическая модель его работы на протяжении жизненного цикла [2, 3, 12, 13]. Она основывается на использовании законов распределения Вейбулла для описания поведения случайных величин. Эта модель учитывает нарастание объемов неисправностей и процессов восстановления верхнего строения пути, выделяет четыре этапа работы пути:

1) приработки (стабилизации) после ремонта, когда снижается интенсивность образования дефектов и отступлений от норм содержания по гиперболической зависимости;

2) нормальной эксплуатации, когда интенсивность образования дефектов стабилизируется на низком уровне, соответствующем потоку случайных неисправностей;

3) ухудшения состояния пути, когда нарастает интенсивность образования дефектов и

деформаций и одновременно увеличивается объем работ текущего содержания;

4) возможный этап стабилизации состояния пути в случае увеличения объемов планово-предупредительных работ текущего содержания. Состояние пути зависит от отношения интенсивности нарастания объемов отступлений и объемов работ текущего содержания пути и может как ухудшаться, так и стабилизироваться и даже улучшаться при высоких затратах на текущее содержание.

Таковыми же зависимостями можно описать изменения интенсивности не только отказов и неисправностей, но и объемов работ, а также затрат на работы текущего содержания пути между ремонтами.

Статистическая обработка данных показателей состояния пути по сети железных дорог, проведенная в ПГУПС, подтвердила вид этой зависимости. Причем чем ниже грузонапряженность участка, тем раньше (по наработке тоннажа) наступает период стабилизации состояния пути на одном уровне, и на малодоелятельных участках он может тянуться десятилетиями.

Определение влияния различных факторов на работу пути

Предварительно были классифицированы факторы с точки зрения их влияния на работу пути. Выделены следующие группы факторов:

- эксплуатационные (размеры, скорость и режим движения, вид тяги, спектр осевых нагрузок);
- природные (температурный режим, продолжительность зимы, толщина снежного покрова, продолжительность промерзания балласта и грунта);
- конструкционные (материал, тип и качество элементов верхнего строения, состояние земляного полотна, план и профиль пути);
- качество содержания ремонтов и текущего содержания пути.

Часть факторов влияет на максимальную наработку тоннажа, которую может пропу-

стить конструкция верхнего строения, часть других – на срок службы в годах. Если преобладают факторы, зависящие от интенсивности движения, то сроки службы и периодичность ремонта ограничиваются определенной наработкой (максимальным техническим ресурсом). Под действием природных факторов срок службы ограничивается определенным числом лет эксплуатации.

Для исследования влияния различных факторов на показатели технического состояния пути проведен статистический анализ технологических баз данных автоматических систем управления по сети дорог. Дорога была разделена на участки с одинаковыми конструкциями пути и условиями эксплуатации. По условиям эксплуатации выделены участки с различными:

- грузонапряженностью (группами пути);
 - долями пассажирских и пригородных поездов;
 - скоростями движения (категориями пути);
 - продолжительностью зимнего периода;
 - характеристиками плана и профиля.
- Также выделены участки с одинаковыми конструкциями пути, различающиеся:
- типом и качеством рельсов (Р50, Р65, Р75, термически упрочненные и сырые, новые и переложенные);
 - подрельсовым основанием (дерево, железобетон);
 - материалом балласта (щебень, асбест и др.);
 - видами креплений (ДО, КД, АРС, КБ, ЖБР, W-30, Р-350).

Построены среднесетевые зависимости следующих параметров состояния пути от тоннажа и сроков эксплуатации: одиночный выход рельсов, одиночная замена шпал, процент негодных креплений, среднегодовое количество неисправностей, выявленных вагоном-путеизмерителем по всем видам отступлений. Получен массив параметров для зависимостей изменения состояния пути от наработки тоннажа, включающий более миллиона сочетаний. Назначение этого массива – прогнозировать изменение состояния пути в разных условиях.

Решение задачи определения оптимальной продолжительности жизненного цикла

Ожидаемая продолжительность жизненного цикла определяется по результатам оптимизационных расчетов из условия наступления предельного состояния, когда дальнейшая эксплуатация без капитального ремонта пути (модернизации, реконструкции) становится нецелесообразной. Это будет такая продолжительность цикла, при которой общая СЖЦ $S_{сжц}$, отнесенная к одному году службы t , минимальна:

$$S_{сжц} / t = f(t) / t = \min.$$

Минимум функции определяется из классического условия:

$$\frac{\partial(S_{сжц} / t)}{\partial(t)} = \frac{\partial(f(t) / t)}{\partial(t)} = 0.$$

Прогнозирование изменения технического состояния пути

Изменение состояния пути прогнозируется на основании анализа единой технологической базы данных АСУЖТ. Путь делится на участки разной протяженности – от нескольких пикетов до перегона – в зависимости от вида рассматриваемого ремонта.

В связи с тем, что данных по показателям состояния пути и затратам может быть недостаточно либо достоверность информации может быть невелика, разработана методика прогнозирования, сочетающая использование как местных, так и среднесетевых данных. Рис. 2 иллюстрирует порядок прогнозирования технического состояния пути на примере прогноза числа неисправностей в профиле и по уровню для отдельного перегона.

По фактическим значениям определяется тренд интенсивности нарастания объемов неисправностей за последние годы, по сред-

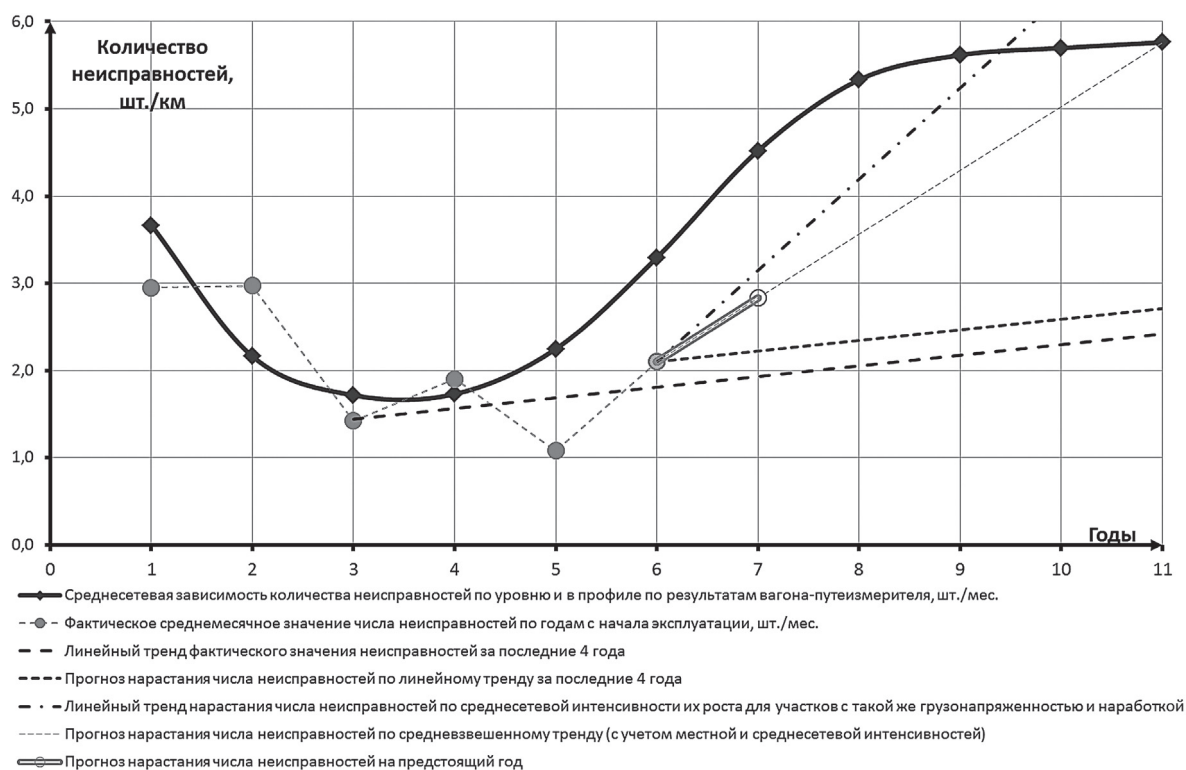


Рис. 2. Прогнозирование параметров состояния пути на основе сочетания среднесетевой зависимости и фактических данных о состоянии пути за предшествующий период

несетевой зависимости – тренд нарастания числа неисправностей для участков с такими же условиями эксплуатации и конструкции. Прогноз нарастания числа неисправностей на предстоящий год определяется с учетом и среднесетевого, и местного трендов:

$$\Delta h = \Delta h_{\text{мест}} \gamma + \Delta h_{\text{ср}} (1 - \gamma),$$

где γ – доля учета местного тренда, может принимать значения от 0 до 1 и зависит от степени достоверности местных данных, определенной статистическими расчетами.

При прогнозировании затрат на работы текущего содержания улучшение показателей состояния пути после выполнения ремонта учитывается путем ввода коэффициентов снижения затрат. Коэффициенты снижения затрат показывают отношение затрат после и до ремонта:

$$K_{\text{рем-}i} = \frac{Z_2}{Z_1},$$

где Z_2 – затраты на работы текущего содержания пути после ремонта; Z_1 – до ремонта.

В ходе работы проанализированы среднесетевые отношения всех наблюдаемых параметров состояния пути до и после ремонтов, определена величина снижения затрат на текущее содержание пути после ремонтов. Так, после капитального ремонта коэффициент снижения затрат $K_{\text{рем}}$ составляет 0,430; после среднего – 0,490–0,610 (в зависимости от объема работ и глубины очистки); после планово-предупредительного – 0,732.

Методика оптимизации планов путевых работ через определение остаточного ресурса и использование индексов состояния пути

При прогнозировании технического состояния пути важным показателем является

так называемый остаточный ресурс. В соответствии с принятой ГОСТ терминологией, остаточный ресурс объекта – это суммарная наработка от момента контроля его состояния до перехода в предельное состояние, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна [7, 10]. Таким образом, расчет остаточного ресурса должен основываться на расчетах надежности и экономической целесообразности дальнейшей эксплуатации пути.

Остаточный ресурс может выражаться в наработке тоннажа (на участках с высокой грузонапряженностью), в сроке службы в годах (на малодеятельных участках) или в доле ресурса в процентах.

Особенностью конструкции железнодорожного пути по сравнению с идеальным техническим объектом является то, что путь – многоэлементная конструкция, поэтому показатели надежности пути описываются сложными функциями, зависящими от состояния каждого элемента.

При последовательном соединении элементов вероятность отказов системы является суммой вероятностей отказов элементов, а при параллельном соединении элементов – произведением вероятности отказов. Верхнее строение пути можно рассматривать как сочетание последовательных и параллельных соединений, поэтому вероятность отказа может быть выражена как сочетание сумм и произведений вероятностей:

$$P_{\text{всп}} = \prod_{i=0}^{i=n} (P_i) = (P_1 + \dots + P_i) \times \\ \times (P_{i+1} + \dots + P_{i+k}) \cdot \dots \cdot (P_{m+1} + \dots + P_n),$$

где P_i – вероятность отказа или неисправности i -го элемента.

Полный ресурс исчерпывается при достижении некоторой критической суммы величины затрат на устранение отказов и затрат на плановые работы текущего содержания. Величина затрат пропорциональна объемам работ по устранению неисправностей, сле-

довательно, пропорциональна вероятности возникновения этих неисправностей.

В таком случае величина истощенного ресурса

$$T_{\text{исч}} = C \prod_{i=0}^{i=n} (v_i N_i),$$

где C – коэффициент пропорциональности для перевода доли истощения ресурса в наработку; v_i – коэффициент пропорциональности (весовой коэффициент), определяющий влияние фактора i на истощение ресурса верхнего строения; N_i – конкретный показатель состояния пути.

Тогда остаточный ресурс может быть определен как разница между полным и истощенным ресурсами:

$$T_{\text{ост}} = T_{\text{полн}} - T_{\text{исч}} = T_{\text{полн}} - C \prod_{i=0}^{i=n} (v_i N_i).$$

Если вместо величины N_i (показателя состояния пути) применить доли истощения каждым показателем состояния пути его предела (в доле от $N_{\text{крит}}$ – предельной величины показателя, предусмотренного нормативами)

$$M_i = \frac{(N_i - N_{\text{крит}})}{N_{\text{крит}}},$$

то остаточный ресурс можно выразить формулой

$$T_{\text{ост}} = T_{\text{полн}} - C \sum_{i=0}^{i=n} (\prod \mu_i M_i),$$

где C – коэффициент пропорциональности для перевода надежных показателей в наработку тоннажа; μ_i – весовой коэффициент, определяющий влияние фактора i на остаточный ресурс; M_i – доля истощения остаточного ресурса по отдельным показателям и элементам состояния пути.

При планировании ремонтов в качестве полного ресурса следует принимать такой ресурс, после достижения которого содержа-

ние пути без выполнения ремонта нецелесообразно. Это происходит, когда при продлении срока службы увеличивается общая СЖЦ, приходящаяся на один год службы. Для разработки оптимальных планов ремонта пути предложено пользоваться комплексным показателем P_j [15], представляющим собой долю истощения полного ресурса до достижения потребности в j -м виде ремонта пути, для которого определяется индекс:

$$P_j = \frac{T_{\text{исч}}}{T_{\text{полн}}} = \frac{C \sum_{i=0}^{i=n} (\prod \alpha_i N_i)}{T_{\text{полн}}}.$$

Заключение

Основной принятой решений в управлении состоянием верхнего строения пути должна быть оптимизация СЖЦ конструкции, позволяющая снизить общие затраты на его содержание.

Прогнозирование затрат должно опираться на закономерности изменения состояния пути и историю изменения состояния пути в прошлом. Прогноз следует основывать на технико-экономической модели работы верхнего строения пути согласно надежность-экономическим расчетам, учитывающим особенности верхнего строения как многоэлементной и восстанавливаемой конструкции.

Практическое прогнозирование показателей состояния пути должно учитывать как среднесетевые зависимости, так и историю изменения его состояния. Для прогнозирования состояния типовых конструкций и условий эксплуатации определены параметры среднесетевых зависимостей изменения показателей состояния пути. Для учета влияния различных конструкций пути, эксплуатационных условий и климатических факторов определены корректирующие коэффициенты.

Также расчетная продолжительность жизненного цикла верхнего строения пути должна определяться оптимизацией. Критерием оптимальности при решении этой задачи так-

же является стоимость жизненного цикла, отнесенная к одному году эксплуатации.

Библиографический список

1. Андреев А. В. Методика определения стоимости жизненного цикла конструкции пути с учетом прогнозирования технического состояния пути / А. В. Андреев // Путь XXI века : сб. науч. трудов междунар. науч.-методич. конф. – СПб. : ПГУПС, 2013. – С. 188–193.

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

3. Бельтюков В. П. Оптимизация системы содержания железнодорожного пути на основании прогнозирования изменения его состояния и затрат, связанных с его содержанием / В. П. Бельтюков // Путь XXI века : сб. науч. трудов III междунар. науч.-практич. конф., 20.02.2015. – СПб. : ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. – С. 14–23.

4. Бельтюков В. П. Оптимизация среднесрочного планирования ремонтов железнодорожного пути / В. П. Бельтюков, И. А. Симонюк, А. В. Андреев // Железнодорожный транспорт. – 2013. – № 9. – С. 47–50.

5. Бельтюков В. П. Оптимизация среднесрочных перспективных планов ремонтов железнодорожного пути / В. П. Бельтюков // Транспорт РФ. – 2011. – № 3. – С. 71–74.

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

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

8. ГОСТ 27.0022-009. Надежность в технике. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2011.

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

10. Методика составления расчетной модели жизненного цикла километра железнодорожного

пути (утв. вице-президентом ОАО «РЖД» В. А. Гапановичем 20.10.2012 г.).

11. Положение о системе ведения путевого хозяйства (утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 02.05.2012 г. № 857 р).

12. Симонюк И. А. Модель работы верхнего строения железнодорожного пути с позиции понятия о процессе восстановления / И. А. Симонюк // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : сб. науч. трудов междунар. науч.-практич. конф. – М. : МИИТ, 2013. – С. 221–223.

13. Симонюк И. А. Модель работы железнодорожного пути для прогнозирования технического состояния на этапе перспективного планирования / И. А. Симонюк // Путь XXI века : сб. науч. трудов междунар. науч.-методич. конф. – СПб. : ПГУПС, 2013. – С. 193–202.

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

15. Третьяков А. А. Использование комплексного индекса состояния пути при определении потребности реконструкции и капитальных ремонтов / А. А. Третьяков // Изв. ПГУПС. – 2015. – Вып. 3 (44). – С. 207–215.

References

1. Andreyev A. V. Metodika opredeleniya stoimosti zhiznennogo tsikla konstruktсии puti s uchetom prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya puti [Method for Estimating the Cost of Life Cycle of Track Element Taking into Account Forecast of Technical Condition of the Track]. *Put XXI veka: sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii (21st Century Track: Coll. Sci. Papers of the Int. Research and Methodology Conf.)*. St. Petersburg, PGUPS, 2013. Pp. 188-193.

2. Beltyukov V. P., Simonyuk I. A., Andreyev A. V. & Sennikova A. V. *Put i putevoye khozyaystvo – Track and Track Facilities*, 2014, no. 2, pp. 16-20.

3. Beltyukov V. P. Optimizatsiya sistemy soderzhaniya zheleznodorozhnogo puti na osnovanii prognozirovaniya izmeneniya yego sostoyaniya i zatrat, svyazannykh s yego soderzhaniiem [Optimisation of

Railway Track Maintenance System Based on Forecasting Changes in Its Condition and Expenses on Its Maintenance]. *Put XXI veka: sbornik nauchnykh trudov III mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii (21st Century Track: Coll. Sci. Papers of the 3rd Int. Research and Methodology Conf.)*, May 20, 2015. St. Petersburg, PGUPS, 2015. Pp. 14-23.

4. Beltyukov V. P., Simonyuk I. A. & Andreyev A. V. *Zheleznodorozhnyy transport – Railway Transport*, 2013, no. 9, pp. 47-50.

5. Beltyukov V. P. *Transport Rossiyskoy Federatsii – Transport of the Russian Federation*, 2011, no. 3, pp. 71-74.

6. Gapanovich V. A. *Zheleznodorozhnyy transport – Railway Transport*, 2013, no. 6, pp. 26-34.

7. GOST R 55443-2013. *Zheleznodorozhnyy put. Nomenklatura pokazateley nadezhnosti i funktsionalnoy bezopasnosti [Railway Track. Nomenclature of Safety Indices and Functional Safety]*. Moscow, Standartinform, 2013.

8. GOST 27.0022-009. *Nadezhnost v tekhnike. Terminy i opredeleniya [Technical Reliability. Terms and Definitions]*. Moscow, Standartinform, 2011.

9. Yermakov V. M. *Zheleznodorozhnyy transport – Railway Transport*, 2012, no. 10, pp. 49-50.

10. Metodika sostavleniya raschetnoy modeli zhiznennogo tsikla kilometra zheleznodorozhnogo puti [Method for Compiling a Calculation Model of Life Cycle of a Single Kilometer of Railway Track], enacted by Russian Railways JSC from Oct. 20, 2012.

11. Polozheniye o sisteme vedeniya putevogo khozyaystva [Regulation on Track Facilities Maintenance System], enacted by Russian Railways JSC from May 2, 2012.

12. Simonyuk I. A. Model raboty verkhnego stroyeniya zheleznodorozhnogo puti s pozitsii ponyatiya o protsesse vosstanovleniya [Model of Operation of Railway Track Superstructure from the Position of Understanding Recovery Process]. *Sovremennyye problemy proyektirovaniya, stroitelstva i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti: sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Contemporary Issues in Design, Construction and Operation of Railway Track: Coll. Sci. Papers of the Int. Research and Practice Conf.)*. Moscow, MIIT, 2013. Pp. 221-223.

13. Simonyuk I. A. Model raboty zheleznodorozhnogo puti dlya prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya na etape perspektivnogo planirovaniya [Railway Track Operation Model for Forecasting Technical Condition in Long-Term Planning Stage]. *Put XXI veka: sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii (21st Century Track: Coll. Sci. Papers of the Int. Research and Methodology Conf.)*. St. Petersburg, PGUPS, 2013. Pp. 193-202.

14. Tekhnicheskiye usloviya na raboty po rekonstruktsii (modernizatsii) i remontu zheleznodorozhnogo puti [Technical Conditions for Operations in Reconstruction (Modernisation) and Repair of Railway Track], enacted by Russian Railways JSC from Jan. 18, 2013.

15. Tretyakov A. A. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2015, Is. 3 (44), pp. 207-215.

БЕЛЬТЮКОВ Владимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, bw@peterlink.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 624.82/85 (075.8)

Г. И. Богданов, И. И. Рыбина, А. А. Антонюк**РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ РАЗВОДНОГО МОСТА РАСКРЫВАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ**

Дата поступления: 13.04.2016

Решение о публикации: 23.05.2016

Цель: Исследовать влияние вынужденных – ввиду пространственной несогласованности – деформаций элементов пролетного строения разводного моста раскрывающейся системы на его напряженно-деформированное состояние. **Методы:** Для расчетно-теоретического исследования выбран метод компьютерного, или численного, моделирования, так как при изучении рассматриваемой проблемы он имеет ряд преимуществ: визуализацию объекта исследования, ускорение и замедление процессов разрушения, исследование процессов и явлений в динамике и т. д. **Результаты:** Проведены расчетно-теоретические исследования напряженно-деформированного состояния радиальных ребер жесткости трубчатой втулки и элементов главных балок. Рассмотрены два состояния пролетного строения: разведенное, при котором пролетное строение опирается на ось вращения, и наведенное, при котором пролетное строение опирается на качающиеся стойки. При этом учтена пространственная несогласованность как подшипников осей вращения, так и опорных поверхностей балансиров качающихся стоек. Приведены расчетные схемы, моделирующие только интересующую область главных балок, включающую область у осей вращения. **Практическая значимость:** Расчетно-теоретические исследования вносят вклад в комплексное решение указанной задачи, так как появляется возможность правильно и обоснованно оценить влияние рассматриваемого дефекта на работу конструкции и принять оптимальные решения, связанные с дальнейшей эксплуатацией конструкции.

Напряженно-деформированное состояние, раскрывающаяся система, разводной мост, ось вращения, ребро жесткости, сварной шов, трещины, смещение.

Gennadiy I. Bogdanov, Cand. Eng., professor, gibgdnv@rambler.ru; **Irina I. Rybina**, Cand. Eng., assistant professor, i.i.rybina@rambler.ru; ***Anatoliy A. Antonyuk**, postgraduate student, AAA.12.03.1992@mail.ru (Petersburg State Transport University) **CALCULATION AND THEORETICAL STUDY OF STRESS-STRAIN STATE OF BASCULE BRIDGE SUPERSTRUCTURE**

Objective: To study the influence of deformations of superstructure elements of bascule bridge forced by spatial misadjustment on its stress-strain state. **Methods:** The method of computer, or numerical simulation was selected for calculation and theoretical study as it offers several advantages for the study of the problem under consideration – visualisation of study subject, acceleration and deceleration of destruction processes, dynamic study of processes and phenomena and so on. **Results:** Calculation and theoretical studies of stress-strain state of radial reinforcement ribs of tube bushing and main beam elements. Two conditions of bridge superstructure are considered, the drawn condition, wherein the superstructure is leaning on pivotal axis, and closed condition, in which superstructure leans on gantry pillars. Spatial misadjustment of both pivotal axis bearings and bearing surface of gantry pillars' balance beams is taken into account. Calculation schemes which simulate only the main beams' part that is of interest, including the area near pivotal axes. **Practical importance:** Calculation and theoretical studies contribute to complex solution of this problem as it allows for a correct and justified evaluation of the influence of defect under consideration on the structure operation and to take optimal solutions regarding the structure's further operation.

Stress-strain state, bascule system, bascule bridge, pivotal axis, reinforcement rib, welded joint, fractures, displacement.

Разрушение сварных швов связано, очевидно, с чрезмерными напряжениями в радиальных ребрах жесткости, превышающими прочностные характеристики металла в швах. Величина напряжений в радиальных ребрах жесткости приведена в результатах натурных исследований [5]. Измерение напряжений в радиальных ребрах жесткости низовой и верховой главных балок показало, что величина напряжений определяется не только углом поворота крыла, но и взаимным положением подшипников осей вращения [1, 3, 4, 15]. Разброс напряжений на кромках ребер жесткости, одинаково ориентированных, но расположенных с разных сторон (низовой и верховой) стенок главных балок, достигал 15–96 МПа. Такое неравномерное нагружение кромок радиальных ребер жесткости объясняется изгибом стенок главных балок, который возникает из-за несоосного положения осей вращения, следовательно, одновременный поворот всех главных балок невозможен без изгибов как в стенках главных балок, так и в подкрепляющих их ребрах. В соответствии с исследованиями

[5], значения изгибающих моментов для ребер достигало 338–370 КНм. С учетом всех особенностей работы ребер жесткости и опорных стоек максимальные расчетные напряжения, возникающие от действия собственного веса крыла, от влияния неравномерного опирания главных балок на качающиеся стойки и несоосного положения подшипников осей вращения, могут достигать 210 МПа (в ребрах) [5]. Не следует забывать и про остаточные напряжения в сварных швах, которые, суммируясь с максимальными расчетными напряжениями, являются причиной разрушения (образования трещин) сварных швов.

Для выполнения расчетов использован программный комплекс MIDAS Civil 2011, верифицированный РААСН [14].

На начальном этапе расчетно-теоретического исследования была создана расчетная схема всего разводного крыла. Однако она не отражала локальные особенности работы крыла, главным образом, вблизи оси вращения и области опирания главных балок на качающиеся стойки [14].

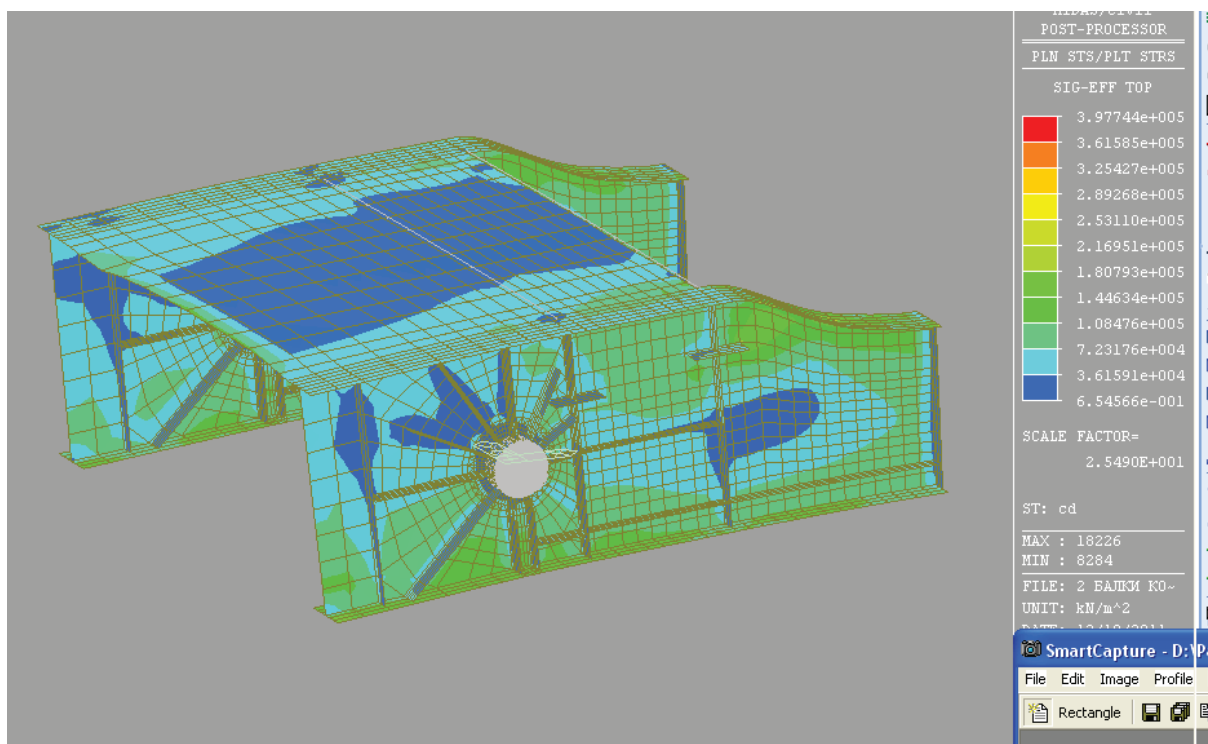


Рис. 1. Упрощенная расчетная модель

После предварительных оценочных расчетов и экспертной оценки специалистов по работе разводного крыла с учетом дефектов в сварных швах была составлена более упрощенная схема, включающая в себя две главные балки в области оси вращения (рис. 1).

Дальнейший анализ результатов позволил считать, что основной причиной возникновения отмечаемых дефектов сварных швов являются напряжения, возникающие из-за перемещений, вызываемых выявленной несоосностью осей вращения и нарушением проектного положения качающихся стоек [5, 7, 9, 11], поэтому расчет на заданные смещения оси и на единичные смещения качающейся стойки сделали только для части упрощенной расчетной схемы (рис. 2), куда вошли часть крайней балки (балка Б1) длиной 8,1 м, примыкающая к ней ортотропная плита шириной 3,9 м, ось вращения, связи и приводные балки.

Вдоль зоны контакта с остальным пролетным строением блок считается заземленным.

Балку с ребрами и ортотропную плиту моделируют плоскими элементами, ось – объемными элементами, связи и приводные балки – стержнями.

Количество элементов расчетной модели: 12 725 узлов; 67 стержневых конечных элементов; 5607 двумерных конечных элементов; 5344 объемных конечных элемента.

Посадка крыла на качающиеся стойки – наведенное положение

При опирании крыла на качающиеся стойки возможны следующие вынужденные деформации [7, 9, 10]:

- разновысотное положение крайних точек опирания нижнего пояса балки из-за того, что опорная поверхность балансира качающейся стойки не горизонтальна (эквивалентно повороту нижнего пояса при опирании на качающуюся стойку);
- линейные смещения узла опирания главной балки в вертикальном направлении из-за разновысотного положения опорных поверхностей балансиров качающихся стоек разных главных балок;
- линейные смещения узла опирания поперек и вдоль плоскости стенки главной балки вследствие деформаций качающихся стоек из-за их внецентренного сжатия.

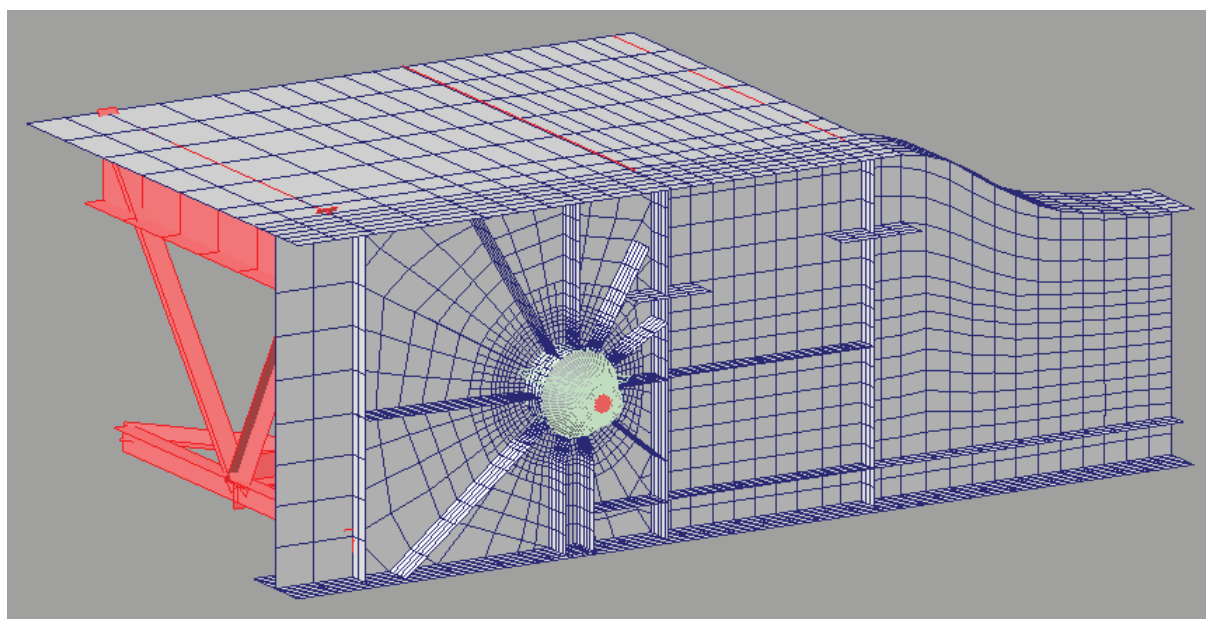


Рис. 2. Рабочая расчетная модель

При данном расчете опирание балок моделировали в виде двух узлов, присоединенных к нижнему поясу балки с помощью абсолютно жестких тел (рис. 3).

Смещения опорных узлов, для которых выполнен расчет, приведены в табл. 1. Значения рассматриваемых смещений получены в ре-

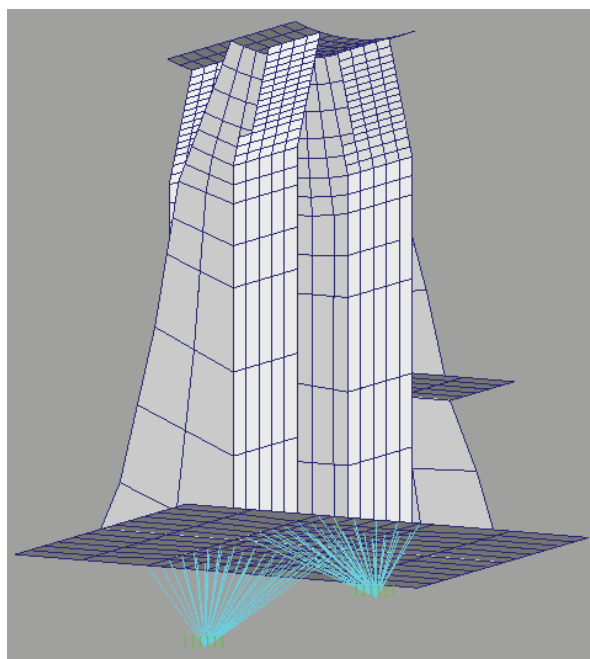


Рис. 3. Фрагмент расчетной модели в месте опирания на качающуюся стойку

зультате натурного исследования главных балок Володарского разводного моста в г. Санкт-Петербурге.

Вынужденные смещения с учетом данных табл. 1 показаны на рис. 4–6 [5, 12]. Значения напряжений, приводящих к образованию трещин в ребрах, полученные в результате расчета, приведены в табл. 2.

Графические напряжения показаны в полях эффективных напряжений (интенсивность напряжений по критерию пластичности Мизеса) (рис. 7–9).

Посадка крыла на оси вращения – положение при разводке крыла

Согласно данным, приведенным в [5, с. 140, рис. 9, 10], построена схема деформаций, вызванных поворотом оси вращения балки в плоскости сечения (рис. 10).

На рис. 11 представлены результаты расчета напряжений в зоне вокруг отверстия и в ребрах для приведенной на рис. 10 схемы деформаций, вызванных поворотом оси вращения балки.

Характерные значения напряжений приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 1. Расчетные смещения опорных узлов нижнего пояса главной балки, мм

Направление смещений	Величина смещений	
По вертикали	$Z_1 = +1,0$	$Z_2 = -1,0$
Перпендикулярно оси балки	$Y_1 = Y_2 = +1,0$	
Вдоль оси балки	$X_1 = X_2 = +1,0$	

ТАБЛИЦА 2. Характерные значения напряжений, МПа

Смещения качающейся стойки	Наибольшие эффективные напряжения в зоне образования трещин	Главные напряжения
По вертикали	~ 250	-230...+240
Поперек оси балки	~ 30	-20...+30
Вдоль оси балки	~ 60	-60...+30

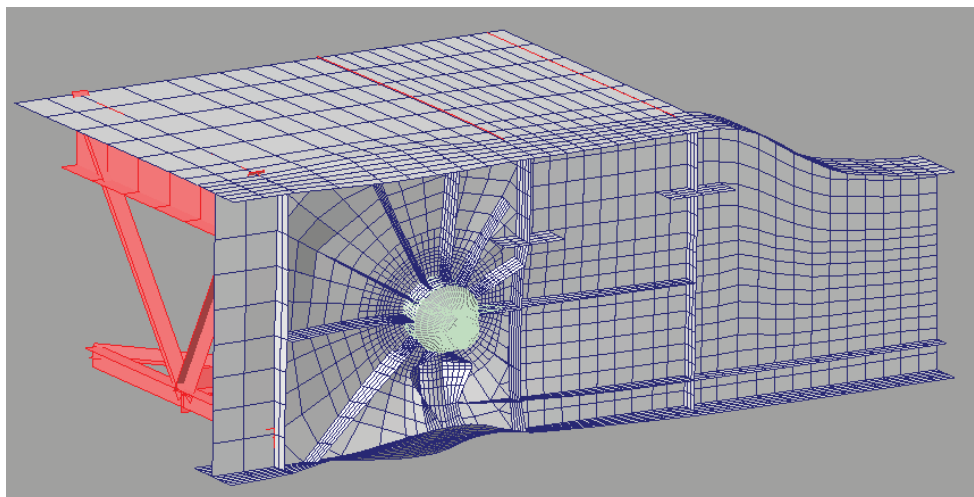


Рис. 4. Деформации, вызванные разнонаправленным смещением по вертикали (кручение нижнего пояса)

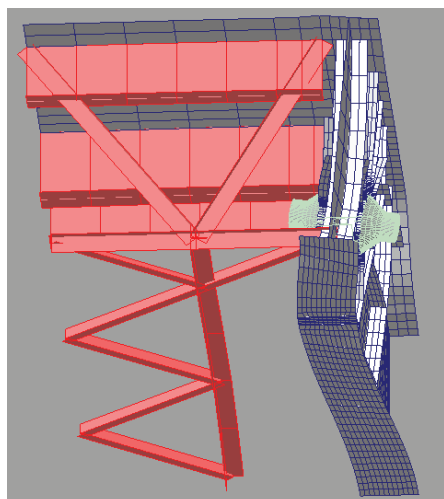


Рис. 5. Деформации, вызванные смещением поперек оси балки

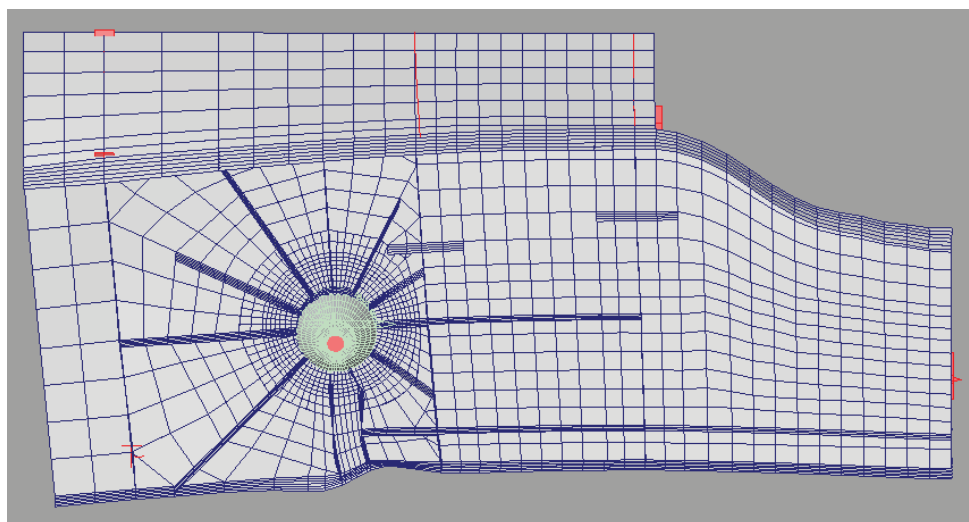


Рис. 6. Деформации, вызванные смещением опорных узлов вдоль оси моста

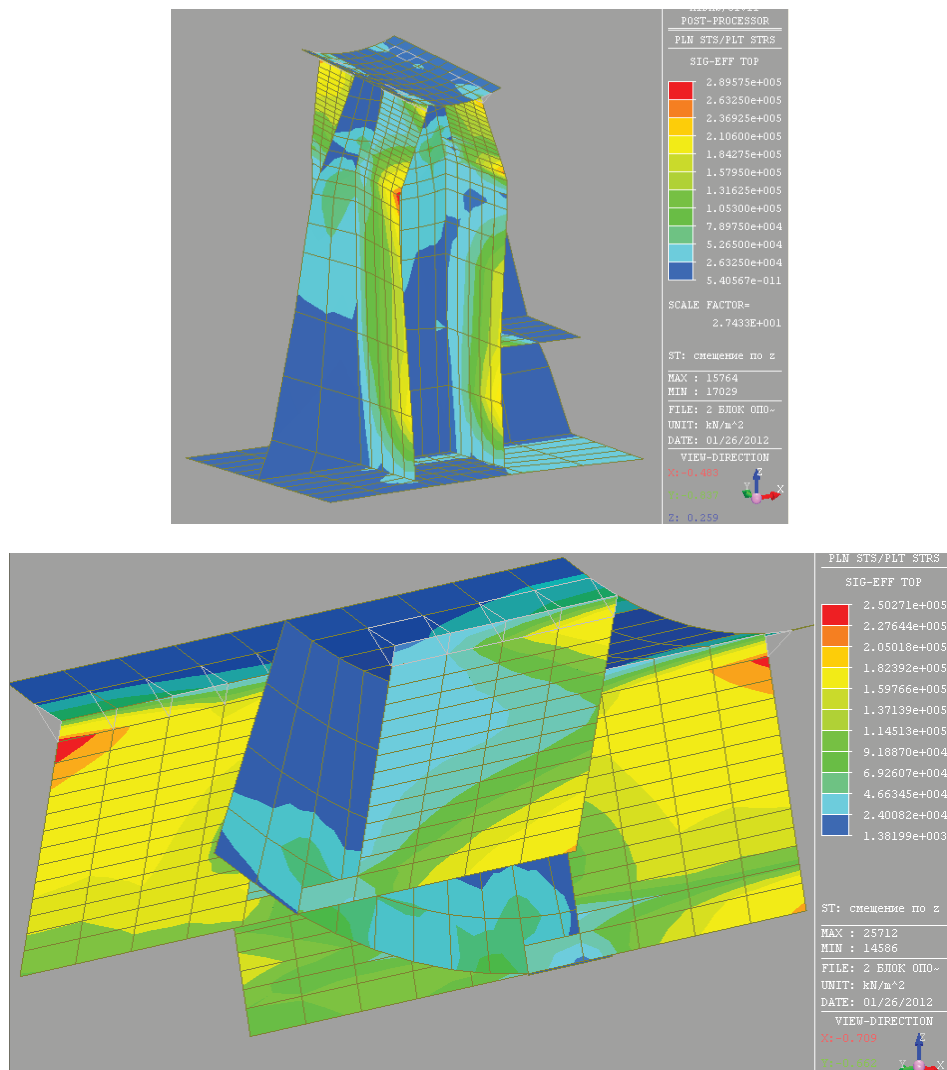


Рис. 7. Эффективные напряжения в опорных ребрах при смещении по вертикали

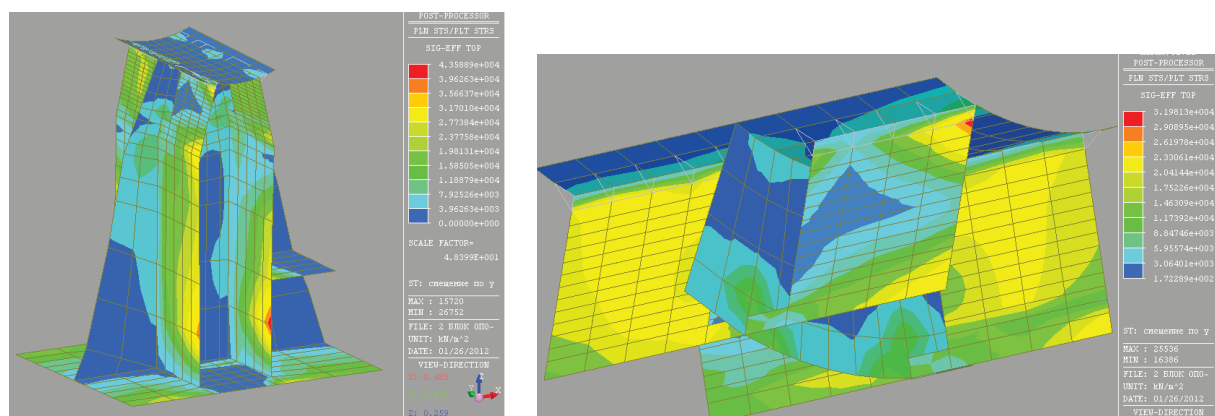


Рис. 8. Эффективные напряжения в опорных ребрах при смещении в поперечном направлении по горизонтали:

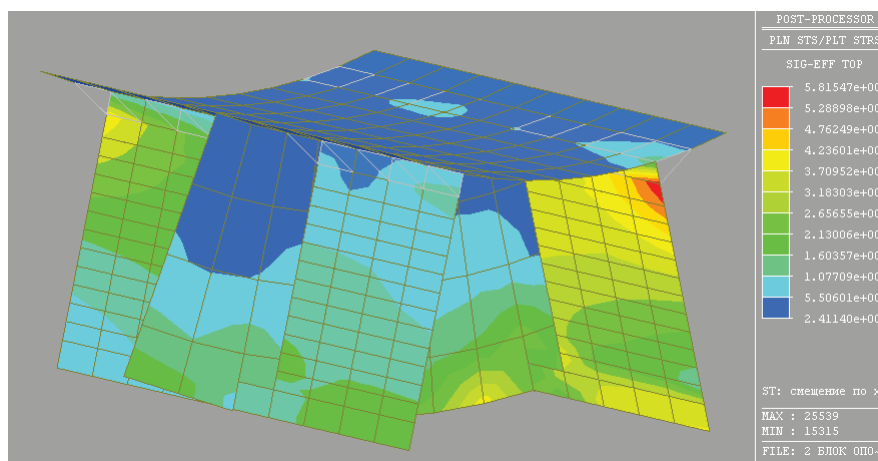
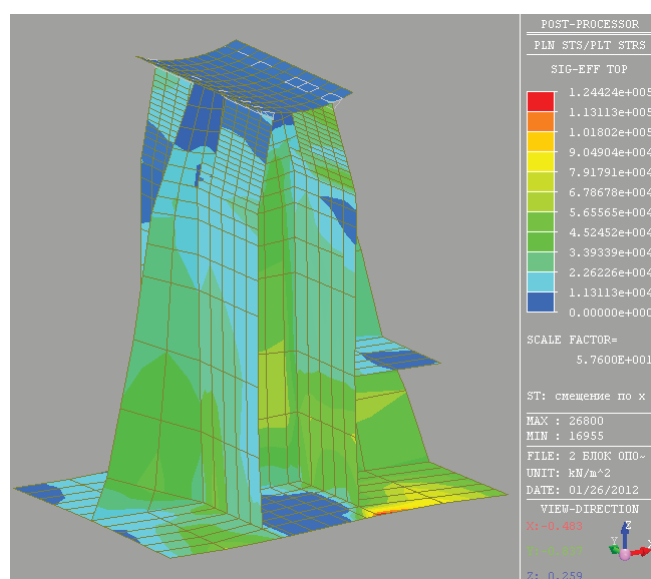


Рис. 9. Эффективные напряжения в опорных ребрах при смещении вдоль оси моста

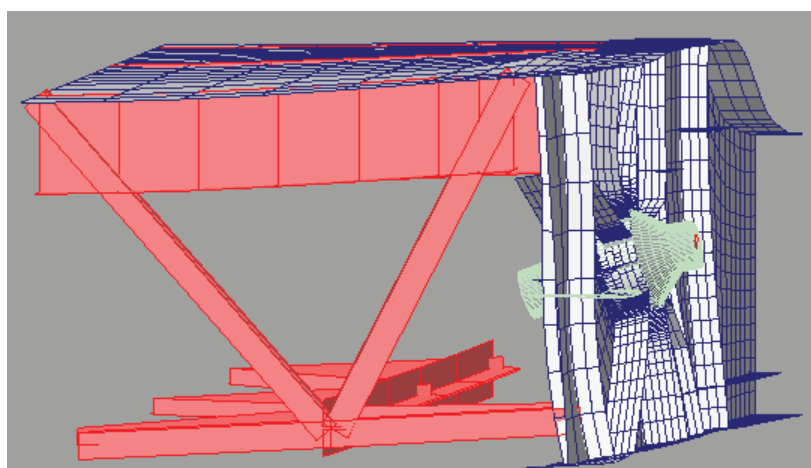


Рис. 10. Схема деформаций, вызванных поворотом оси вращения балки

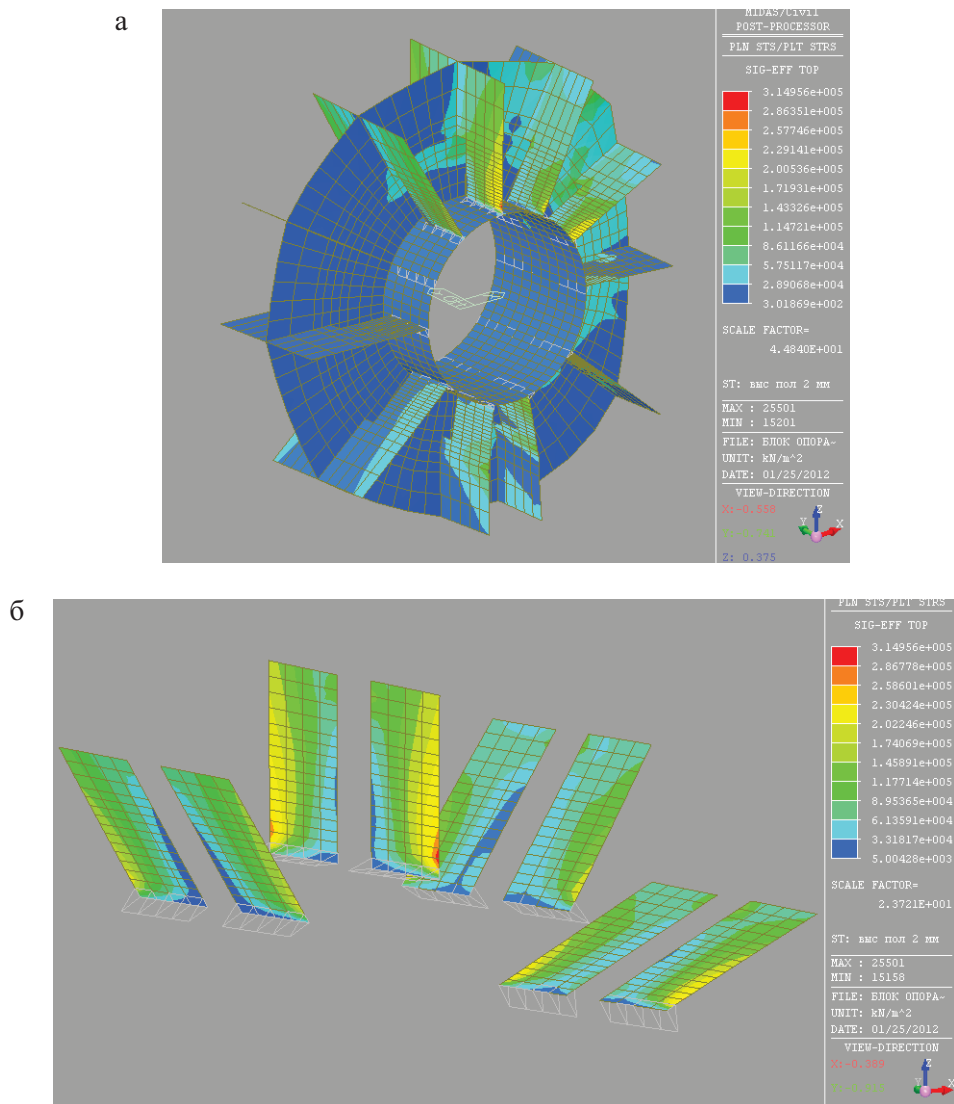


Рис. 11. Эффективные напряжения в зоне при повороте оси:
а) вокруг отверстия; б) в ребрах (фрагмент)

ТАБЛИЦА 3. Характерные значения напряжений, МПа

Вариант расчета	Наибольшие эффективные напряжения в зоне образования трещин	Главные напряжения
Поворот оси в плоскости сечения балки	~ 310	–260...+240
Смещение оси	~ 80	–80...+40

Оценка сварочных напряжений

На напряженное состояние ребер жесткости влияют остаточные сварочные напря-

жения, возникающие в первую очередь в тех областях, где разрушаются сварные швы, поэтому мы попытались оценить воздействие сварочных напряжений [2, 6, 8, 13].

Воздействие сварки на напряженное состояние ребер моделировали как изменение температуры объемных элементов в месте соединения ребра и цилиндрической втулки на 500 °С. Высота сечения призматических элементов, имитирующих сварной шов, была принята равной 15 мм.

Расчетная схема, принятая при оценке сварочных напряжений, приведена на рис. 12. В расчете рассматривали наложение сварного шва одного из нижних и одного из верхних ребер.

Напряженное состояние верхнего и нижнего сварного шва ребра показаны на рис. 13.

Максимальные значения напряжений в ребрах приведены в табл. 4.

Как видно, сварочные напряжения могут достигать значительной величины и действуют только в области сварного шва.

Естественно, принятые расчетная схема и расчетная температура достаточно условны. Однако приведенная оценка позволяет считать, что сварочные напряжения могут достигать больших величин именно в области сварных швов и серьезно влиять на напряженное состояние ребер в тех зонах, где отмечаются исследуемые дефекты.

Заключение

Расчетно-теоретические исследования напряженно-деформированного состояния пролетного строения разводного моста раскрывающейся системы подтвердили, что образование трещин связано с возникновением чрезмерных напряжений в сварных швах прикрепления ра-

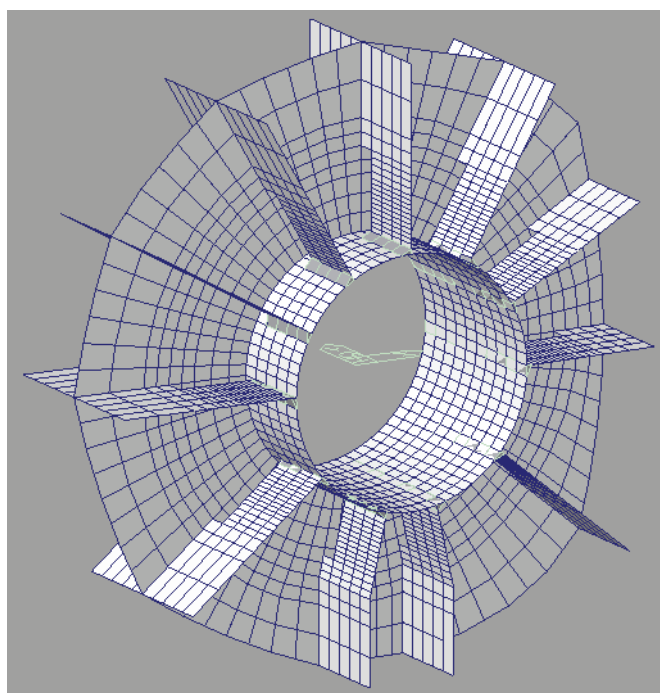


Рис. 12. Конечные элементы, моделирующие сварной шов в месте соединения ребер и втулки

ТАБЛИЦА 4. Максимальные значения напряжения в ребрах, МПа

Ребро	Наибольшие эффективные напряжения в зоне образования трещин	Главные напряжения
Верхнее, толщиной 20 мм	~ 520	–1230...+650
Нижнее, толщиной 32 мм	~ 390	–800...+390

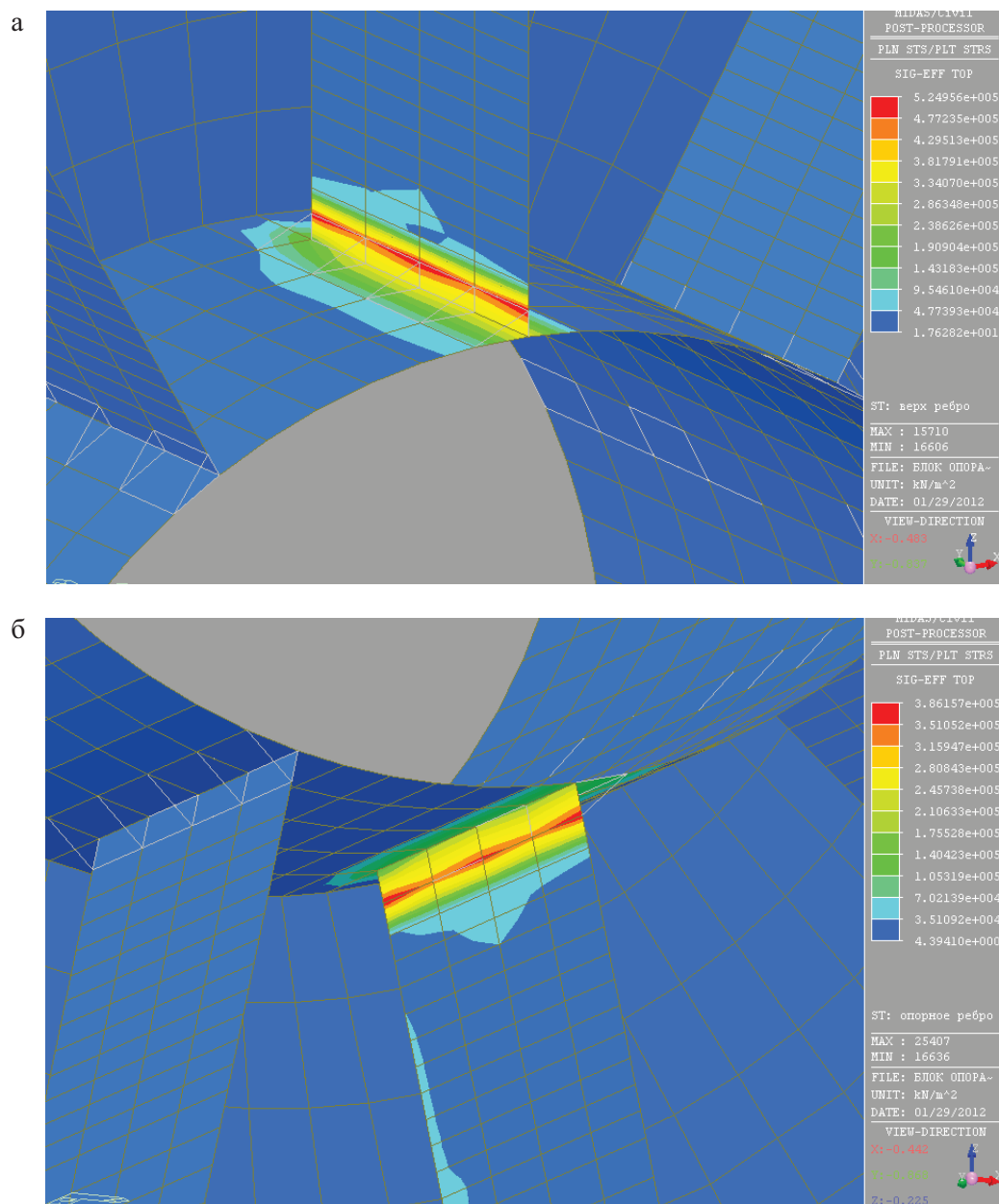


Рис. 13. Напряженное состояние сварного шва:
а) верхнего ребра; б) нижнего ребра

диальных ребер жесткости к трубчатой втулке из-за вынужденных деформаций конструкции вследствие пространственной несогласованности опорных узлов и элементов оси вращения. При появлении трещин чрезмерные напряжения в швах устраняются, но при этом изменяется напряженно-деформированное состояние главных балок в областях, примыкающих к опорным узлам – к качающимся стойкам и осям вращения.

Также следует отметить, что полученные результаты следует применять только для приближенной оценки изменения напряженно-деформируемого состояния конструкции. Однако практическая значимость рассматриваемой задачи чрезвычайно велика, так как ее решение поможет правильно оценивать влияние рассматриваемого дефекта на работу конструкции и принимать оптимальные решения, связанные с ее дальнейшей эксплуатацией.

Библиографический список

1. Богданов Г. И. Натурные исследования работы элементов главных балок пролетных строений разводных мостов раскрывающейся системы у осей вращения / Г. И. Богданов // Изв. ПГУПС. – 2014. – Вып. 3 (40). – С. 135–143.

2. Богданов Г. И. Проектирование мостов и труб. Разводные мосты : учеб. пособие / Г. И. Богданов. – М. : УМЦ по образованию на ж.-д. транспорте, 2013. – 248 с.

3. Богданов Г. И. Способы разгрузки осей вращения раскрывающихся мостов и стабильность их пространственного положения / Г. И. Богданов // Украинский межотраслевой науч.-практич. семинар «Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення», 30 червня – 1 липня 1998 р., Київ : сб. докл. – Киев, 1998. – С. 13–16.

4. Богданов Г. И. Техническая диагностика раскрывающихся мостов / Г. И. Богданов // Украинский межотраслевой науч.-практич. семинар «Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення», 30 червня – 1 липня 1998 р., Київ : сб. докл. – Киев, 1998. – С. 23–27.

5. Богданов Г. И. Учет деформаций при оценке напряженно-деформированного состояния конструкций раскрывающихся мостов / Г. И. Богданов // Изв. ПГУПС. – 2011. – Вып. 4 (29). – С. 29–36.

6. Гатовский К. М. Теория сварочных деформаций и напряжений / К. М. Гатовский, В. А. Кархин. – Л. : ЛКИ, 1980. – 331 с.

7. Евграфов Г. К. Разводные мосты / Г. К. Евграфов. – М. : Трансжелдориздат, 1950. – 404 с.

8. Игнатъев А. Г. Определение остаточных напряжений при сварке труб из стали 45 / А. Г. Игнатъев, Г. П. Пызин // Вопросы сварочного производства : сб. науч. тр. – Челябинск : ЧГТУ, 1994. – С. 31–35.

9. Колесников Я. А. Численное моделирование сварного соединения из стали 15×5 м и оценка его напряженно-деформированного состояния / Я. А. Колесников, М. З. Ямилов, М. Р. Фазылов // Строительство уникальных зданий и сооружений : сб. науч. тр. – Уфа, 2008. – С. 135–151.

10. Кондратов В. В. Особенности динамической работы пролетных строений разводных мостов раскрывающейся системы / В. В. Кондратов, Г. И. Богданов // Изв. ПГУПС. – 2013. – Вып. 1 (34). – С. 100–108.

11. Кондратов В. В. Оценка долговечности разводных мостов раскрывающейся системы при отсутствии подклинки противовеса / В. В. Кондратов, Г. И. Богданов // Изв. ПГУПС. – 2013. – Вып. 1 (34). – С. 96–99.

12. Крыжановский В. И. Разводные мосты / В. И. Крыжановский. – М. : Транспорт, 1967. – 257 с.

13. Сальманов И. Д. Остаточные напряжения и деформации при сварке / И. Д. Сальманов, М. Ю. Барановский, В. А. Тарасов // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 12 (27). – С. 64–75.

14. Koglin T. L. Movable bridge engineering. – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.

15. MIDAS IT Россия и СНГ. – URL: <http://midasit.ru/products/products.asp?strCate=midasCivil> (дата обращения 12.03.2016).

References

1. Bogdanov G. I. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2014, Is. 3 (40), pp. 135–143.

2. Bogdanov G. I. *Proyektirovaniye mostov i trub. Razvodnyye mosty: uchebnoye posobiye* [Designing Bridges and Pipes. Bascule Bridges: Course Guide]. Moscow, UMTs po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2013. 248 p.

3. Bogdanov G. I. *Sposoby razgruzki osey vrashcheniya raskryvayushchikhsya mostov i stabilnost ikh prostranstvennogo polozheniya* [Methods for Unloading Rotation Axis of Bascule Bridges and Stability of Their Spatial Location]. *Ukrainskiy mezhotraslevoy nauchno-prakticheskiy seminar “Suchasni problemy proektuvannya, budivnytstva ta ekspuatatsii sporud na shlyakhakh spoluchennya”* (Coll. Papers of Ukrainian Inter-Industry Sci. and Practical Seminar “Modern Problems of Designing, Building and Operating Structures on Communication Tracks). Jun. 30 – Jul. 1, 1998, Kyiv. Kyiv, 1998. Pp. 13–16.

4. Bogdanov G. I. *Tekhnicheskaya diagnostika raskryvayushchikhsya mostov* [Technical Diagnos-

tics of Bascule Bridges]. *Ukrainskiy mezhotraslevoy nauchno-prakticheskyy seminar "Suchasni problemy proektuvannya, budivnytstva ta eksploatatsii sporud na shlyakhakh spoluchennya"* (Coll. Papers of Ukrainian Inter-Industry Sci. and Practical Seminar "Modern Problems of Designing, Building and Operating Structures on Communication Tracks). Jun. 30 – Jul. 1, 1998, Kyiv. Kyiv, 1998. Pp. 23-27.

5. Bogdanov G.I. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2011, Is. 4 (29), pp. 29-36.

6. Gatovskiy K.M. & Karkhin V.A. *Teoriya svarochnykh deformatsiy i napryazheniy* [Theory of Welding Deformations and Strains]. Leningrad, LKI, 1980. 331 p.

7. Yevgrafov G.K. *Razvodnyye mosty* [Draw Bridges]. Moscow, Transzheldorizdat, 1950. 404 p.

8. Ignatyev A.G. & Pyzin G.P. *Opredeleniye ostatochnykh napryazheniy pri svarke trub iz stali 45* [Estimation of Residual Strain in Welding Pipes Made from 45 Steel]. *Voprosy svarochnogo proizvodstva: sbornik nauchnykh trudov* (Welding Industry Issue: Coll. Sci. Papers). Chelyabinsk, ChGTU, 1994. Pp. 31-35.

9. Kolesnikov Ya.A., Yamilov M.Z. & Fazylov M.R. *Chislennoye modelirovaniye svarnogo*

soyedineniya iz stali 15x5 m i otsenka yego napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya [Numerical Simulation of Welded Connection from 15 by 5 m Steel and Evaluation of Its Stress-Strain State]. *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy: sbornik nauchnykh trudov* (Construction of Unique Buildings and Structures: Coll. Sci. Papers). Ufa, 2008. Pp. 135-151.

10. Kondratov V.V. & Bogdanov G.I. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2013, Is. 1 (34), pp. 100-108.

11. Kondratov V.V. & Bogdanov G.I. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2013, Is. 1 (34), pp. 96-99.

12. Kryzhanovskiy V.I. *Razvodnyye mosty* [Draw Bridges]. Moscow, Transport, 1967. 257 p.

13. Salmanov I.D., Baranovskiy M.Yu. & Tarasov V.A. *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy – Construction of Unique Buildings and Structures*, 2014, no. 12 (27), pp. 64-75.

14. Koglin T.L. *Movable bridge engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.

15. MIDAS IT Russia and CIS, available at: <http://midasit.ru/products/products.asp?strCate=midasCivil>.

БОГДАНОВ Геннадий Иванович – канд. техн. наук, профессор, gibgdnv@rambler.ru; РЫБИНА Ирина Игоревна – канд. техн. наук, доцент, i.i.rybina@rambler.ru; *АНТОНЮК Анатолий Анатольевич – аспирант, AAA.12.03.1992@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.4.017

Ю. П. Бороненко, Ю. Б. Житков**УТОЧНЕНИЕ СИЛОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
СВЯЗИ КУЗОВА ВАГОНА С ТЕЛЕЖКАМИ
ПРИ ПЕРЕВАЛКЕ НА ПЛОСКИХ ПЯТНИКАХ**

Дата поступления: 11.03.2016

Решение о публикации: 31.03.2016

Цель: Уточнить силовую характеристику связи кузова вагона с тележками при перевалке на плоских пятниках и выявить зависимости между восстанавливающим моментом, шириной зоны контакта пятник – подпятник и углом наклона кузова. **Методы:** Применялось математическое моделирование перевалки кузова вагона на пятнике с представлением модели пятника в виде упруго-безынерционного основания (основания Винклера). **Результаты:** Выявлена мягкая силовая характеристика связи, установлены нелинейные зависимости ширины зоны контакта и частоты свободных колебаний от угла наклона кузова. Проведен сравнительный анализ результатов с другими существующими моделями. Показаны преимущества предложенной модели в точности определения частоты свободных колебаний. **Практическая значимость:** Приводится пример расчета силовой характеристики и построения скелетной кривой для полувагона модели 12-132. Предложенная модель повышает точность расчетов. Она рекомендуется для использования при оценке динамических качеств грузовых вагонов.

Нелинейные колебания, вагон, силовая характеристика, скелетная кривая, возвращающий момент, восстанавливающий момент, ширина зоны контакта, пятник, подпятник.

Yuriy P. Boronenko, D. Eng., professor, department chair boron49@yandex.ru; ***Yuriy B. Zhitkov**, postgraduate student, zhitkov-nvc@ya.ru (Petersburg State Transport University) UPDATING POWER CHARACTERISTIC OF RAILCAR BODY LINKAGE WITH BOGIES DURING TRANSSHIPMENT ON FLAT CENTRE PLATES

Objective: To specify power characteristic of railcar body linkage with bogies during transshipment on flat centre plates and to establish dependencies between restoring torque, width of centre plate – centre bowl contact zone, and body inclination angle. **Methods:** Non-linear oscillations arising during railcar body transshipment on flat centre plates are considered as mathematical simulation. To specify the power characteristic of the railcar body linkage with bogies, a centre plate is represented in the form of a resilient-inertia-free base (Winkler foundation). **Results:** The width of the contact area in the centre plate – centre bowl connection depending on the body inclination angle is calculated, and the linkage power characteristic is constructed. **Practical importance:** An example of power characteristic calculation and backbone curve construction for 12-132 model gondola car is provided. It is shown that the proposed approach enables to take into consideration peculiarities of the non-linear linkage – soft power characteristic. Precision of calculation is increased, and is recommended for evaluation of dynamic qualities of freight cars.

Non-linear oscillations of a railcar, railcar, power characteristic, backbone curve, returning torque, restoring torque, width of the centre-plate-centre bowl contact area, body centre plate, centre bowl.

У большинства грузовых вагонов, которые эксплуатируются в странах железных дорог колеи 1520 мм, кузов опирается на тележки через узел «пятник – подпятник» и скользуны. Между скользунами, которые расположены на тележках и кузове, предусматриваются зазоры или устанавливаются упругие элементы. Следствием такого способа опирания является перевалка кузова на пятниках.

Из-за перевалки кузова ухудшаются ходовые качества вагона, появляются перегрузки в шкворневых узлах во время движения [2], а в месте контакта пятник – подпятник возникают износы, наличие которых требует регулировать зазоры между скользунами [1]. Современные тележки оборудованы более сложными упругодемпфирующими скользунами [9], которые позволяют уменьшить колебания кузова и влияние тележек, тем самым улучшая ходовые качества и работу узла «пятник – подпятник».

В настоящее время признана необходимость учитывать перевалку кузова при исследовании динамики, прочности вагона и износа узла «пятник – подпятник». Но математическая модель, описывающая это соединение, представляется в упрощенном виде: как цилиндрическая поверхность [10], шарнир с параллельными линейно-упругими элементами [7, 10] или абсолютно твердое тело, которое качается поочередно относительно

крамок пятника [2]. Такие способы моделирования не позволяют выявить все особенности перевалки кузова.

В нелинейной механике наиболее близкой к рассматриваемой проблеме является задача о колебаниях качающегося параллелепипеда [4], который поочередно вращается вокруг нижних граней. Но получаемое при этом решение имеет ограниченное применение. Так, согласно нему, при уменьшении амплитуды колебания кузова частота стремится к бесконечности, в то время как, исходя из результатов эксперимента [8], известно, что она не превышает 3 Гц.

Необходимо уточнить силовые характеристики связи кузова вагона с тележками, а именно величину восстанавливающего момента и ширину зоны контакта пятник – подпятник в зависимости от угла наклона кузова.

Расчетная схема и математическая модель

При исследовании перевалки кузова детально рассматривалось место контакта пятник – подпятник (рис. 1а). Наличие отверстия в центре пятника предполагает кольцевую опорную поверхность, однако при колебаниях кузова средняя часть пятника практически не нагружена и за опорную поверхность пятника

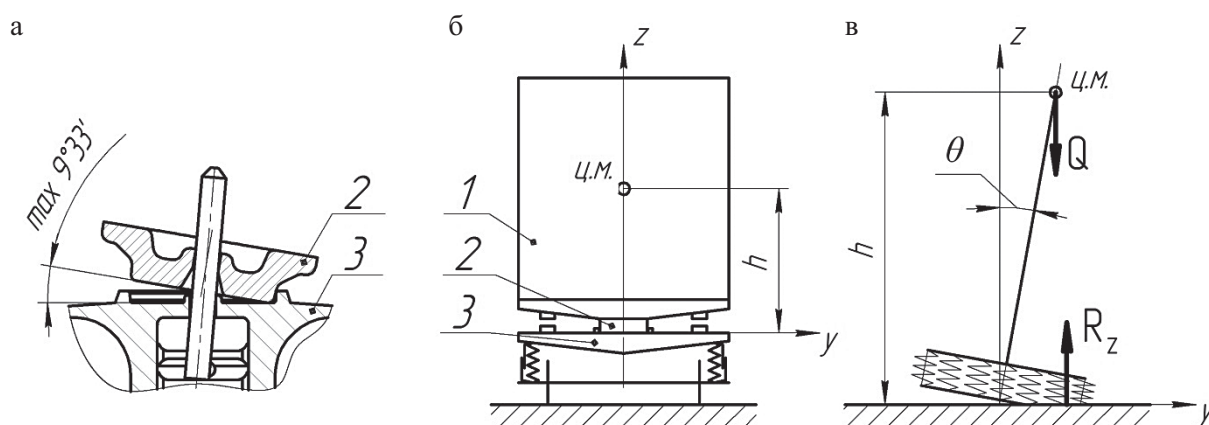


Рис. 1. Схема связи кузова вагона с тележкой: место контакта пятник – подпятник (а), схема опирания кузова на надрессорную балку тележки (б); расчетная схема перевалки кузова на пятнике (в): 1 – кузов; 2 – пятник; 3 – надрессорная балка с подпятником

принимался круг. На рис. 1б представлена схема опирания кузова на наддрессорную балку тележки с зазорами между скользящими. Расчетная схема перевалки кузова на пятнике без учета упора скользящих показана на рис. 1в.

Уравнение перевалки кузова имеет вид

$$J_x \ddot{\theta} = M_Q - M_R = M_{\text{восст}}, \quad (1)$$

где момент

$$M_Q = Qh \sin(\theta). \quad (2)$$

Для поиска силовой характеристики $M_{\text{восст}}(\theta)$, а также зависимости между шириной ξ зоны контакта пятник – подпятник и углом θ наклона кузова принималось, что наддрессорная балка и кузов являются абсолютно жесткими, а физические свойства пятника описываются с помощью модели упруго-безынерционного основания (основания Винклера), т.е. пятник – упругий элемент, представленный в виде множества пружин, имеющих одинаковую жесткость. Это означает, что при наличии вертикальной нагрузки в каждой точке на поверхности контакта пятник – подпятник создается реакция, пропорциональная осадке пятника в этой точке:

$$r = c \cdot \Delta l.$$

В зоне контакта пятник – подпятник нагрузка от кузова может распределяться равномерно или неравномерно. При этом неравномерная нагрузка может распределяться как по всей площади под упорной поверхностью пятника, так и по её отдельной части (при отрыве края пятника от подпятника). Возможные случаи нагружения механической системы, схемы деформации пятника, а также реакции от статической нагрузки, возникающие на поверхности контакта, представлены в табл. 1.

Учитывая упругие свойства пятника, реакция на поверхности контакта в произвольной точке представлялась в виде

$$r_T = c\xi \tan(\theta)$$

и в крайней максимально нагруженной точке

$$r_{\max} = c\xi \tan(\theta). \quad (3)$$

Значение возвращающего момента M_R , образованного действием распределенных сил реакции опоры, определялось относительно начала отсчета выбранной системы координат по формуле

$$M_R = R_z y_c. \quad (4)$$

Равнодействующая сила R_z является суммой распределенных сил реакции, возникающих в опоре, значение которой равно силе Q . В то же время распределенные силы реакции представляются в виде эпюры объемом V . Таким образом,

$$R_z = Q = V = \iint_F r(y) dF. \quad (5)$$

Расстояние y_c до силы R_z является координатой геометрического центра эпюры по оси Oy , которая определялась известным выражением через статический момент и объем:

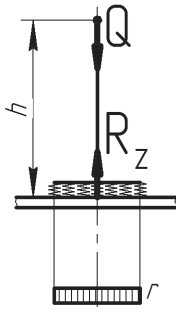
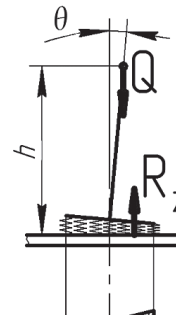
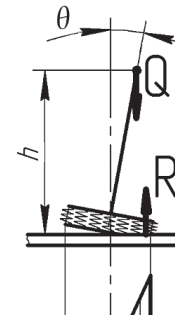
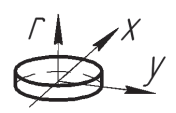
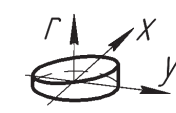
$$y_c = \frac{S_{rx}}{V}. \quad (6)$$

Учитывая формулы (4)–(6), установлено, что возвращающий момент M_R , образованный действием распределенных сил реакции опоры, равен статическому моменту S_{rx} объемной эпюры относительно плоскости Ox :

$$M_R = S_{rx} = \iiint_V y dV = \iint_F yr(y) dF. \quad (7)$$

В первом случае, когда отсутствует наклон кузова и нагрузка распределяется по пятнику равномерно, момент M_Q , статический момент S_{rx} , а значит, и возвращающий момент M_R равны нулю. Тогда восстанавливающий момент $M_{\text{восст}}$ также равен нулю – это положение равновесия.

ТАБЛИЦА 1. Возможные случаи нагружения механической системы, схемы деформации пятника, реакции от статической нагрузки, возникающие на поверхности контакта

Схемы нагружений и эпюры реакций	Случай нагружения		
	Равномерное распределение нагрузки по всей площади под упорной поверхностью пятника	Неравномерное распределение нагрузки:	
		по всей площади под упорной поверхностью пятника (без отрыва края пятника от подпятника)	по части от всей площади под упорной поверхностью пятника (при отрыве края пятника от подпятника)
Схема нагружения и эпюра реакции в плоскости Ozy			
Эпюра реакции от нагрузки, распределенной по поверхности контакта			

Примечание. Направления осей системы координат для схем



Во втором случае, когда появляется наклон кузова и нагрузка распределяется по пятнику неравномерно, но при этом край пятника не отрывается от подпятника, равенство (7) принимает вид [5]

$$M_R = cJ \tan(\theta), \quad (8)$$

а уравнение (1) для безотрывных колебаний –

$$J_x \ddot{\theta} = Qh \sin(\theta) - cJ \tan(\theta) \approx (Qh - cJ)\theta.$$

Зависимость моментов M_Q , M_R и силовой характеристики $M_{\text{восст}}$ от угла θ во втором случае имеет линейные характеристики, справедливые только при малых углах наклона кузова.

В третьем случае, когда при наклоне кузова край пятника отрывается от подпятника, изменится ширина ξ зоны контакта и нагрузка от кузова будет распределяться уже по меньшей опорной площади (рис. 2).

В этом случае для определения зависимости между углом θ и шириной ξ зоны контакта формула по определению объема V эпюры с учетом (5) имеет вид:

$$V = Q = \frac{r_{\max}}{3\xi} \times [a \cdot (3R^2 - a^2) - 3R^2 \cdot (R - \xi) \cdot \Phi]; \quad (9)$$

где

$$a = \sqrt{R^2 - (R - \xi)^2}; \quad (10)$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{R-\xi}{R}\right). \quad (11)$$

Так, после преобразования формул (3) и (9) с учетом (10) и (11)

$$\tan(\theta) = \frac{3Q}{c \cdot \left[\sqrt{R^2 - (R-\xi)^2} \cdot (2R^2 + (R-\xi)^2) - 3R^2 \cdot (R-\xi) \cdot \arccos\left(\frac{R-\xi}{R}\right) \right]}. \quad (12)$$

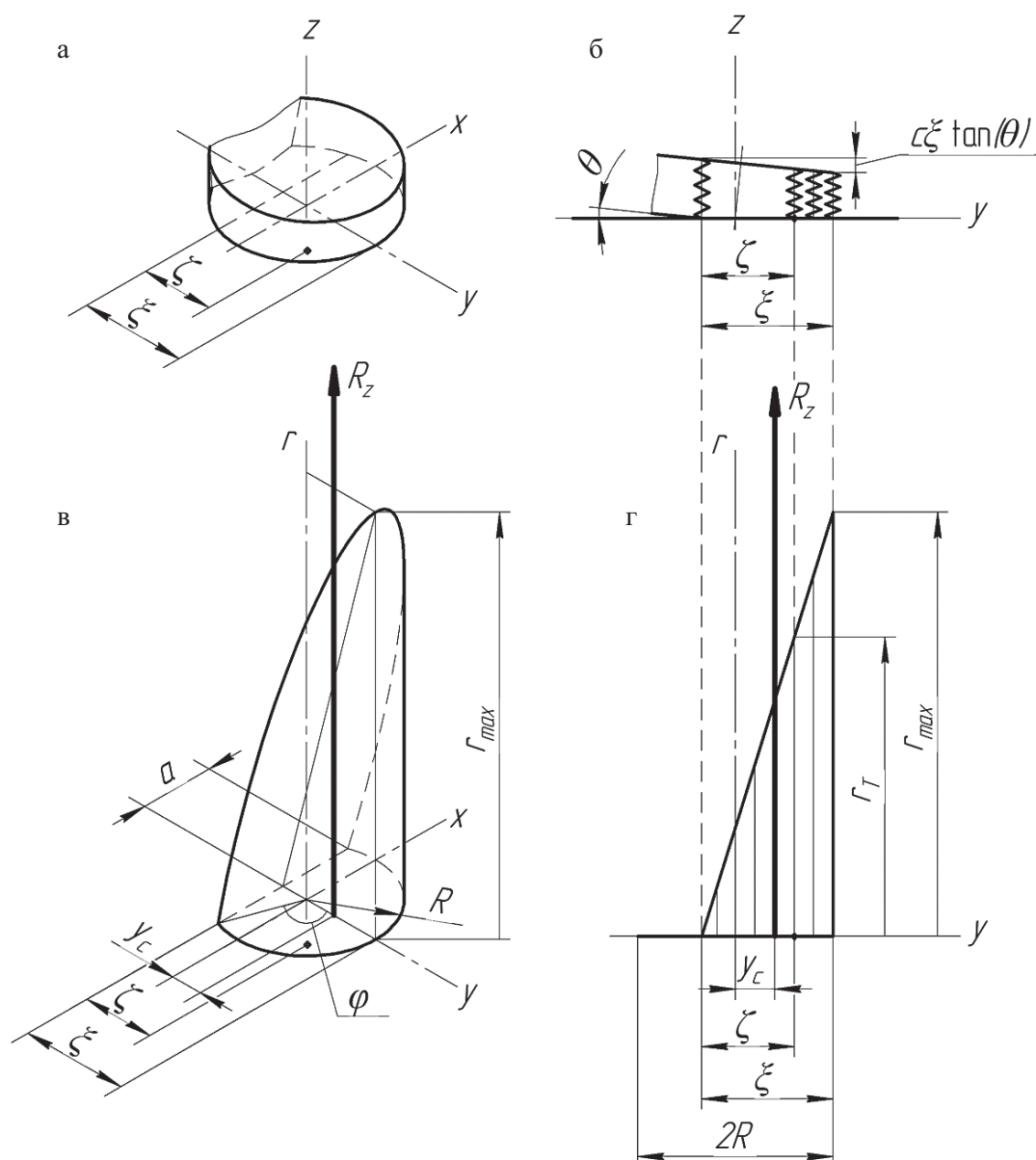


Рис. 2. Схема нагружения пятника в случае распределения нагрузки при отрыве края пятника от подпятника:
 а, б) деформация пятника при наклоне кузова; в, г) эпюра распределенной по поверхности контакта реакции опоры

Формула (12) согласуется с формулой, полученной в [5].

В соответствии со схемой, изображенной на рис. 2, определялся статический момент S_{rx} объемной эпюры:

$$S_{rx} = 2 \int_{y_1}^{y_2} dy \int_0^{r_2(y)} dr \int_0^{x_2(y)} y dx, \quad (13)$$

где границы $y_1, y_2, r_2(y), x_2(y)$ области интегрирования представлены в табл. 2.

Проинтегрировав выражение (13) и упростив полученный результат с учетом равенства (5) и формулы (3), получили:

$$M_R = \frac{Q \left[3\pi R^4 - 6[R - \xi] \cdot [2 \cdot (R - \xi)^2 - R^2] \cdot \sqrt{R^2 - (R - \xi)^2} - \right. \\ \left. 8 \left[\sqrt{R^2 - (R - \xi)^2} \cdot (2R^2 + (R - \xi)^2) - \right. \right. \\ \left. \left. - 6R^4 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{R - \xi}{R}\right) \right) + 16(\xi - R) \cdot \sqrt{R^2 - (R - \xi)^2} \right]^3 \right]}{-3R^2 \cdot (R - \xi) \cdot \arccos\left(\frac{R - \xi}{R}\right)}.$$

Силовая характеристика $M_{\text{восст}}$ в третьем случае приобретает нелинейную зависимость.

Для всех случаев нагружения механической системы зависимость между амплитудой Am и частотой f свободных колебаний определялась выражением [6]:

$$f = \frac{1}{4 \int_0^{Am} \left(\frac{1}{\sqrt{2 \int_0^{Am} \frac{M_{\text{восст}}(\theta)}{J_x} d\theta}} \right) d\theta} \quad (14)$$

ТАБЛИЦА 2. Границы области интегрирования при определении статического момента S_{rx} эпюры распределенных сил реакции опоры в случае распределения нагрузки при отрыве края пятника от подпятника

Границы области интегрирования	Значения переменных
$y_1 \leq y \leq y_2$	$y_1 = R - \xi$ $y_2 = R$
$0 \leq r \leq r_2(y)$	$r_2(y) = \frac{r_{\max}}{\xi} (y + \xi - R)$
$0 \leq x \leq x_2(y)$	$x_2(y) = \sqrt{R^2 - y^2}$

Нелинейные характеристики $\xi(\theta)$, $M_{\text{восст}}(\theta)$, $f(A_m)$ при перевалке кузова вагона на стальном пятнике представлены на рис. 3.

В точке 0 кузов находится в состоянии равновесия; ширина зоны контакта пятник – подпятник равна диаметру пятника.

На участке 0–1 (0–1') с ростом угла наклона кузова начинает перераспределяться нагрузка на пятник (один край пятника нагружается, противоположный разгружается), при этом ширина зоны контакта по-прежнему остается равной диаметру пятника. Появляется восстанавливающий момент, линейно увеличивающийся с ростом угла наклона. Частота на этом участке постоянна и не зависит от амплитуды.

В точке 1 (1') край пятника обезгруживается, с этого момента ширина зоны контакта уменьшается с ростом угла наклона кузова.

Восстанавливающий момент в этом положении составляет примерно 1/3 от максимального значения.

На участке 1–2 (1–2') после обезгрузки края пятника с дальнейшим ростом угла наклона кузова резко уменьшается ширина зоны контакта. Восстанавливающий момент продолжает увеличиваться, приближаясь к максимальному значению.

В точке 2 (2') восстанавливающий момент достигает своего максимума, с этого момента ширина зоны контакта с ростом угла наклона кузова остается практически неизменной.

На участке 2–3 (2'–3') с ростом угла наклона кузова ширина зоны контакта практически не изменяется и приближается к своему минимальному значению. Восстанавливающий момент стремится к нулю.

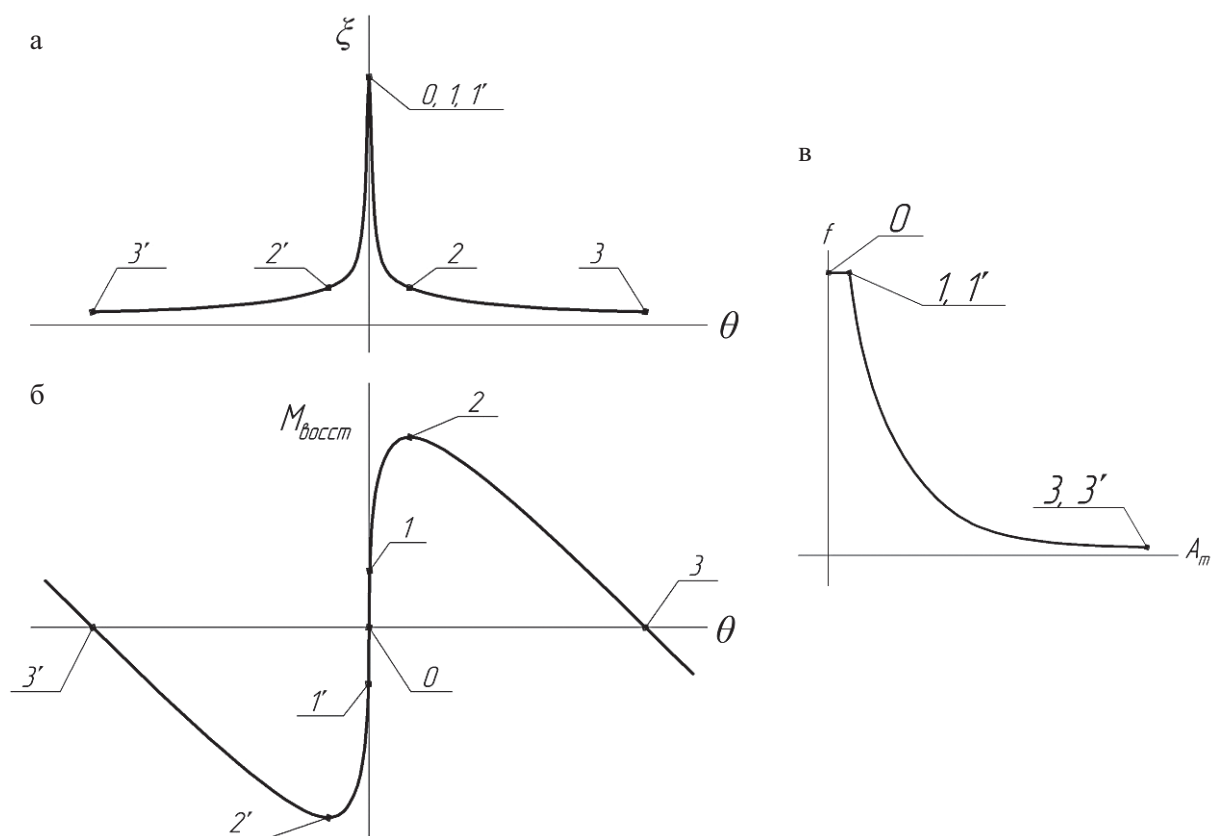


Рис. 3. Нелинейные характеристики $\xi(\theta)$, $M_{\text{восст}}(\theta)$, $f(A_m)$ при перевалке кузова вагона на стальном пятнике:

- а) зависимость между углом наклона кузова и шириной зоны контакта;
- б) силовая характеристика связи кузова вагона с тележкой при перевалке;
- в) скелетная кривая

Точке 3 (3') соответствует неустойчивое положение равновесия кузова, когда его центр тяжести расположен на вертикали, проходящей через точку положения равнодействующей силы реакции опоры.

На участке 1–3 (1'–3') частота колебаний нелинейно уменьшается с ростом амплитуды.

Пример построения силовой характеристики перевалки кузова вагона на пятнике, определение частоты колебания и ширины зоны контакта в зависимости от угла наклона кузова

Рассмотрим поперечные колебания кузова на пятнике на примере полувагона модели 12-132. Вагон оборудован двухосными тележками с бесконтактными скользунми. Угол, на который может наклониться кузов до упора скользуннов, составляет $1,634 \cdot 10^{-2}$ рад (при зазорах между скользуннами 10 мм).

Исходные данные для расчета представлены в табл. 3.

Расчет проводили с помощью программного комплекса MATHCAD 15. По исходным данным из табл. 3 по формулам (1), (2), (8), (12)–(14) строили массивы данных с шагом $\Delta \xi$ ширины зоны контакта, равным 0,001 м, и с шагом ΔA_m амплитуды колебаний, равным $2 \cdot 10^{-5}$ рад. По полученным массивам строили графики зависимостей.

Графики зависимостей между углом θ наклона кузова и шириной ξ зоны контакта пят-

ник – подпятник изображен на рис. 4; силовая характеристика $M_{\text{восст}}$ связи кузова вагона с тележкой при перевалке – на рис. 5; график зависимости между частотой f колебаний при перевалке кузова и амплитудой A_m – на рис. 6.

Согласно расчету, колебания кузова без отрыва края пятника от подпятника происходят при малых углах наклона – до $2,15 \cdot 10^{-5}$ рад (см. рис. 4) с частотой свободных колебаний 12,7 Гц (см. рис. 6).

Восстанавливающий момент в зоне перехода от безотрывных колебаний к колебаниям с отрывом края пятника составляет 15 511 Н·м (см. рис. 5). Максимальное значение восстанавливающего момента достигает 53 782 Н·м при ширине зоны контакта 34 мм и угле наклона кузова $3,75 \cdot 10^{-3}$ рад (см. рис. 4, 5).

Минимальное значение ширины зоны контакта составляет 19 мм при угле наклона кузова $1,634 \cdot 10^{-2}$ рад (см. рис. 4), который соответствует замыканию скользуннов.

Известно, что после длительного срока эксплуатации вагона упорная поверхность пятника имеет износы в виде плоских граней, расположенных вдоль внешней кромки. Эти износы могут занимать до половины радиуса пятника [11], при этом повышенный износ происходит на расстоянии до 20 мм от края [3]. По результатам расчета, изменение ширины контакта от 75 до 19 мм соответствует широкому диапазону углов наклона кузова от $5,358 \cdot 10^{-4}$ до $1,634 \cdot 10^{-2}$ рад (см. рис. 4), что может объяснить повышенный износ этих зон.

Частота свободных колебаний кузова при увеличении амплитуды, начиная с зоны

ТАБЛИЦА 3. Исходные данные для расчета

Параметр	Обозначение	Значение
Нагрузка от груженого кузова, приходящаяся на один пятник, Н	Q	$4,14 \cdot 10^5$
Высота от подпятника до центра масс кузова, м	h	1,5
Радиус пятника, м	R	0,15
Коэффициент постели, Н/м ³	c	$1,818 \cdot 10^{12}$
Момент инерции относительно оси Ox для половины кузова, кг·м ²	J_x	$1,41 \cdot 10^5$

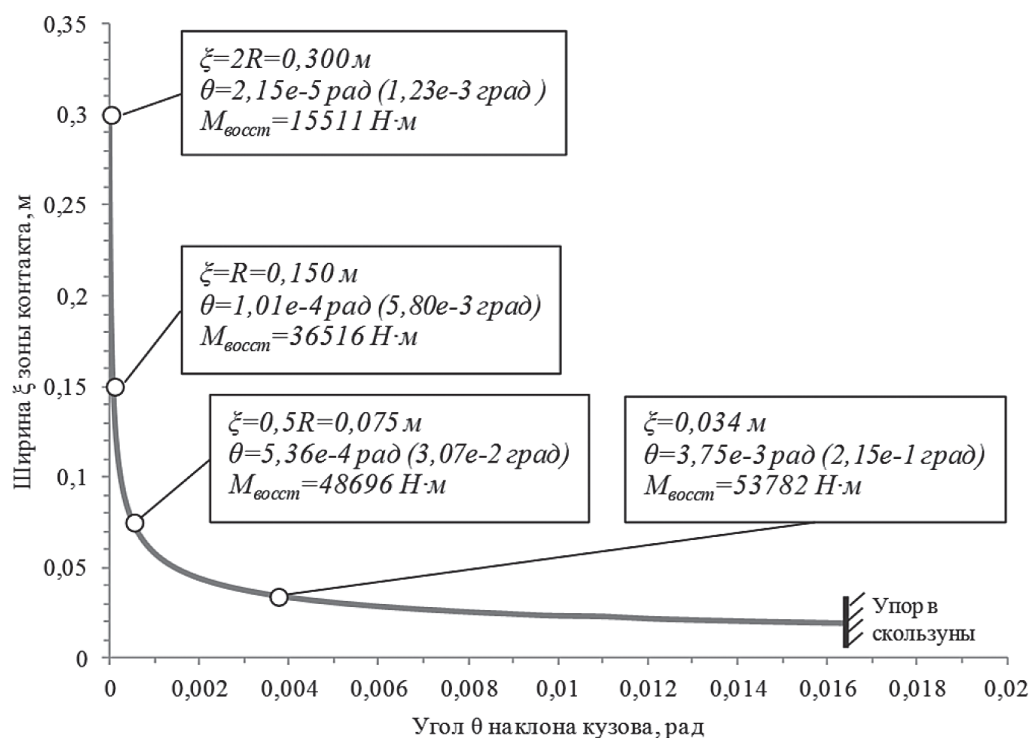


Рис. 4. График зависимости между углом θ наклона кузова и шириной ξ зоны контакта пятник – подпятник

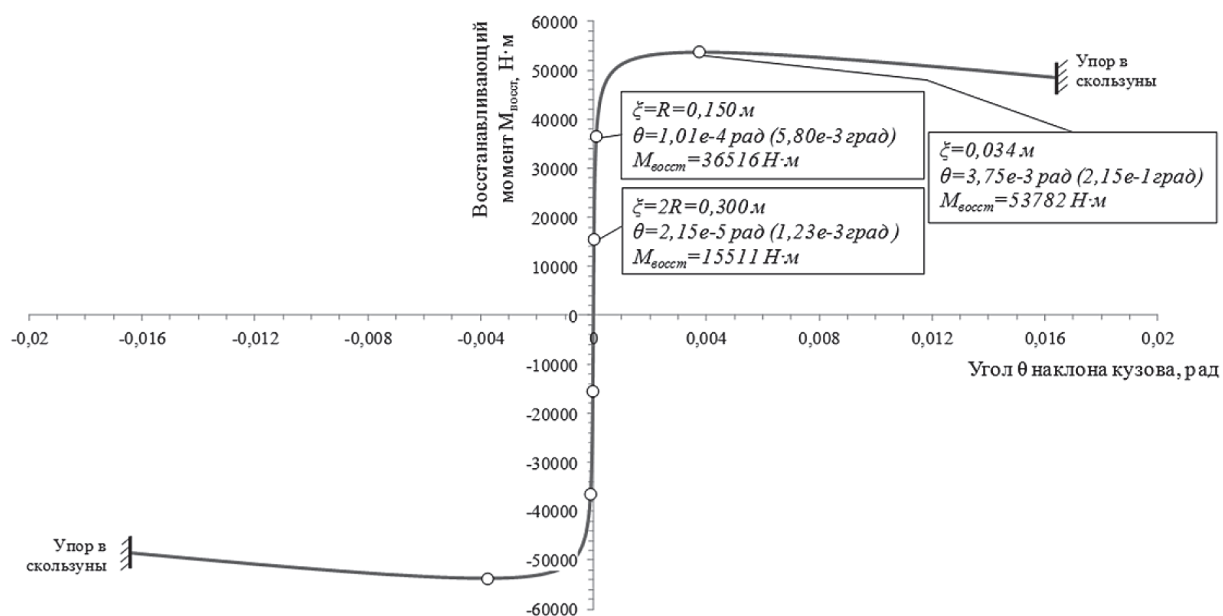
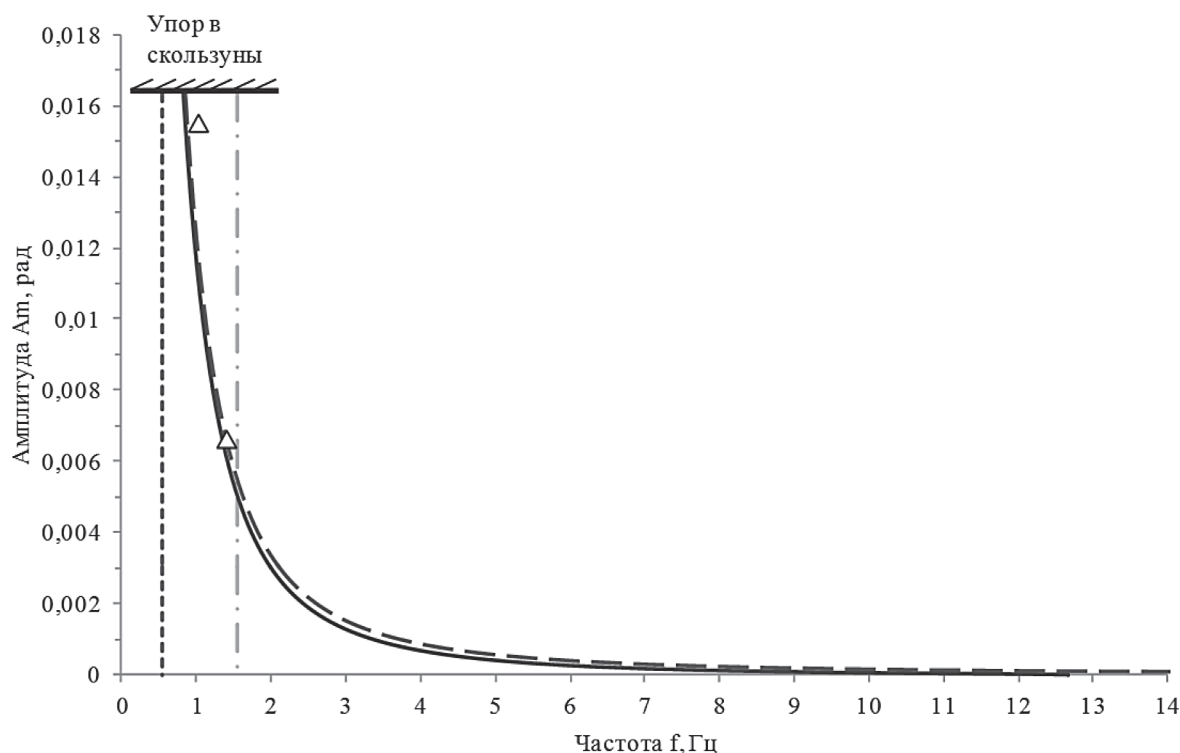


Рис. 5. Силовая характеристика связи кузова вагона с тележкой при перевалке



При моделирование перевалки кузова с использованием:

- · — шарнира с параллельными линейно-упругими элементами [10], [7];
- пятника с цилиндрической упорной поверхностью [10] (при износе края пятника 2 мм [11]);
- · - пятника, представленного как абсолютно твердое тело [2];
- пятника, представленного в качестве упруго-безынерционного основания (основания Винклера).
- △ Экспериментальные данные

Рис. 6. График зависимости между частотой f колебаний при перевалке кузова и амплитудой Am

перехода от безотрывных колебаний к колебаниям с отрывом края пятника, нелинейно уменьшается с 12,7 Гц и достигает значения 0,8 Гц при угле наклона $1,634 \cdot 10^{-2}$ рад (см. рис. 6), который соответствует замыканию скользунов.

Результаты расчета частоты свободных колебаний при перевалке кузова на пятнике, полученные при использовании модели связи, представленной в виде упруго-безынерционного основания (основания Винклера), сопоставлены с результатами расчетов других моделей [2, 7, 10].

Наиболее распространенной модели связи, имеющей вид шарнира с параллельными линейно-упругими элементами [7, 10], соответствует постоянная частота свободных колебаний при перевалке кузова (см. рис. 6):

$$f = \frac{\sqrt{\frac{c_n b - Qh}{J_x}}}{2\pi}.$$

Варьируя жесткость поджимающих пружин c_n и расстояние между ними, можно получить частоту, близкую к наблюдаемой в экспериментах, но эта модель не описывает особенности колебаний нелинейных систем.

Аналогичный недостаток имеет модель связи, представленной в виде цилиндрической пяты [10]. Частоту, близкую к экспериментальной, можно получить, изменяя радиус упорной поверхности пятника:

$$f = \frac{\sqrt{\frac{Qh(R_{yn} - h)}{J_x}}}{2\pi},$$

где

$$R_{\text{уп}} \approx \frac{R^2}{2\Delta_{\text{изн}}}.$$

Модели связи, описывающей перевалку кузова на абсолютно жестком пятнике [2], соответствует нелинейная зависимость частоты свободных колебаний от амплитуды:

$$f = \frac{\sqrt{\frac{Qh}{J_x}}}{4\text{arch}\left[\left(1 - (Am / \arctan(R/h))^{-1}\right)^{-1}\right]}.$$

Эта модель связи при малых углах наклона дает увеличение частоты колебаний до бесконечности. Начиная с угла отрыва края пятника от подпятника наблюдается почти полное совпадение скелетной кривой модели [2] с зависимостью (14), описанной в данной статье.

Таким образом, из рассмотренных моделей первые две позволяют получить только близкие к экспериментальным данным частоту и амплитуду вынужденных колебаний.

Для нелинейных систем одному значению частоты на резонансной кривой могут соответствовать три амплитуды колебаний, две из которых могут быть устойчивыми. Учитывая, что описанная в статье характеристика является мягкой и что кривая собственных частот загибается влево, во время повышения скорости движения неустойчивая ветвь амплитудно-частотной характеристики также расположится слева относительно скелетной кривой и возможных скачков амплитуд при возрастающей частоте вынужденных колебаний. При снижении скорости движения возможен сброс амплитуд колебаний.

Настоящая модель перевалки кузова позволяет объяснить резкие увеличения боковых и вертикальных сил, возникающих при движении поезда, описанные в статье [12].

Заключение

Предложенная в данной статье модель связи кузова с тележкой, представленная в виде

упруго-безынерционного основания (основания Винклера), позволяет лучше описать физические явления, происходящие при колебаниях вагона во время движения по рельсовому пути, и рекомендуется к использованию при расчетах ходовых качеств грузовых вагонов.

Условные обозначения

- Ц. М. – центр масс кузова
- h – высота от подпятника до центра масс кузова
- Q – вертикальная сила от тяжести кузова
- R_z – равнодействующая сила реакции опоры
- θ – угол наклона кузова в плоскости Ozy относительно надрессорной балки
- J_x – момент инерции кузова относительно оси Ox , направленной перпендикулярно плоскости чертежа
- $M_R = M_R(\theta)$ – возвращающий момент, образованный действием распределенных сил реакции опоры, зависящий от угла θ наклона кузова
- $M_Q = M_Q(\theta)$ – момент, образованный действием силы тяжести вследствие смещения центра масс кузова
- $M_{\text{восст}} = M_{\text{восст}}(\theta)$ – силовая характеристика связи кузова вагона с тележкой при перевалке, зависящая от угла θ наклона кузова
- c – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом постели
- y_c – расстояние до равнодействующей силы R_z от начала отсчета системы координат
- ξ – ширина зоны контакта пятник – подпятник, измеряемая вдоль оси Oy
- ζ – расстояние, измеряемое на поверхности контакта пятник – подпятник вдоль оси Oy от наименее нагруженной точки до произвольной точки
- r_{max} – максимальная реакция, возникающая в крайней точке на поверхности контакта
- a – половина секущей хорды
- R – радиус пятника
- φ – половина центрального угла

F – площадь опорной поверхности пятника

S_x – статический момент объемной эпюры распределенных сил реакции опоры относительно плоскости Ox

V – объем эпюры распределенных сил реакции опоры

$y_1, y_2, r_2(y), x_2(y)$ – границы области интегрирования при определении статического момента S_x эпюры распределенных сил реакции опоры;

J – момент инерции площади контакта относительно оси Ox

f – частота свободных колебаний

Δl – величина осадки упругого основания в произвольной точке

c_n – жесткость поджимающей пружины

b – расстояние от поджимающей пружины до шарнира

$R_{уп}$ – радиус упорной поверхности цилиндрической пяты

$\Delta_{изн}$ – износ упорной поверхности по краю пятника

Библиографический список

1. Бороненко Ю.П. Анализ повреждаемости центральных пятников 8-осных цистерн / Ю.П. Бороненко, В.М. Бубнов, А.С. Вершинин и др. // Петербургский институт инженеров железнодорожного транспорта: сб. науч. трудов. – СПб., 1993. – 126 с.

2. Бороненко Ю.П. Исследование влияния инерционных и геометрических характеристик цистерн на их ходовые качества : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.02 / Ю.П. Бороненко. – Ленинград, 1976. – 170 с.

3. Дубинин В.М. Анализ износостойкости и разработка предложений по повышению надежности пятниковых узлов грузовых вагонов / В.М. Дубинин // Новые материалы и технологии в машиностроении – 2010 : сб. науч. ст. XII междунар. науч.-технич. конф. – Челябинск : ЧИПС – филиал УрГУПС, 2010. – URL : http://science-bsea.bgita.ru/2010/mashin_2010_2/dubinin_analiz.htm.

4. Каудерпер Г. Нелинейная механика / Г. Каудерпер ; пер. с нем. Я.Г. Пановко. – М. : Изд-во иностр. лит., 1961. – 777 с.

5. Павлов С.В. Оценка динамической нагруженности шкворневых узлов вагонов-цистерн и совершенствование их конструкции : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / С.В. Павлов. – СПб., 1993. – 74 с.

6. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории упругих колебаний / Я.Г. Пановко. – 2-е изд., перераб. – М. : Машиностроение, 1967. – 316 с.

7. Саидова А.В. Разработка математических моделей вагона на тележках 18-9810 и 18-9895 для исследования износов колес / А.В. Саидова, А.М. Орлова // Наука та транспорту. Віник Дніпропетровськ. нац. ун-ту залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2013. – Вип. 2 (44). – С. 118–123.

8. Тененбаум Б.Я. Некоторые особенности боковых колебаний четырехосного полувагона / Б.Я. Тененбаум // Улучшение содержания, ремонта и повышение надежности вагонов и средств механизации грузовых работ. – Свердловск : Средне-Урал. кн. изд-во, 1969. – Вып. 15. – С. 43–49.

9. Турутин И.В. Конструкция тележек моделей 18-9889 и 18-9890 для инновационных четырех- и шестиосных грузовых вагонов // И.В. Турутин, Е.А. Рудакова // Транспорт РФ. – 2013. – № 3 (46). – С. 10–12.

10. Ушлаков В.Ф. Математическое моделирование колебаний рельсовых транспортных средств / В.Ф. Ушлаков, Л.М. Резликов, В.С. Иккол и др. – Киев : Наук. Думка, 1989. – 240 с.

11. Olshevskiy A. Wear simulation for the center plate arrangement of a freight car / A. Olshevskiy, Chang-Wan Kim, Hyun-Ik Yang // Veh. Syst. dyn. – 2015. – Vol. 53, N. 4–6 April–June.

12. Yan Liu. High lateral to vertical force ratio and car body “Rocking” on bolster / Yan Liu, Wei Huang // 21rd Int. Symp. on Dynamics of Vehicles on Road and Tracks. IAVSD. – 2011.

References

1. Boronenko Yu. P., Bubnov V. M., Verшинin A. S., Pavlov S. V. & Belgorodtsev A. V. Analiz povrezhdanosti central'nyh pyatnikov 8-osnyh cistern [Analysis of Damage to the Central Pyatnikov 8-axle Tanks]. *Peterburgskiy institut inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta: sbornik nauchnykh trudov* – Petersburg

Rail. Eng. Inst.: Coll. Sci. Papers. St. Petersburg, 1993. 126 p.

2. Boronenko Yu. P. Issledovaniye vliyaniya inertsiy i geometricheskikh kharakteristik tsistern na ikh khodovyye kachestva [A Study into the Influence of Inertia and Geometrical Characteristics of Tank-cars on their Running Qualities]. Leningrad, 1976. 170 p.

3. Dubinin V. M. Analiz iznosostoykosti i razrabotka predlozheniy po povysheniyu nadezhnosti pyatnikovykh uzlov gruzovykh vagonov [Wear Resistance Analysis and Development of Suggestions for Increasing Reliability of Centre Plate Arrangements of Freight Cars]. *Novyye materialy i tekhnologii v mashinostroyenii – 2010: sbornik nauchnykh statey XII mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (New Materials and Technologies in Engine Building – 2010: Proc. of 12th Int. Sci. and Tech. Conf.)*. Chelyabinsk, ChIPS, 2010, available at: http://science-bsea.bgita.ru/2010/mashin_2010_2/dubinin_analiz.htm.

4. Kauderer G. Nelineynaya mekhanika [Non-linear Mechanics]. Moscow, Izdatelstvo inostrannoy literatury, 1961. 777 p.

5. Pavlov S. V. Otsenka dinamicheskoy nagruzhennosti shkvornevykh uzlov vagonov-tsistern i sovershenstvovaniye ikh konstruksii [Evaluation of Dynamic Load of Tank-cars' Centre Bearings and Improvements to Their Design]. St. Petersburg, 1993. 74 p.

6. Panovko Ya. G. Osnovy prikladnoy teorii uprugikh kolebaniy [Basic Applied Theory of Elastic

Vibrations]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1967. 316 p.

7. Saidova A. V. & Orlova A. M. *Nauka ta transportu – Sci. for Transp.*, 2013. Is. 2 (44). Pp. 118-123.

8. Tenenbaum B. Ya. Nekotorye osobennosti bokovykh kolebaniy chetyrekhnosnogo poluvagona [Some Features of the Lateral Oscillations of the Four-gondol]. *Uluchsheniye soderzhaniya, remonta i povysheniye nadezhnosti vagonov i sredstv mekhanizatsii gruzovykh rabot (Improving Maintenance, Repair and Incr. Reliability of Cars and Haulage Mech. Equip.)*, 1969. Is. 15. Pp. 43-49.

9. Turutin I. V. & Rudakova Ye. A. *Transport Rossiyskoy Federatsii – Trans. of Russ. Federation*, 2013, no. 3 (46), pp. 10-12.

10. Ushlakov V. F., Rezlikov L. M., Ikkol V. S., Trubitskaya Ye. Yu., Redko S. F. & Zalesskiy A. I. Matematicheskoye modelirovaniye kolebaniy relsovykh transportnykh sredstv [Mathematical Simulation of Rail Vehicles' Vibrations]. Kiev, Naukova dumka, 1989. 240 p.

11. Olshevskiy A., Chang-Wan Kim & Hyun-Ik Yang. Wear simulation for the center plate arrangement of a freight car. *Veh. Syst. dyn.*, 2015, Vol. 53, no. 4-6 April-June.

12. Yan Liu & Wei Huang. High lateral to vertical force ratio and car body "Rocking" on bolster. *21st Int. Symp. on Dynamics of Vehicles on Road and Tracks. LAVSD*. 2011.

БОРОНЕНКО Юрий Павлович – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, boron49@yandex.ru; *ЖИТКОВ Юрий Борисович – аспирант, zhitkov-nvc@ya.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 621.311

А. Т. Бурков, М. М. Мирсаитов**РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОТЯГОВОЙ СЕТИ
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ВЛ-80Р И УТУ-1**

Дата поступления: 08.04.2016

Решение о публикации:

Цель: Оценить качество потребления электроэнергии, разработать методику исследования и рекомендаций по повышению качества потребления электроэнергии в электротяговой сети за счёт перехода от зонно-фазового управления однофазными выпрямителями на импульсный способ регулирования с помощью 4q-S на электровозах. **Метод исследования:** Для решения научной задачи применён современный метод математического моделирования с использованием стандартной программы MATLAB Simulink. **Результаты:** Рассмотрены особенности режимов работы электротяговой сети однофазного переменного тока железных дорог Узбекистана при эксплуатации электровозов с зонно-фазовым и импульсным управлением с помощью четырёхквadrантного преобразователя 4q-S в силовых цепях. Приведены результаты анализа режимов электротяговой сети при работе электровозов с различными энергетическими характеристиками. Оценено их влияние на показатели качества потребления электроэнергии. Выявлены факторы, обуславливающие потери электроэнергии при эксплуатации электровозов с зонно-фазовым управлением и электровозов с импульсным регулированием с помощью 4q-S. Сформулированы рекомендации по снижению реактивной мощности и потерь электроэнергии в электротяговой сети при работе электровоза УТУ-1. **Практическая значимость:** Разработана имитационная модель электрической железной дороги, включающая систему внешнего и тягового электроснабжения, а также электровозы с разными видами преобразователей однофазно-постоянного тока. Модель включает новые функции обработки данных процессов в электротяговой сети, позволяющие получить сравнительный анализ потоков энергии в питающей сети, гармонических составляющих напряжения и токов на тяговой подстанции и у токоприёмников рассматриваемых электровозов, дать оценку качества потребления электроэнергии методом анализа активной, реактивной, полной мощности, а также мощности искажения. Создана методика исследования и алгоритм оценки качества потребления электроэнергии, даны рекомендации по совместному применению традиционных электровозов ВЛ-80Р с зонно-фазовым регулированием и электровозов нового поколения УТУ-1 с импульсным управлением и четырёхквadrантным преобразователем на железных дорогах Узбекистана.

Электротяговая сеть, электроприёмник, нелинейная нагрузка, качество потребления электроэнергии, несинусоидальность тока, несинусоидальность напряжения, высшие гармоники, источники гармоник, дополнительные активные потери, мощность искажения, коэффициент мощности, математическая модель, выпрямитель, зонно-фазовое управление, четырёхквadrантный преобразователь.

Anatoliy T. Burkov, D. Eng, professor, elsnabgd@mail.ru; ***Mirziyod M. Mirsaitov**, postgraduate student, mirziyodmail@mail.com (Petersburg State Transport University), MODES OF ELECTROTRACTION NETWORKS IN THE OPERATION OF VL-80R AND UTY-1 ELECTRIC LOCOMOTIVES

Objective: To assess the quality of electricity consumption and to provide recommendations for improving the quality of electricity consumption in electrical traction networks by switching from zone-phase control of single-phase rectifiers to impulse control method using 4q-S on electric locomotives. **Methods:**

Standard MATLAB Simulink program for mathematic simulation was used to solve the problem. **Results:** Specific features of the operation modes of electrical traction single-phase AC railways in Uzbekistan with emphasis on locomotives with zone-phase and impulse control using a four-quadrant converter (4q-S) in power circuits. Results of the analysis focus on locomotive networks with different power characteristics, evaluating their impact as quality indicators of electric power consumption. Factors were identified that contributed to energy losses in locomotives with zone-phase control and electric locomotives with pulse control 4q-S. It's recommended that reactive power is reduced. **Practical importance:** The simulation model of an electric railway, including a system of external and traction electric supply and electric locomotives with different types of converters using single phase DC was developed. The model includes a data processing function in electrical traction networks, allowing for comparative analysis of energy flows in the supply network. Through the analysis of active, reactive, apparent power and power distortion, the quality of energy consumption can be accurately assessed. Research methodology and algorithm of quality assessment of electricity consumption were created, as well as recommendations for joint application of traditional VL-80R electric locomotives with zone-phase control and UTY-1 electric locomotives of the new generation with impulse control and four-quadrant converter on the Railways of Uzbekistan.

Electrical traction network, receivers, non-linear load, quality of electricity consumption, non-sinusoidal current and voltage, harmonics, sources of harmonics, additional active loss, power distortion, power factor, mathematical model, rectifier, zone-phase control, four-quadrant converter.

На железных дорогах Узбекистана эксплуатируются традиционные электровозы ВЛ-80Р с зонно-фазовым регулированием [11] и электровозы UTY-1 нового поколения с асинхронными двигателями и четырёхквadrантными преобразователями. Энергетические характеристики этих электровозов отличаются по показателям качества электропотребления.

Электрический подвижной состав (ЭПС) с зонно-фазовым регулированием влияет на качество электропотребления за счёт повышенного уровня обмена с питающей сетью реактивной мощностью, на искажения синусоидальности потребляемого тока и на загрузки электротяговой сети нечётными высшими гармоническими составляющими. Это вызывает нестабильность уровня напряжения в контактной сети (КС) и увеличивает потери мощности в электротяговой сети, а также отрицательно (негативно) влияет на электроэнергетические показатели тяговых подстанций (ТП) и системы внешнего электроснабжения.

Электровозы нового поколения, оборудованные однофазными преобразователями с импульсным принципом управления, позволяющими формировать синусоидальную

кривую тока в питающей сети при взаимодействии с электротяговой сетью, создают благоприятные условия для снижения загрузки сетей реактивной энергией и уменьшения содержания высших гармонических составляющих. Эти условия способствуют повышению энергетической эффективности работы электротяговой сети.

Электровозы ВЛ-80Р и современные электровозы UTY-1 с асинхронным приводом находятся в эксплуатации на линии скоростной магистрали Ташкент – Самарканд.

При совместной работе ЭПС с зонно-фазовым регулированием и с импульсными четырёхквadrантными преобразователями могут быть реализованы режимы работы, в которых электровоз с импульсным регулированием может выступать как компенсатор отстающей реактивной мощности и как регулятор гармонического состава тока тяговой сети.

Для достижения поставленной цели разработаны математическая модель и методика исследования потребления электроэнергии из электротяговой сети электровозами ВЛ-80Р и UTY-1 [8, 10]. Даны рекомендации по повышению качества потребления электроэнергии

при раздельной и совместной работе электро-
возов ВЛ-80Р и УТУ-1 на участках железных
дорог Узбекистана.

Исходные данные исследуемой электротяговой сети

Расчётная схема системы тягового электро-
снабжения с электровозами ВЛ-80Р и УТУ-1
приведена на рис. 1.

ТП с трёхфазным трансформатором обес-
печивает электроэнергией однофазную на-
грузку электротяговой сети. ТП питается от
высоковольтной линии центрального питания
(ЦП) 110 кВ, 50 Гц. По КС электроэнергия
напряжением 25 кВ подаётся к электровозам
[13]. Цепь тягового тока замыкается по обрат-
ной рельсовой сети (РС). Схема электровоза
ВЛ-80Р включает блок тягового трансформа-
тора (ТТ), блок управления выпрямительной
установкой однофазного тока (УС); сглажи-

вающий реактор (L_d), коллекторный двигатель
постоянного тока (ДТП) с обмоткой возбуж-
дения (ОВ). На электровозе УТУ-1 применя-
ется современный бесколлекторный тяговый
электропривод, схема которого содержит ТТ,
четырёхквadrантный преобразователь (4q-S),
конденсаторный фильтр (C_d), автономный ин-
вертор напряжения с широтно-импульсной
модуляцией (АИН ШИМ) и асинхронный
двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором.
Основные технические данные электровозов
приведены в табл. 1.

На рис. 2 приведена схема питания и сек-
ционирования контактной сети на рассматри-
ваемом участке.

Основное оборудование и параметры
тяговых подстанций (рис. 2) приведены в
табл. 2.

Энергетические показатели электротяговой
сети на участке Янгир – Разъезд № 13 (рис. 3)
железных дорог Узбекистана исследованы при
консольном питании электровозов ВЛ-80Р и

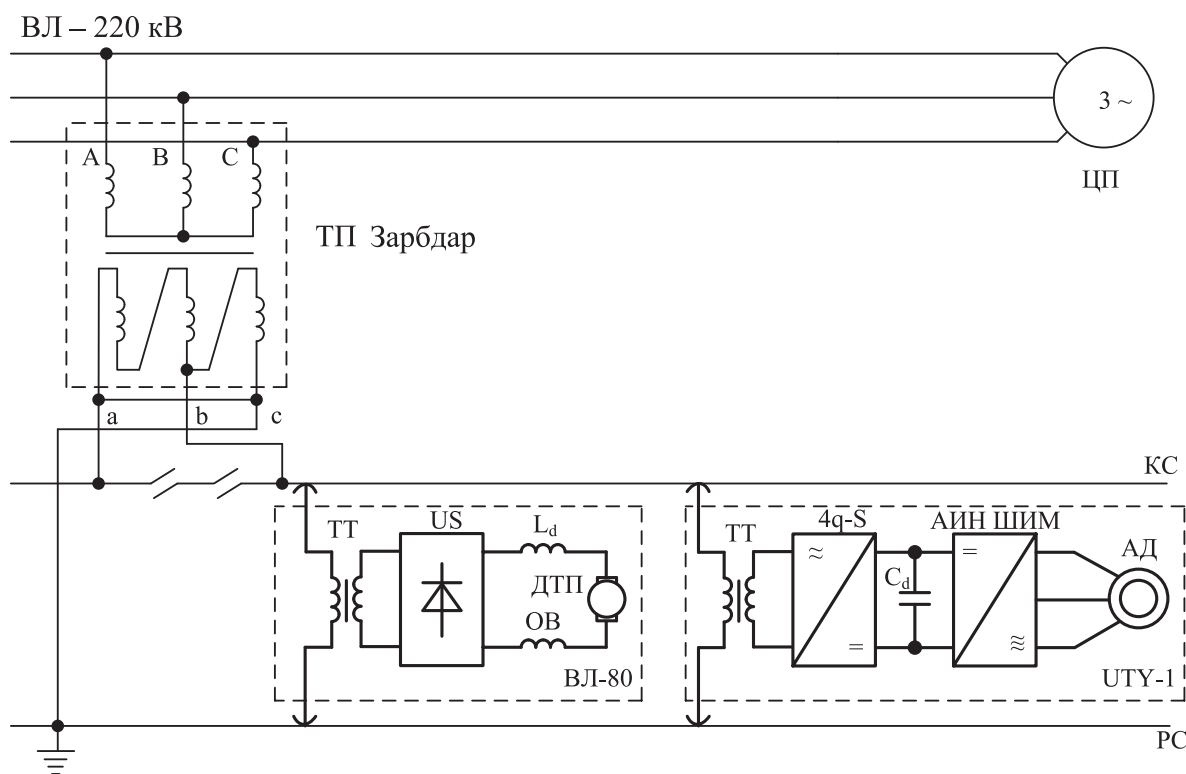


Рис. 1. Расчётная схема системы внешнего и тягового электроснабжения
с электровозами ВЛ-80Р и УТУ-1

ТАБЛИЦА 1. Основные технические данные электровозов ВЛ-80 Р и УТУ-1

Параметры и характеристики	Тип электровоза	
	ВЛ-80Р	УТУ-1
Род тока	Переменный	
Номинальное питающее напряжение, кВ	25	
Частота, Гц	50	
Формула ходовой части	$2_0-2_0-2_0-2_0$	Bo-Bo-Bo
Колея, мм	1520	
Конструкционная скорость, км/ч	110	120
Масса электровоза с 2/3 запаса песка, т	192 ± 4	138 ± 1
Масса, приходящаяся на ось, т	$24 \pm 0,7$	23
Коэффициент мощности в продолжительном режиме тяги	0,84	0,95
Работоспособность при напряжении питания, кВ	19–29	
Тяговый двигатель	НБ-418 К6	1ТВ-2624
Мощность двигателя, кВт	790	1020
Номинальное напряжение звена постоянного тока, В	950	2063
Система управления электровозом	Косвенная, дистанционная	

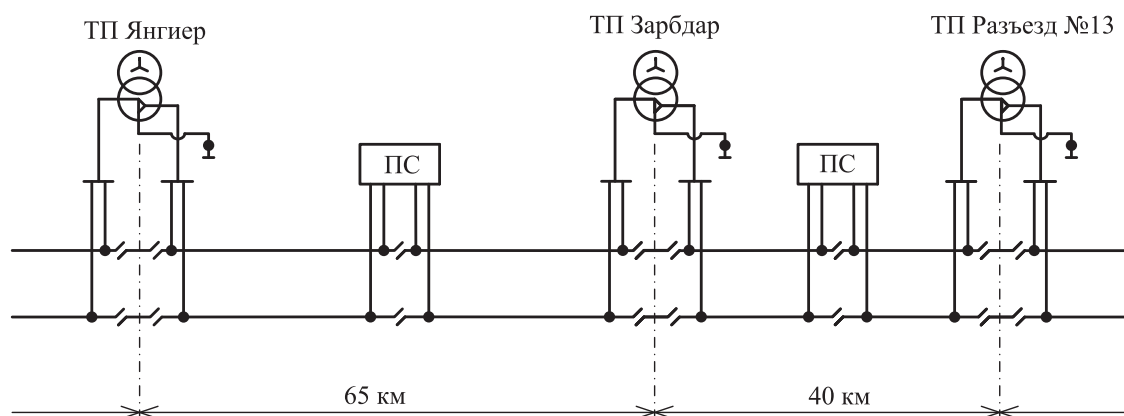


Рис. 2. Схема питания и секционирования контактной сети участка Янгиер – Разъезд № 13

ТАБЛИЦА 2. Основное оборудование тяговых подстанций

Подстанция	Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВА	Номинальное напряжение, кВ	Ток холостого хода, %	Напряжение короткого замыкания, %
Янгиер	ТДТНЖ-25000/110-69У1	25000	110/27,5	0,9	10,5
Зарбдар	ТДТНЖ-40000/220-76У1	40000	220/27,5	1,1	12,5
Разъезд 13	ТДТНЖ-25000/110-69У1	25000	110/27,5	0,9	10,5

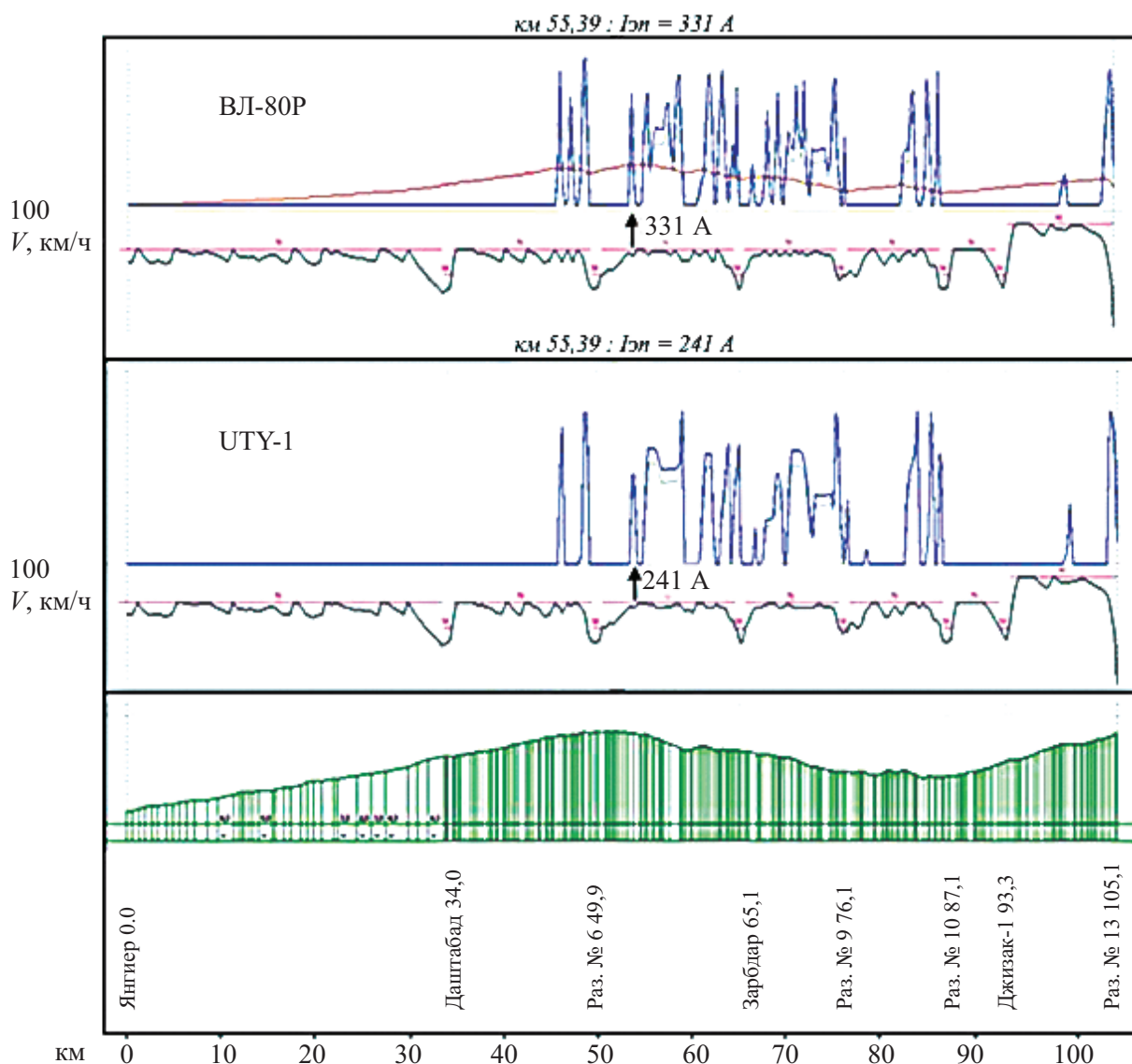


Рис. 3. Профиль пути участка Янгьер – Разъезд № 13, диаграммы токопотребления и скорости движения электровозов ВЛ-80Р и УТЧ-1

УТЧ-1 от тяговой подстанции Зарбдар с токами нагрузки электровозов, полученными по результатам тяговых и электрических расчётов, выполненных с помощью комплекса программ расчёта тягового электроснабжения (КОРТЭС) разработки ОАО «ВНИИЖТ».

Электровозы ВЛ-80Р или УТЧ-1, следующие по участку Янгьер – Разъезд № 13 с грузовыми составами массой 2200 т, при проходе 55 километра, удалённого от тяговой подстанции Зарбдар на 10 км, потребляют из тяговой сети в данной точке 331 А и 241 А, соответственно.

Метод исследования

Для решения научной задачи разработана имитационная модель электрической железной дороги в пакете MATLAB/Simulink (рис. 4) [2]. Модель включает в себя модули источника питания системы внешнего электроснабжения 1 [5], силового трансформатора подстанции 2, эквивалентной электротяговой сети 3, принятой в соответствии с [4] для однопутного участка с удельным активным сопротивлением $R = 0,194$ Ом и с индуктивностью $L = 1,477$ мГн на 1 км длины контактной сети.

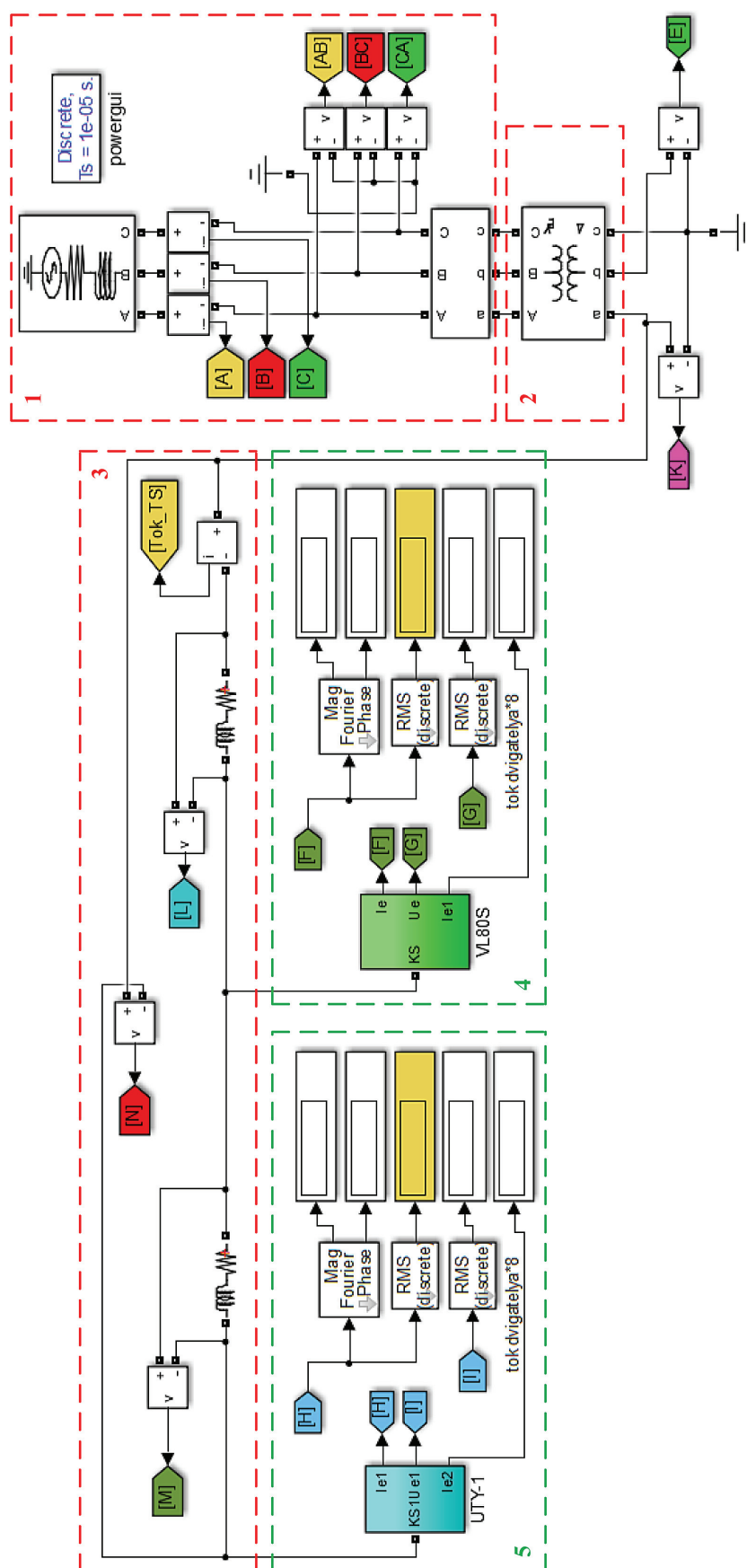


Рис. 4. Реализация имитационной модели в пакете Matlab/Simulink для мгновенной схемы электроподводящей сети по приведённым исходным данным

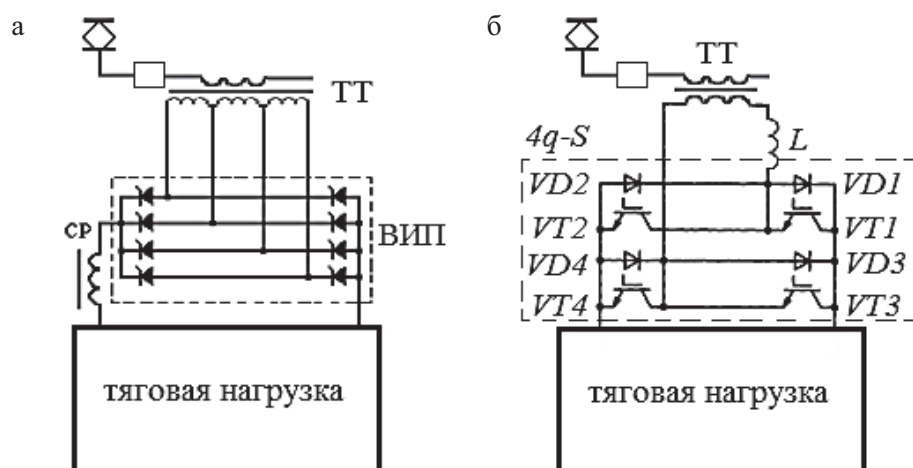


Рис. 5. Модели тяговых преобразователей для электровозов ВЛ-80Р (а) и УТУ-1 (б) в программе Matlab/Simulink

Модели тяговых преобразователей электровозов 4 и 5 представлены на рис. 5.

Модель силового трёхфазного трансформатора тяговой подстанции выполнена с учётом особенностей его работы на однофазную нагрузку электротяговой сети [15].

Силовые схемы электровозов в модели представлены блоками ТТ, ВИП (4q-S) [12] и тяговой нагрузкой. Питание тяговых двигателей осуществляется от преобразователей однофазного тока контактной сети в постоянный ток. Асинхронный тяговый двигатель с АИН ШИМ представлен эквивалентной активной нагрузкой с противо-ЭДС (E_d) для контура постоянного напряжения [14]. На рис. 5 представлены модели выпрямителя с зонно-фазовым регулированием ВЛ-80Р (рис. 5а) и четырёхквadrантным преобразователем с импульсным управлением УТУ-1 (рис. 5б) [9].

Адекватность математической модели подтверждена удовлетворительным совпадением результатов моделирования с данными, полученными в работах [6, 7], а также на макет-модели электрической железной дороги в учебно-исследовательской лаборатории ПГУПС.

Качество электрообеспечения тяговой нагрузки на линии Янгьер – Разъезд № 13 оценено по результатам анализа процессов в электротяговой сети с помощью разработанной имитационной модели. За показатели качества приняты коэффициент мощности,

значения гармонических составляющих напряжения и тока до 20-го порядка [1], полный (суммарный) коэффициент гармоник напряжения с учётом влияния всех гармоник напряжения до 20-го порядка $k_{U(n)}$ в точке передачи электроэнергии, потоки активной, реактивной мощности и мощности искажения, а также мощность потерь электроэнергии в электротяговой сети.

На рис. 6 приведены диаграммы напряжений, токов и мощностей для рассматриваемых электровозов в режиме, указанном в исходных данных.

Из анализа диаграмм (рис. 6) следует, что активная мощность передаётся к ЭПС основной гармонической составляющей $P_{(1)}$, а мощность искажения D не участвует в передаче энергии от ТП к ЭПС, а носит характер обмена энергией так же, как и реактивная составляющая мощности основной гармонической составляющей $Q_{(1)}$. Искажение по току при эксплуатации электровоза УТУ-1 значительно меньше, чем у электровоза ВЛ-80Р.

Анализ результатов моделирования режимов работы электротяговой сети

При синусоидальных напряжении и токе полная, активная и реактивная мощности выражаются следующим образом:

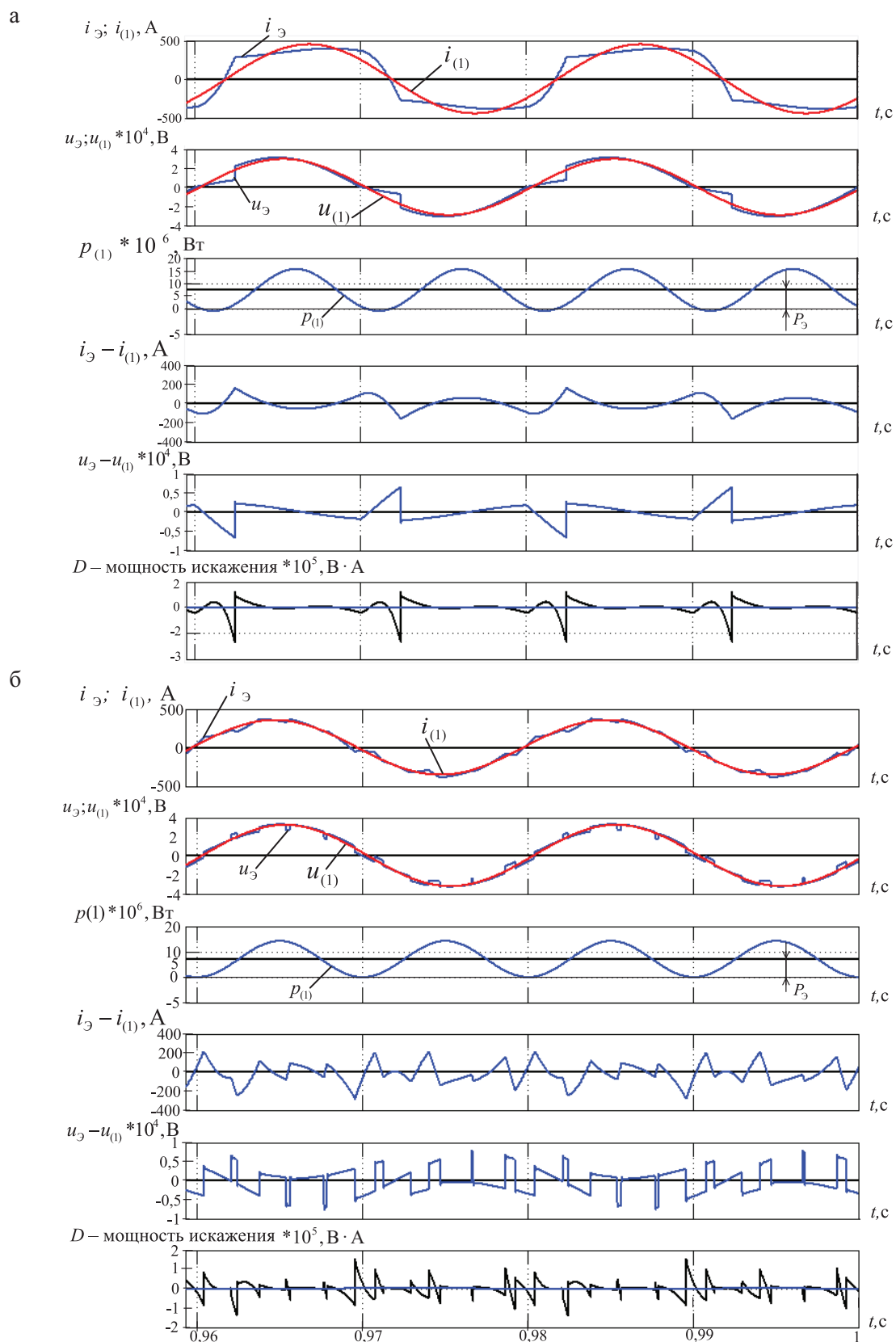


Рис. 6. Диаграмма токов, напряжений и мощностей электровозов ВЛ-80Р (а) и УТУ-1 (б) для режима работы на 55 км линии Ташкент – Самарканд с поездами массой 2200 т

$$S = U \cdot I;$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi;$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi,$$

где U, I – эффективные значения напряжения и тока, соответственно; φ – фазовый угол сдвига между кривыми напряжения и тока.

Мгновенная мощность в этом случае составляет [4]:

$$p(\omega t) = ui = UI[\cos - \cos(2\omega t - \varphi)].$$

Мгновенная мощность (см. рис. 6) пульсирует с двойной частотой сети относительно среднего значения $P = UI \cos \varphi$.

В реальной схеме токи и напряжения электропроводной сети несинусоидальны и содержат кроме основной гармонической спектр высших гармонических составляющих.

При несинусоидальности тока и напряжения [3] полная мощность определяется произведением эффективных значений несинусоидальных напряжения и тока:

$$S = U \cdot I = \sqrt{U_{(1)}^2 + \sum_{n>1} U_{(n)}^2} \cdot \sqrt{I_{(1)}^2 + \sum_{n>1} I_{(n)}^2}, \quad (1)$$

где U и I – эффективные значения полных напряжения и тока, соответственно; $U_{(1)}$ и $I_{(1)}$ – эффективные значения основных гармонических составляющих напряжения и тока, соответственно; $U_{(n)}$ и $I_{(n)}$ – эффективные значения высших гармонических составляющих напряжения и тока порядка n , соответственно.

При допущении передачи активной мощности за счёт основной гармонической составляющей напряжения и тока

$$P_{(1)} = U_{(1)} \cdot I_{(1)} \cdot \cos \varphi_{(1)},$$

где $\varphi_{(1)}$ – фазовый угол между основными гармоническими составляющими напряжения и тока.

Условная неактивная мощность определяется высшими гармоническими составляющими

и реактивной составляющей основной гармоники:

$$Q = \sqrt{S^2 - P_{(1)}^2}.$$

Коэффициент мощности определяется по формуле

$$k_m = \frac{P_{(1)}}{S} = \frac{U_{(1)}}{U} \cdot \frac{I_{(1)}}{I} \cdot \cos \varphi_{(1)} = k_{uU} \cdot k_{uI} \cdot \cos \varphi_{(1)},$$

где k_{uU} и k_{uI} – коэффициенты искажения по напряжению и току, соответственно.

В свою очередь, эквивалентная неактивная мощность Q может быть разделена на реактивную мощность основной гармонической составляющей и мощность искажения, определяемую высшими гармоническими составляющими тока и напряжения.

Указанные составляющие мощности представлены графически в виде совокупности треугольников мощностей для основной гармонической составляющей и дополнительным треугольником искажения [4] (рис. 7).

Используя диаграмму (рис. 7), выделим в составе полной мощности S составляющую

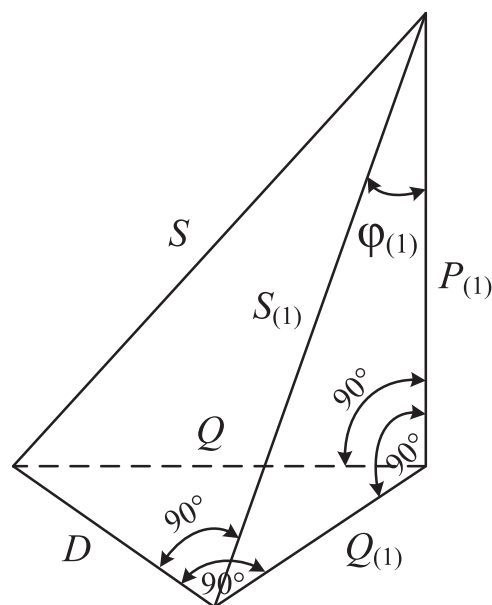


Рис. 7. Диаграмма определения полной, активной и реактивной мощностей и мощности искажения

D , зависящую от высших гармонических составляющих напряжения и тока:

$$D = \sqrt{S^2 - S_{(1)}^2}. \quad (2)$$

Исследуем содержание составляющих полной мощности, проанализировав выражение (1). Раскроем выражение (1) в форме суммы квадратов составляющих мощности, определяемых произведениями квадратов гармонических составляющих напряжения и тока, чередующихся по сочетаниям номеров гармонических составляющих до девятого порядка. Результаты выделения квадратов составляющих мощности систематизированы в табл. 3.

Из состава полной мощности S выделены квадраты полной мощности $S_{(1)}^2$ и высших $D_{(3)}^2, D_{(5)}^2, D_{(7)}^2, D_{(9)}^2$ гармонических составляющих, а также составляющих полной мощности с разными сочетаниями номеров высших гармонических составляющих напряжения и тока. Например, $D_{(1,3)}^2$ соответствует произведению квадрата напряжения первой и квадрата третьей гармонических составляющих.

Из анализа компонентов мощности, приведённых в табл. 3, принято предположение, что составляющие мощности разделяются на 3 группы: гармонические составляющие мощности высших порядков (диагональ таблицы), составляющие от основных гармонических напряжения или тока и гармонических составляющих высшего порядка тока и напряжения (вертикаль и горизонталь таблицы) и все

остальные сочетания номеров гармоник высшего порядка (оставшиеся клетки таблицы).

Таким образом, активная мощность, передаваемая к потребителю, определяется активной мощностью основной гармоники, а неактивная мощность обмена энергией между источником и потребителем определяется по выражению

$$Q = \sqrt{Q_{(1)}^2 + D^2},$$

где по формуле (2)

$$D = \sqrt{\sum_{n=1}^9 U_{(n)}^2 \cdot \sum_{n=1}^9 I_{(n)}^2 - U_{(1)}^2 \cdot I_{(1)}^2}.$$

По указанным формулам рассчитана мощность основных и высших гармонических составляющих тока и напряжений тяговой сети у рассматриваемых электровазов при нахождении их на расстоянии 10 км от тяговой подстанции. Результаты расчётов приведены в правой части табл. 4–7.

Результаты гармонического анализа токов и напряжений питающих линий тяговой подстанции и электровазов с разными типами управления приведены в левой части табл. 4–7. Выделены основные и нечётные высшие гармонические составляющие до 20-го порядка.

Результаты расчётов, приведённые в табл. 4–7, при применении электровазов с четырёхквadrантным преобразователем с импульсным регулированием и электровазов с

ТАБЛИЦА 3. Компоненты квадрата полной мощности электрической сети с несинусоидальными током и напряжением

$S_{(1)}^2 = U_{(1)}^2 \cdot I_{(1)}^2$	$D_{(1,3)}^2 = U_{(1)}^2 \cdot I_{(3)}^2$	$D_{(1,5)}^2 = U_{(1)}^2 \cdot I_{(5)}^2$	$D_{(1,7)}^2 = U_{(1)}^2 \cdot I_{(7)}^2$	$D_{(1,9)}^2 = U_{(1)}^2 \cdot I_{(9)}^2$
$D_{(3,1)}^2 = U_{(3)}^2 \cdot I_{(1)}^2$	$D_{(3)}^2 = U_{(3)}^2 \cdot I_{(3)}^2$	$D_{(1,3)}^2 = U_{(3)}^2 \cdot I_{(5)}^2$	$D_{(1,3)}^2 = U_{(3)}^2 \cdot I_{(7)}^2$	$D_{(1,3)}^2 = U_{(3)}^2 \cdot I_{(9)}^2$
$D_{(1,3)}^2 = U_{(5)}^2 \cdot I_{(1)}^2$	$D_{(1,3)}^2 = U_{(5)}^2 \cdot I_{(3)}^2$	$D_{(5)}^2 = U_{(5)}^2 \cdot I_{(5)}^2$	$D_{(1,3)}^2 = U_{(5)}^2 \cdot I_{(7)}^2$	$D_{(1,3)}^2 = U_{(5)}^2 \cdot I_{(9)}^2$
$D_{(1,3)}^2 = U_{(7)}^2 \cdot I_{(1)}^2$	$D_{(1,3)}^2 = U_{(7)}^2 \cdot I_{(3)}^2$	$D_{(1,3)}^2 = U_{(7)}^2 \cdot I_{(5)}^2$	$D_{(7)}^2 = U_{(7)}^2 \cdot I_{(7)}^2$	$D_{(1,3)}^2 = U_{(7)}^2 \cdot I_{(9)}^2$
$D_{(1,3)}^2 = U_{(9)}^2 \cdot I_{(1)}^2$	$D_{(1,3)}^2 = U_{(9)}^2 \cdot I_{(3)}^2$	$D_{(1,3)}^2 = U_{(9)}^2 \cdot I_{(5)}^2$	$D_{(1,3)}^2 = U_{(9)}^2 \cdot I_{(7)}^2$	$D_{(9)}^2 = U_{(9)}^2 \cdot I_{(9)}^2$

ТАБЛИЦА 4. Значения гармонических составляющих напряжения, тока и мощности питающей линии тяговой подстанции при эксплуатации ВЛ-80Р

Гармоники	U_m , В	I_m , А	$\varphi_{(n)}$	$P(n)$, кВт	$Q_{1(n)}$, квар	$S(n)$, кВА	S , кВА	D , квар	k_m	$\frac{k_{nU}}{k_{nI}}$
1-я	38 600	447,8	-30,17	7472	4343	8642,5	8970,5	2403,3	0,83	$\frac{0,996}{0,966}$
3-я	2303	105,1	92,11	4,457	120,94	121,02				
5-я	1762	48,33	268,5	1,1146	42,56	42,58				
7-я	1167	22,92	91,54	0,359	13,37	13,34				
9-я	715,1	10,92	91,88	0,128	3,9	3,90				
Эфф. знач.	27 388	328								

ТАБЛИЦА 5. Значения гармонических составляющих напряжения, тока и мощности электроваз ВЛ-80Р

Гармоники	U_m , В	I_m , А	$\varphi_{(n)}$	$P(n)$, кВт	$Q_{1(n)}$, квар	$S(n)$, кВА	S , кВА	D , квар	k_m	$\frac{k_{nU}}{k_{nI}}$
1-я	36 810	447,8	-28,015	7276	3871	8241,7	8612,5	2499,74	0,84	$\frac{0,987}{0,966}$
3-я	3798	105,1	94,51	15,7	199	199,59				
5-я	2901	48,33	267	3,669	70	70,1				
7-я	1921	22,92	92,59	0,995	22	22				
9-я	1177	10,92	92,71	-0,3	6,42	6,43				
Эфф. знач.	26 295	328								

ТАБЛИЦА 6. Значения гармонических составляющих напряжения, тока и мощности питающей линии тяговой подстанции при эксплуатации УТУ-1

Гармоники	U_m , В	I_m , А	$\varphi_{(n)}$	$P(n)$, кВт	$Q_{1(n)}$, квар	$S(n)$, кВА	S , кВА	D , квар	k_m	$\frac{k_{nU}}{k_{nI}}$
1-я	40 640	354,6	8,56	7125,2	1072,5	7205,5	7213	328,8	0,988	$\frac{0,999}{0,999}$
3-я	366,7	15,85	91,57	0,08	2,905	2,906				
5-я	27,58	0,3	-163,1	0,004	0,0012	0,004				
7-я	19,19	0,1	-119,3	0,0005	0,0009	0,001				
9-я	17,34	0,37	70	0,001	0,003	0,003				
Эфф. знач.	28 738	251								

ТАБЛИЦА 7. Значения гармонических составляющих напряжения, тока и мощности электровоза УТУ-1

Гармоники	U_m , В	I_m , А	$\varphi_{(n)}$	$P(n)$, кВт	$Q_{1(1)}$, квар	$S(n)$, кВА	S , кВА	D , квар	k_m	$\frac{k_{nU}}{k_{nI}}$
1-я	40 230	354,6	11	7001,7	1361	7132,8	7140,7	336,56	0,981	$\frac{0,999}{0,999}$
3-я	601,9	15,85	93,88	0,322	4,76	4,77				
5-я	44,66	0,3	-162,5	0,006	0,002	0,006				
7-я	30,55	0,1	-123,1	0,0009	0,001	0,0017				
9-я	29,66	0,37	71	0,0018	0,005	0,005				
Эфф. знач.	28 450	251								

зонно-фазовым управлением существенно различаются по значениям мощности искажения, которые определяются регулированием угла сдвига основной гармоники тока относительно напряжения и формированием кривой потребляемого тока, близкой к синусоидальной кривой. Значения $\varphi_{(n)}$, приведённые в табл. 6, 7, показывают, что электровоз УТУ-1 является формирователем синусоидального тока и генератором опережающей реактивной мощности.

Сравнение режимов работы сети при питании рассматриваемых электровозов с одинаковой массой поезда показывает, что при применении ЭПС с 4q-S с импульсным регулированием потери в электротяговой сети сокращаются в 1,5–2 раза, так как эффективное значение тока при той же мощности снижается примерно на 30% за счёт существенного уменьшения реактивной мощности. Благодаря значительному снижению реактивной энергии и, как следствие, полной энергии, коэффициент мощности на тяговой подстанции $k_m = 0,99$, а на электровозе $k_m = 0,98$, тогда как при работе электровоза ВЛ-80 Р k_m на тяговой подстанции и на самом электровозе составил 0,83 и 0,84, соответственно. Применение электровоза с повышенным коэффициентом мощности существенно снижает потребление реактивной мощности, а также способствует сокращению потерь в электротяговой сети.

Сравнение показывает, что увеличение искажений тока и напряжения приводит к увеличению неактивной мощности, зависящей от реактивной мощности основной гармоники и мощности искажения.

Увеличение числа учитываемых высших гармонических составляющих отражается на характере изменения значений гармонических напряжения, тока и мощности высшего порядка. Для ВЛ-80Р характерно существенное изменение в спектре высших гармонических тока: значения с повышением порядка монотонно уменьшаются (рис. 8а). Для УТУ-1 характерно изменение в спектре напряжения по определённой закономерности: с увеличением порядка высших гармонических напряжения в зоне частот, близких к частоте модуляции, отмечаются повышенные значения амплитуд соответствующих гармонических напряжения (рис. 8б).

На рис. 8 приведены результаты спектрального анализа высших гармонических составляющих тока электровоза с однофазным выпрямителем, напряжений электровоза с четырёхквadrантным преобразователем и тяговой подстанции при его работе, подтверждающие общие закономерности формирования спектров несинусоидального тока и напряжения с коммутационными искажениями при работе входных преобразователей однофазного постоянного тока.

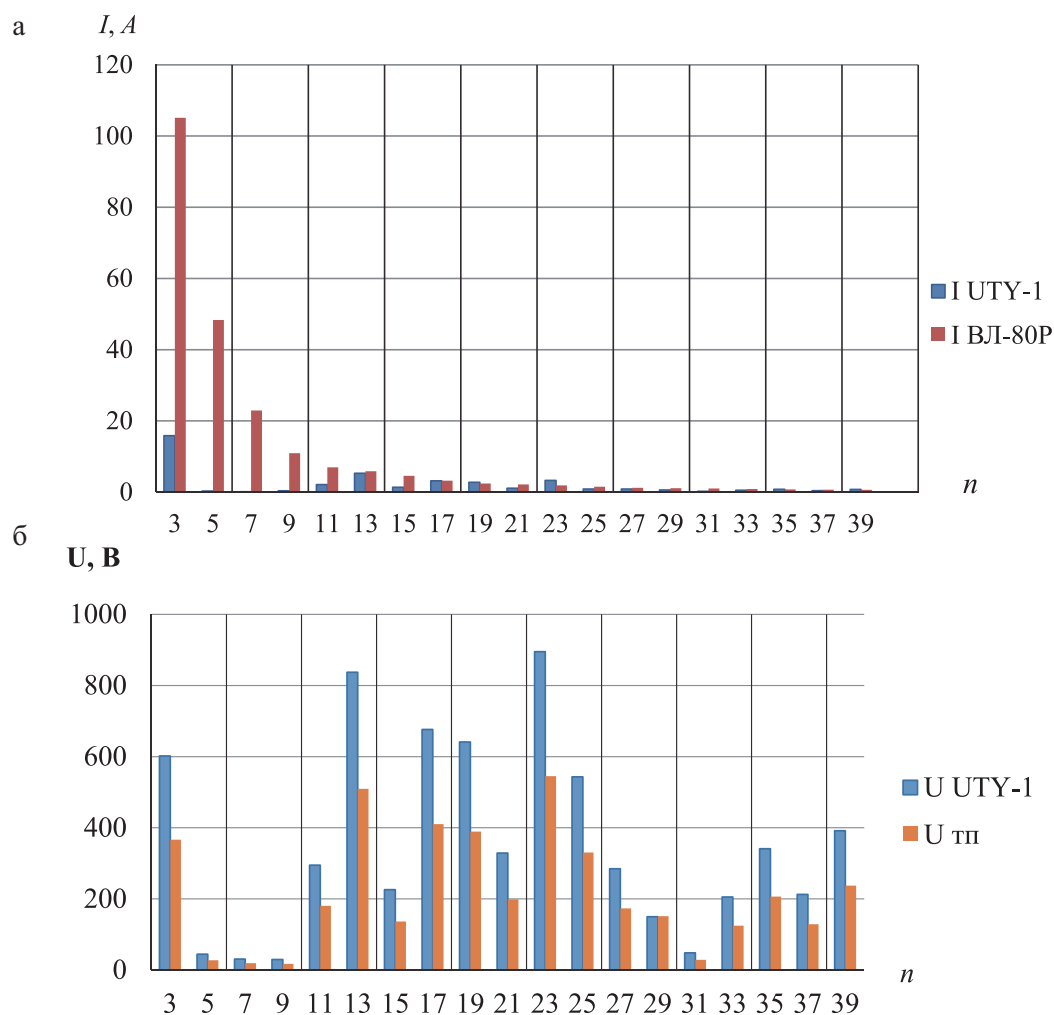


Рис. 8. Диаграммы высших гармонических тока ВЛ-80 Р (а) и напряжений UTU-1 и тяговой подстанции при работе UTU-1 (б)

Выводы

Электропоезды ВЛ-80Р и UTU-1 являются источниками нелинейных искажений напряжения и тока электротяговой сети, вызываемых генерированием преобразователями энергии тягового электропривода высших гармонических составляющих напряжения и тока с частотами, многократно превышающими частоту сети 50 Гц. Спектральный состав и мощность высших гармонических составляющих, определяющие дополнительные потери и мощность искажения, существенно различаются для электропоездов с зонно-фазовым регулированием и с импульсным управлением. Выявлена особенность формирования спек-

трального состава напряжения и тока для различных электропоездов. Наибольшие искажения по току – у преобразователей с зонно-фазовым регулированием, по напряжению – на высоких частотах для импульсных преобразователей 4q-S.

Качество электропотребления электропоездами с зонно-фазовым регулированием и с импульсным управлением преобразователей характеризуется различающимися значениями показателей обмена в сети реактивной энергией и энергией искажения при передаче одинаковой по мощности активной энергии.

Интегральным показателем качества электропотребления является коэффициент мощности, который оценивается значениями

0,84 для ВЛ-80Р и 0,98 для УТУ-1. Увеличение коэффициента мощности электровозов УТУ-1 по сравнению с электровозами ВЛ-80Р при равной передаваемой активной мощности позволяет уменьшить эффективное значение тока электротяговой сети на 25–30% за счёт компенсации реактивной энергии основной гармонической составляющей на самом электровозе и формирования тока, близкого к синусоиде.

Библиографический список

1. Алексеев А. С. Система автоматического регулирования тока коллекторных тяговых двигателей электровоза : дис. ... канд. тех. наук : 05.09.03 / Алексеев А. С. – М., 2009. – 302 с.
2. Ануфриев И. Е. MATLAB 7 / И. Е. Ануфриев, А. Б. Смирнов, Е. Н. Смирнова. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
3. Бурков А. Т. Управление электроэнергетическими процессами локомотивов с асинхронным приводом : дис. ... докт. тех. наук : 05.22.07 / А. Т. Бурков. – Л. : ЛИИЖТ, 1982. – 470 с.
4. Бурков А. Т. Электроника и преобразовательная техника / А. Т. Бурков. – Т. 2. – М. : УМЦ по образованию на ж.-д. транспорте, 2015. – 307 с.
5. Бурьяноватый А. И. Использование пакета MATLAB-Simulink для расчёта режимов электрических сетей / А. И. Бурьяноватый, М. А. Иванов, А. Е. Шаговик // Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов на железнодорожном транспорте: материалы VI Междунар. симп. «Элтранс-2011», 25–28 окт. 2011 г. – СПб. : ПГУПС, 2013–584 с.
6. Быков Ю. Г. Регулировочные характеристики однофазного обратимого преобразователя напряжения / Ю. Г. Быков, Ю. М. Иньков, М. Д. Симонен // Электричество. – 1996. – № 9. – С. 63–65.
7. Гарбузов И. И. Влияние бортовых компенсирующих устройств на энергетические показатели качества электровозов переменного тока : дис. ... канд. тех. наук : 05.09.03 / И. И. Гарбузов. – М. : МГУПС (МИИТ), 2015. – 181 с.
8. Дашенко О. Ф. MATLAB в инженерных и научных расчетах / О. Ф. Дашенко, В. Х. Кириллов,

Л. В. Коломиец, В. Ф. Оробей. – Одесса : Астропринт, 2003. – 214 с.

9. Джуров И. А. Повышать энергоэффективность рекуперативного торможения / И. А. Джуров // Локомотив. – 2010. – № 7. – С. 4–6.

10. Дьяконов В. П. MATLAB 7.* / R2006 / R2007 : самоучитель / В. П. Дьяконов. – М. : ДМК Пресс, 2008. – 768 с.

11. Кулинич Ю. М. Повышение качества электроэнергии, потребляемой с электровозом однофазного постоянного тока, на основе применения гибридного компенсатора реактивной мощности : дис. ... д-ра тех. наук : 05.09.03 / Ю. М. Кулинич. – М., 2002. – 270 с.

12. Литовченко В. В. 4q-S четырёхквadrантный преобразователь электровозов переменного тока / В. В. Литовченко // Изв. вузов. Электромеханика. – 2000. – № 3. – С. 64–73.

13. Савоськин А. Н. Исследование электромагнитных процессов в электрической железной дороге переменного тока на базе вычислительного комплекса реального времени / А. Н. Савоськин, А. А. Чучин, Д. И. Болдин, М. В. Телегин // Вестн. ВЭЛНИИ. – 2011. – № 1 (61). – С. 23–38.

14. Телегин М. В. Адаптивная система комбинированного автоматического управления током тяговых двигателей электроподвижного состава : дис. ... канд. тех. наук : 05.13.06 / М. В. Телегин. – М., 2013. – 267 с.

15. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPower Systems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс ; СПб. : Питер, 2008. – 288 с.

References

1. Alekseyev A. S. Sistema avtomaticheskogo regulirovaniya toka kollektornykh tyagovykh dvigateley elektrovoza [System for Automatic Current Control in Commutator Traction Engine of an Electric Locomotive]. Moscow, 2009. 302 p.
2. Anufriyev I. Ye., Smirnov A. B. & Smirnova Ye. N. MATLAB 7. St. Petersburg, BKhV-Petersburg, 2005. 1104 p.
3. Burkov A. T. Upravleniye elektroenergeticheskimi protsessami lokomotivov s asinkhronnym privodom

[Control of Power Processes in Induction-motor Drive Locomotives]. Leningrad, LIIZhT, 1982. 470 p.

4. Burkov A. T. Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika [Electronics and Converter Equipment]. Vol. 2. Moscow, UMTs po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2015. 307 p.

5. Buryanovaty A. I., Ivanov M. A. & Shagovik A. Ye. Ispolzovaniye paketa MATLAB-Simulink dlya rascheta rezhimov elektricheskikh setey [Application of MATLAB-Simulink Software Suite to Calculation of Electrical Networks' Regimes]. *Elektrifikatsiya i razvitiye infrastruktury energoobespecheniya tyagi poyezdov na zheleznodorozhnom transporte: materialy VI Mezhdunarodnogo simpoziuma „Eltrans-2011“ (Electrification and Development of Power Provision Infrastructure for Train Traction on Railway Transport: Proc. of 6th Intl. Symp. “Eltrans-2011”)*, Oct. 25–28, 2011. St. Petersburg, PGUPS, 2013. 584 p.

6. Bykov Yu. G., Inkov Yu. M. & Simonov M. D. *Elektrichestvo – Electricity*, 1996, no. 9, pp. 63–65.

7. Garbuzov I. I. Vliyaniye bortovykh kompensiruyushchikh ustroystv na energeticheskiye pokazateli kachestva elektrozovov peremennogo toka [Influence of On-board Compensating Devices on Power Quality Indices of Alternating Current Locomotives]. Moscow, MGUPS (MIIT), 2015. 181 p.

8. Dashchenko O. F., Kirillov V. Kh., Kolomiets L. V. & Orobey V. F. MATLAB v inzhenernykh i nauchnykh raschetakh [MATLAB in Engineering and Scientific Calculations]. Odesa, Astroprint, 2003. 214 p.

9. Dzhurov I. A. *Lokomotiv – Locomotive*, 2010, no. 7, pp. 4–6.

10. Dyakonov V. P. MATLAB 7.*/R2006/R2007. Samouchitel [MATLAB 7.*/R2006/R2007. Self-teaching Guide]. Moscow, DMK Press, 2008. 768 p.

11. Kulinich Yu. M. Povyscheniye kachestva elektroenergii, potrebyayemoy s elektrozovom odnofazno-postoyannogo toka, na osnove primeneniya gibridnogo kompensatora reaktivnoy moshchnosti [Improving Quality of Power Consumed by Single-phase Direct-current Electrical Locomotive Through Application of Hybrid Reactive Capacity Correcting Device]. Moscow, 2002. 270 p.

12. Litovchenko V. V. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika – Univ. Journ. Electromechanics*, 2000, no. 3, pp. 64–73.

13. Savoskin A. N., Chuchin A. A., Boldin D. I. & Telegin M. V. *Vestnik VEINII – VEINII JSC Proc.*, 2011, no. 1 (61), pp. 23–38.

14. Telegin M. V. Adaptivnaya sistema kombinirovannogo avtomaticheskogo upravleniya tokom tyagovykh dvigateley elektropodvizhnogo sostava [Adaptive System of Combined Automatic Current Control of Electrical Rolling Stock Tractive Engines]. Moscow, 2013. 267 p.

15. Chernykh I. V. Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPower Systems i Simulink [Simulation of Electrotechnical Devices in MATLAB, SimPower Systems and Simulink]. Moscow, DMK Press; St. Petersburg, Piter, 2008. 288 p.

БУРКОВ Анатолий Трофимович – доктор техн. наук, профессор; *МИРСАЙТОВ Мирзиёд Мирзадович – аспирант, Mirziyodmail@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 004.056.53

Н. В. Евглевская, Г. А. Бекбаев, А. А. Привалов, Д. Н. Шахматов**МОДУЛЬ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ
ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ
СЕТИ ЕДИНОГО ДОРОЖНОГО ДИСПЕТЧЕРСКОГО ЦЕНТРА УПРАВЛЕНИЯ
ПЕРЕВОЗКАМИ ОАО «РЖД» НА ОСНОВЕ РАЦИОНАЛЬНОГО ВЫБОРА
ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ**

Дата поступления: 25.04.2016

Решение о публикации: 25.04.2016

Цель: Создать модуль поддержки принятия решений по управлению информационной безопасностью (ИБ) телекоммуникационной сети (ТКС) единого дорожного диспетчерского центра управления перевозками (ЕДЦУ) ОАО «РЖД», позволяющего проводить комплексный анализ ИБ объектовой ТКС и выявлять критические уязвимости в системе защиты, а также поддерживать выработку мер по их устранению. **Методы:** Для совместной согласованной оценки возможностей нарушителя и системы управления информационной безопасностью (СУИБ) разработана комплексная модель функционирования ТКС ЕДЦУ ОАО «РЖД» в условиях реализации нарушителем информационных воздействий. При моделировании применялись метод топологического преобразования стохастических сетей, метод марковских цепей с дискретными состояниями и с непрерывным временем. Для оценки ИБ ТКС ЕДЦУ разработана методика оценки ИБ ТКС ЕДЦУ ОАО «РЖД», функционирующей в условиях реализации нарушителем информационных воздействий. На основе градиентного метода Гаусса – Зейделя создана методика выбора рациональных мероприятий по защите ТКС ЕДЦУ ОАО «РЖД». **Результаты:** Разработан модуль специального математического и программного обеспечения подсистемы поддержки принятия решений СУИБ ТКС ЕДЦУ ОАО «РЖД» на основе комплексной модели функционирования ТКС ЕДЦУ ОАО «РЖД» в условиях реализации нарушителем информационных воздействий, методики оценки ИБ ТКС, методики выбора рациональных мероприятий по защите ТКС ЕДЦУ ОАО «РЖД». Получены результаты оценки ИБ ТКС ЕДЦУ ОАО «РЖД». **Практическая значимость:** Использование модуля специального математического и программного обеспечения подсистемы поддержки принятия решений СУИБ ТКС ЕДЦУ позволяет оперативно принимать решение по нейтрализации (предотвращению) информационных воздействий.

Нарушитель, информационное воздействие, телекоммуникационная сеть, угроза, информационная безопасность.

***Natalya V. Evglevskaya**, electrician, n.evglevskaya@gmail.com (Central Regional Communication Centre), **Gamzatdin A. Bekbaev**, post graduate student, gamzat-86@mail.ru, **Andrey A. Privalov**, D. Military Sci., professor, aprivalov@inbox.ru (Petersburg State Transport University), **Dmitriy N. Shakhmatov**, senior researcher, d.shakhmatov@mail.ru (S.M. Budyonny Military Telecommunications Academy) **DECISION-MAKING SUPPORT MODULE FOR TELECOMMUNICATION NETWORK INFORMATION SECURITY MANAGEMENT OF THE JOINT ROAD DISPATCHING TRANSPORTATIONS MANAGEMENT CENTRE OF RUSSIAN RAILWAYS JSC BASED ON RATIONAL CHOICE OF ORGANISATIONAL AND TECHNICAL ACTIONS**

Objective: To create decision-making support module for telecommunication network (TCN) information security (IS) management of joint road dispatching transportations management centre (JRDTMC) of

Russian Railways JSC that allows to carry out object-specific TCN IS complex analysis, to identify critical vulnerabilities of security system, and to support measures for eliminating them. **Methods:** For a concerted joint evaluation of attacker and information security management system (ISMS) possibilities, a complex model of Russian Railways JSC JRDTMC TCN functioning in conditions when attacker realizes information impacts (II) was created. For the simulation, a method of topological transformation of stochastic networks (TTSN) and the method of Markov chains with discrete states and continuous time were used. For JRDTMC TCN IS evaluation, a method of evaluation of Russian Railways JSC JRDTMC TCN IS functioning under conditions when an attacker realizes II was developed. Using Gauss-Seidel gradient, a method of rational actions choice for protection of Russian Railways JSC JRDTMC TCN is created. **Results:** Special mathematical and software module (SMS) of decision-making support subsystem (DMSS) of Russian Railways JSC JRDTMC TCN ISMS was created using the complex model of Russian Railways JSC JRDTMC TCN functioning in conditions when attacker realizes II, TCN IS valuation methods, rational actions choice methods for protection of Russian Railways JSC JRDTMC TCN. The Russian Railways JSC JRDTMC TCN IS valuation results were obtained. **Practical importance:** Using JRDTMC TCN ISMS DMSS SMS module allows to make decision on efficiency of II neutralization or prevention.

Attacker, information impact, telecommunication network, threat, information security.

По данным Департамента безопасности ОАО «РЖД», около 50% усилий направлено на внедрение средств обеспечения безопасности в имеющихся телекоммуникационных сетях (ТКС), 10% – на продление лицензий на антивирусное программное обеспечение, около 35% – на разработку и внедрение средств обеспечения безопасности для автоматизированных систем управления (АСУ), вновь создаваемых в ОАО «РЖД» [2].

Внедрение в АСУ продуктов современных инфокоммуникационных технологий влечет появление новых видов угроз безопасности информации, реализуя которые, нарушитель деструктивно воздействует на произвольные элементы ТКС. В таких условиях традиционные принципы построения системы обеспечения информационной безопасности (ИБ) ТКС недостаточно эффективны [14, 15]. Это обусловлено тем, что в большинстве случаев анализу подлежат частные угрозы ИБ и реализуются типовые методы их предотвращения без учета структуры, роли, места, особенностей функционирования ТКС, участвующей в технологическом процессе [14, 15].

Особенностью предлагаемого подхода к созданию модуля специального математического и программного обеспечения (СМПО)

подсистемы поддержки принятия решений (ПППР) системы управления информационной безопасностью (СУИБ) ТКС единого дорожного диспетчерского центра управления перевозками (ЕДЦУ) ОАО «РЖД» является его системность, позволившая представить ТКС ЕДЦУ в виде совокупности взаимосвязанных функциональных узлов и возможных каналов, используя которые, нарушитель может деструктивно воздействовать на сеть. В структуру модуля СМПО включена ПППР, предоставляющая администратору по ИБ ЕДЦУ перечень рациональных мероприятий, реализация которых обеспечит нейтрализацию актуальных угроз ИБ [14, 15].

Общая структура модуля СМПО ПППР СУИБ ТКС ЕДЦУ ОАО «РЖД»

Структура модуля СМПО представлена на рис. 1. Основным элементом модуля является submodule математического моделирования компьютерных атак и процесса добывания нарушителем данных по техническим каналам утечки информации (ТКУИ) в ЕДЦУ ОАО «РЖД» (submodule 4). В основе данного submodule лежит модель конфликта СУИБ и си-

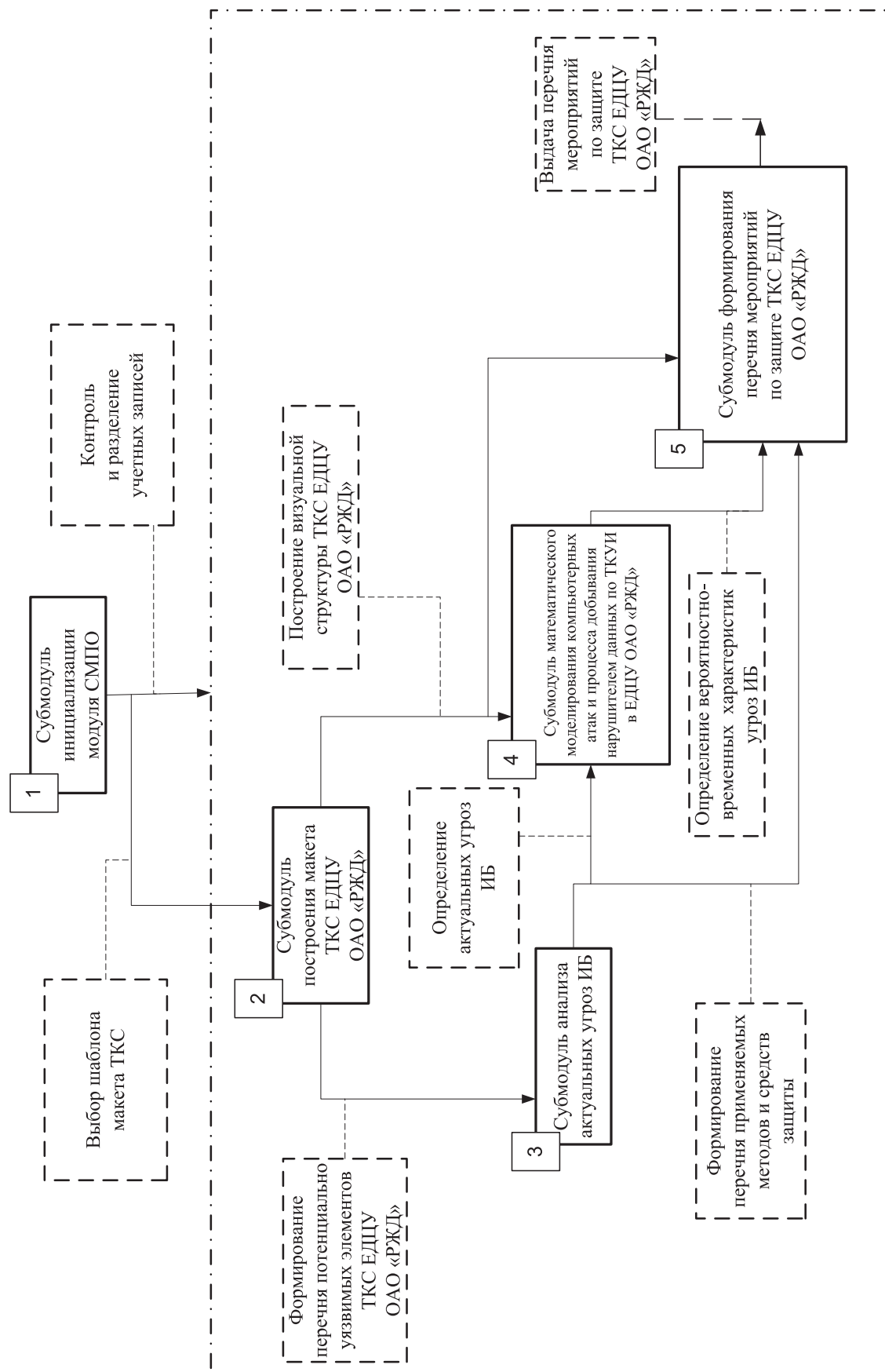


Рис. 1. Структура модуля СМПО НПР СУИБ ТКС ЕДЦУ ОАО «РЖД»

стемы нарушителя (СН). Исходными данными для указанной модели являются результаты моделирования процессов реализации информационных воздействий (ИВ) нарушителя на ТКС ЕДЦУ и функционирования ТКС ЕДЦУ в условиях реализации ИВ. В свою очередь, исходными данными для моделирования процесса реализации ИВ нарушителя на ТКС ЕДЦУ являются результаты моделирования процессов вскрытия нарушителем ТКУИ в ЕДЦУ; установки закладочных устройств (ЗУ) в ТКУИ; внедрения вредоносных программ в элементы ТКС ЕДЦУ; вскрытия ТКС ЕДЦУ техническими средствами компьютерной разведки нарушителя. Модель процесса вскрытия ТКУИ в ЕДЦУ разработана с использованием результатов моделирования ТКУИ, выявленных в ЕДЦУ. Исходными данными для моделирования процесса вскрытия ТКС ЕДЦУ техническими средствами компьютерной разведки нарушителя послужили результаты моделирования процессов идентификации узлов, сервисов, операционной системы ТКС ЕДЦУ, определения технической роли узлов сети. Для моделирования данных процессов, а также процесса функционирования ТКС в условиях реализации ИВ используются данные, характеризующие ТКС ЕДЦУ, а также нормативные модели и методики оценки ИБ.

Указанный субмодуль обеспечивает расчет вероятностно-временных характеристик процессов реализации нарушителем актуальных угроз и формирует перечень наиболее вероятных. Кроме того, субмодуль взаимодействует с единой системой мониторинга и администрирования ТКС, тем самым обеспечивая накопление статистических данных об инцидентах безопасности [8, 14, 15].

Актуальные угрозы определяются в субмодуле анализа актуальных угроз ИБ (субмодуль 3), который по результатам опроса пользователя (администратора ИБ ТКС ЕДЦУ) с учетом применяемых методов защиты информации определяет элементы ТКС, наиболее подверженные риску воздействия, и актуальные угрозы со стороны нарушителя. Чтобы облегчить процесс определения основных функци-

ональных элементов и сделать структуру ТКС ЕДЦУ более наглядной, разработан субмодуль построения макета ТКС ЕДЦУ ОАО «РЖД» (субмодуль 2). На заключительном этапе в субмодуле формирования перечня мероприятий по защите ТКС ЕДЦУ ОАО «РЖД» (субмодуль 5) формируются рекомендации администратору ИБ по устранению уязвимостей системы защиты и предотвращению угроз ИБ ТКС ЕДЦУ ОАО «РЖД». Субмодуль инициализации модуля СМПО (субмодуль 1) разделяет учетные записи на две категории: администратор и пользователь. Учетная запись «Администратор» обеспечивает управление учетными записями и устанавливается для администратора ИБ. Учетная запись «Пользователь» устанавливается для операторов рабочих станций и блокирует возможность присвоения прав администратора недобросовестным пользователям [1, 6–8, 15].

Модели, входящие в состав субмодуля 4, позволяют получить вероятностно-временные характеристики процессов реализации нарушителем ИВ в отношении элементов сети ЕДЦУ ОАО «РЖД» [4, 5, 12, 13].

Методика выбора рациональных мероприятий по защите ТКС ЕДЦУ ОАО «РЖД»

Чтобы обоснованно выбрать рациональные мероприятия по защите ТКС ЕДЦУ, разработана методика, позволяющая определять степени зависимости показателей оценки ИБ ТКС ЕДЦУ ОАО «РЖД», соответствующие требованиям нормативных документов, т. е. $\bar{T}_{\text{безоп}} \geq T_{\text{треб}} = 24 \text{ ч}$, $P_{\text{безоп}}(t) \geq P_{\text{треб}} = 0,95$ [3], от значений и диапазонов возможного изменения частных параметров, используемых в качестве исходных данных. Изменению каждого частного параметра соответствует определенная совокупность организационно-технических мероприятий (ОТМ). Таким образом, определяя диапазон изменения частных параметров, можно выбрать такую совокупность ОТМ, реализация которой позволит

ТКС ЕДЦУ соответствовать уровню защищенности от ИВ согласно [3].

В качестве показателя степени зависимости обобщенного показателя защищенности ТКС ЕДЦУ от ИВ, реализуемых нарушителем, выбрано приращение $\Delta P_{\text{безоп}}(T_{\text{треб}})$ значений вероятности пребывания ТКС ЕДЦУ в состоянии безопасности за время $T_{\text{треб}}$. При этом критерием выбора приращений является

$$\max_i \{ \Delta P_{\text{безоп}}(T_{\text{треб}}, x_i), i = \overline{1, N} \},$$

где x_i – частные показатели, используемые при моделировании в качестве исходных данных [3, 4, 8, 11, 12].

Помимо используемых при моделировании частных показателей x_i исходными данными являются диапазоны их возможного изменения Δx_i , определяемые как разность их конечного $x_{\text{ик}}$ и начального $x_{\text{ин}}$ значений, т. е. $\Delta x_i = x_{\text{ик}} - x_{\text{ин}}$.

Постановка задачи

Дана монотонная функция $P_{\text{безоп.}}(t)$, характеризующая распределение времени пребывания ТКС ЕДЦУ в состоянии безопасности. В общем случае на указанное время и, следовательно, на характер изменения $\Delta P_{\text{безоп.}}(t)$ влияет множество параметров $x_i, i = \overline{1, N}$, каждый из которых может изменяться в пределах между конечным $x_{\text{ик}}$ и начальным $x_{\text{ин}}$ значениями $\Delta x_i = x_{\text{ик}} - x_{\text{ин}}$.

Требуется определить максимальные степени зависимости значений вероятности пребывания ТКС ЕДЦУ в состоянии безопасности от значений и диапазонов изменения частных параметров с учетом вложенности моделей [4, 5, 12, 13].

$$N_i = \max f(\Delta P_{\text{безоп}}(t)_{xi}).$$

Решение

Поскольку для определения максимальных степеней N_i не требуется высокой точности

расчета значений приращений целевой функции в зависимости от изменения ее аргументов, а необходим лишь знак этого приращения и номер соответствующего ему аргумента, для уменьшения объема и времени вычислений для решения задачи целесообразно воспользоваться градиентным методом Гаусса – Зейделя с учетом свойства вложенности моделей [10, 11].

Чтобы определить значения $\Delta P_{\text{безоп}}(t)_{xi}$, вычисляют частные производные функции $P_{\text{безоп}}(t, x_i)$ по каждому параметру x_i , изменяющемуся в некоторых пределах Δx_i . Это возможно, так как по условию $P_{\text{безоп}}(t, x_i)$ является аналитической функцией в области определения каждой переменной $x_i, i = \overline{1, N}$. Применяя теорему Лагранжа [10, 11], получим

$$\begin{aligned} \Delta P_{i\text{безоп}}(t, x_i, i = \overline{1, N}) &= \\ &= \frac{dP_{\text{безоп}}(t, x_i, i = \overline{1, N})}{dx_i} \Delta x_i. \end{aligned} \quad (1)$$

Алгоритм выбора рациональных мероприятий по защите ТКС ЕДЦУ ОАО «РЖД» представлен на рис. 2.

На первом этапе вводят исходные данные [4, 5, 12].

На втором этапе рассчитывают функции распределения $C(t)$ времени реализации ИВ на ТКС ЕДЦУ, $G(t)$ времени вскрытия ТКС ЕДЦУ техническими средствами компьютерной разведки, $F(t)$ времени вскрытия ТКУИ и внедрения ЗУ, вероятности $P_{\text{безоп}}(t)$ пребывания ТКС ЕДЦУ в состоянии безопасности.

На третьем этапе сравнивают вычисленную на втором этапе $P_{\text{безоп}}(t)$ с требуемым значением [3]. Если критериальное условие выполняется, то подтверждается рациональность реализации запланированных мероприятий по защите ТКС ЕДЦУ.

В противном случае рассчитывают приращения $\Delta P_{\text{безоп}}(T_{\text{треб}})$ вероятности пребывания ТКС ЕДЦУ в состоянии безопасности за время $T_{\text{треб}}$.

Далее по формуле (1) рассчитывают $\{\Delta P_{\text{безоп}}\}_y$. При этом j -му элементу вектора $\{\Delta P_{\text{безоп}}\}_y$ соответствует i -й параметр моде-

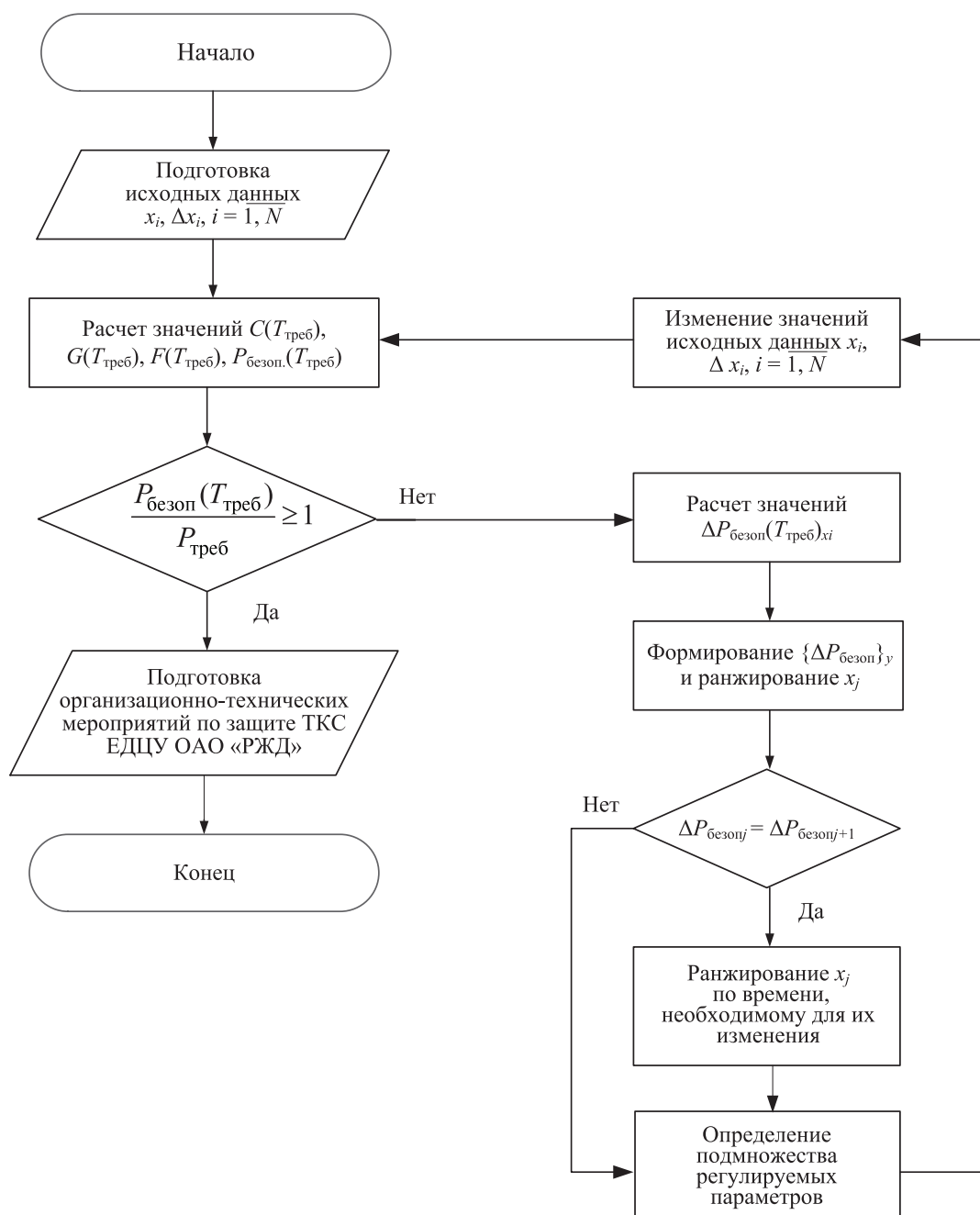


Рис. 2. Алгоритм выбора рациональных мероприятий по защите ТКС ЕДЦУ ОАО «РЖД»

ли процесса функционирования ТКС ЕДЦУ ОАО «РЖД» в условиях реализации нарушителем ИВ [5].

Если значение $P_{\text{безоп}j}$ соответствует требуемому, производится ранжирование x_j ; если значение $P_{\text{безоп}j}$ ниже требуемого, необходимо определить регулируемые параметры и после изменения значений исходных данных

повторно рассчитать $C(T_{\text{треб}})$, $G(T_{\text{треб}})$, $F(T_{\text{треб}})$, $P_{\text{безоп}}(T_{\text{треб}})$.

Пример расчета по методике

Исходные данные, используемые для расчета, характеризуют структуру и конфигура-

цию ТКС ЕДЦУ ОАО «РЖД», состояние среды общего доступа, принципы, возможности, алгоритмы нарушителя [3–5, 12].

Так как математические модели, входящие в субмодуль 4, обладают свойством вложенности, поиск приращений $\Delta P_{\text{безоп}}(T_{\text{треб}})$ производится послойно.

Формула (1) используется на каждом слое модели конфликта СУИБ и СН с тем различием, что на уровне выхода модели используется максимальное значение обобщенного показателя вероятности пребывания ТКС ЕДЦУ ОАО «РЖД» в состоянии безопасности, а на уровне частных показателей – минимальные значения, так как они характеризуют возможности нарушителя, реализующего ИВ на ТКС ЕДЦУ.

Результатом расчетов по формуле (1) является семейство функций приращений обобщенного и частных показателей вероятности пребывания ТКС ЕДЦУ ОАО «РЖД» в состоянии безопасности $\Delta P_{i\text{безоп}}(t, x_i, i = \overline{1, N})$ (рис. 3–6).

Чтобы обеспечить требуемый уровень защищенности сети, необходимо не только сократить время восстановления ТКС, но и выполнить ОТМ, затрудняющие нарушителю реализацию ИВ на ТКС ЕДЦУ.

Наиболее значимыми параметрами процесса реализации ИВ на ТКС ЕДЦУ являются время вскрытия ТКУИ в ЕДЦУ $t_{\text{вскрТКУИ}}$ и время вскрытия ТКС ЕДЦУ техническими средствами компьютерной разведки $t_{\text{вскрТКС}}$ (рис. 3), длительность которых можно увеличить путем выполнения таких ОТМ, как:

- экранирование кабелей и проводов;
- исключение из состава ТКС ЕДЦУ незадействованной аппаратуры и неиспользуемых проводов;
- расположение элементов ТКС ЕДЦУ на максимально возможном удалении от границы контролируемой зоны (КЗ);
- ограничение доступа персонала только к той аппаратуре и документам, которые ему необходимы для выполнения должностных обязанностей;
- применение систем маскировки ТКС ЕДЦУ и ее параметров.

Наиболее значимыми параметрами процесса вскрытия ТКС ЕДЦУ техническими средствами компьютерной разведки нарушителя являются время идентификации сетевых узлов t_d и время сканирования портов и идентификации сетевых сервисов t_n (рис. 4), длительность которых можно увеличить путем выполнения таких ОТМ, как:

- использование утилиты IPtables;
- применение механизма «port knocking»;
- эмуляция виртуальных сетевых узлов, портов, сервисов.

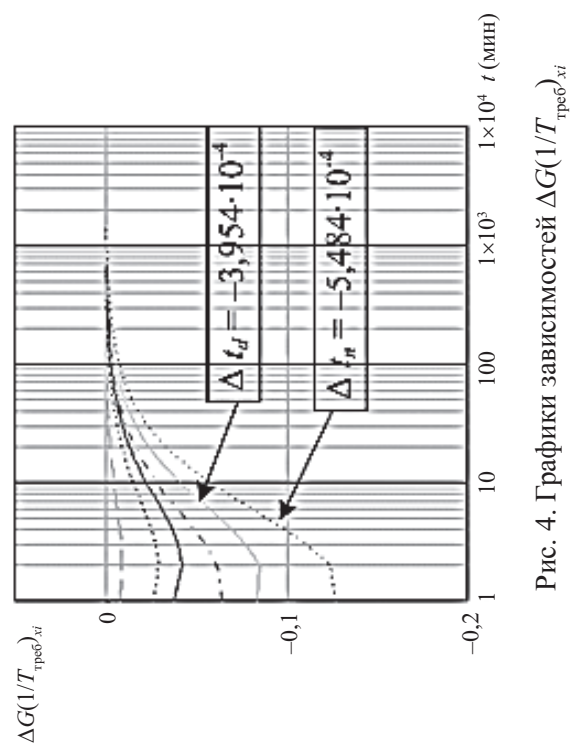
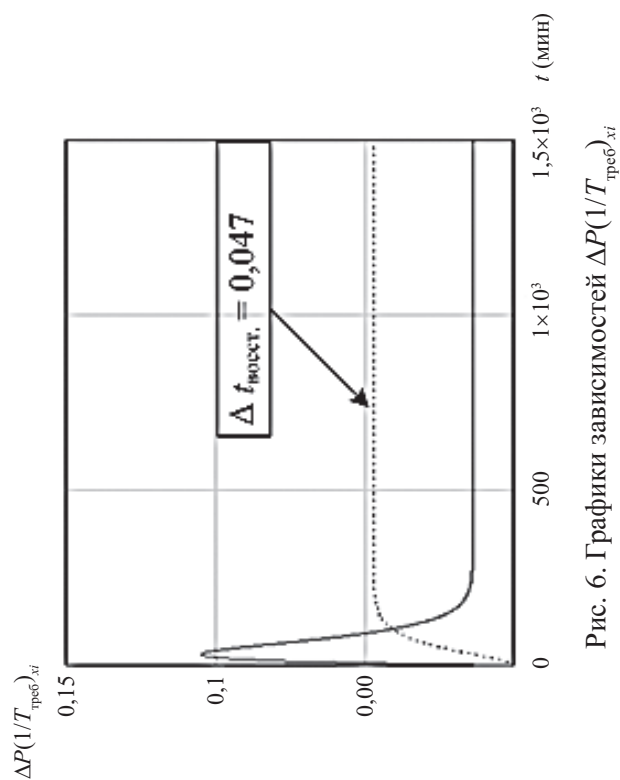
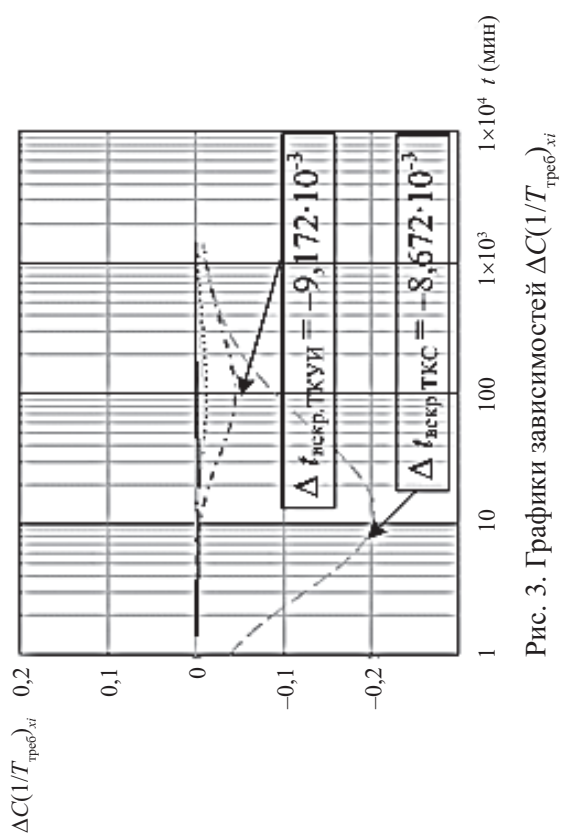
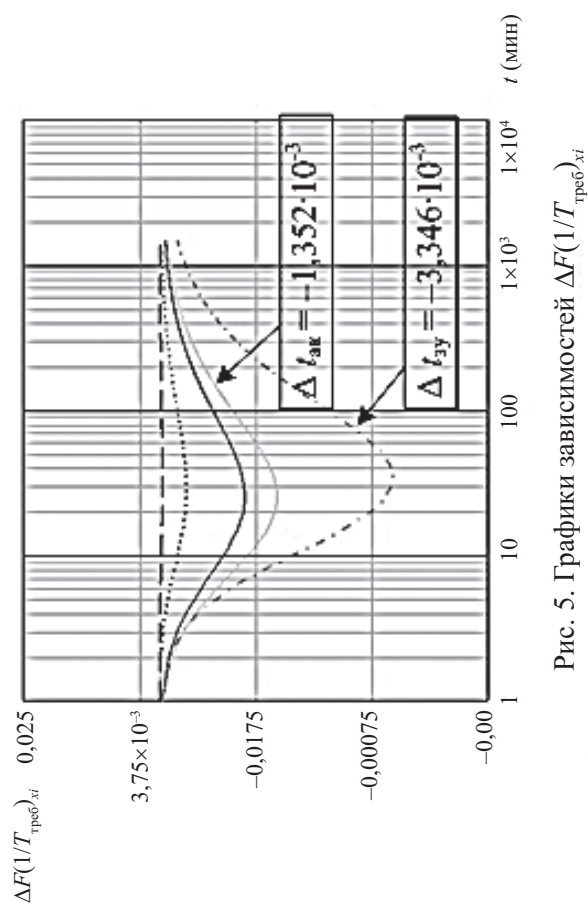
В свою очередь, наиболее значимыми параметрами процесса вскрытия нарушителем ТКУИ в ЕДЦУ являются время вскрытия нарушителем акустического ТКУИ $t_{\text{ак}}$, время внедрения ЗУ в ТКУИ $t_{\text{зу}}$ (рис. 5). Затруднить нарушителю выполнение данных действий помогут такие ОТМ, как:

- применение средств звукоглушения и звукоизоляции;
- применение метода противофазного подавления акустического сигнала;
- выявление технических средств, применение которых служебной необходимостью не обосновано;
- выявление незадействованных наземных, подземных воздушных, заложенных в скрытую канализацию кабелей, выходящих за пределы КЗ.

Анализ полученных результатов

Из графиков, представленных на рис. 6, можно сделать вывод, что основным направлением достижения пребывания ТКС ЕДЦУ в состоянии безопасности согласно требованиям нормативных документов, является сокращение времени восстановления состояния безопасности ТКС ЕДЦУ после успешной реализации нарушителем ИВ.

На рис. 7 представлены вероятностно-временные характеристики пребывания ТКС ЕДЦУ в состоянии безопасности при существующем порядке функционирования ТКС ЕДЦУ и в случае применения модуля СМПО

Рис. 4. Графики зависимостей $\Delta G(1/T_{\text{треб}, xi})$ Рис. 6. Графики зависимостей $\Delta P(1/T_{\text{треб}, xi})$ Рис. 3. Графики зависимостей $\Delta C(1/T_{\text{треб}, xi})$ Рис. 5. Графики зависимостей $\Delta F(1/T_{\text{треб}, xi})$

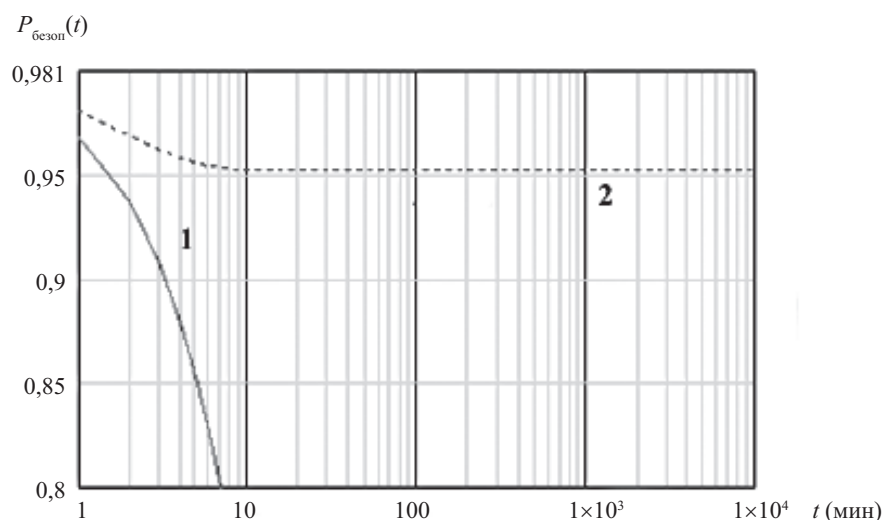


Рис. 7. Вероятностно-временные характеристики пребывания ТКС ЕДЦУ ОАО «РЖД» в состоянии безопасности

ПППР СУИБ ТКС ЕДЦУ ОАО «РЖД», обеспечивающего сокращение времени восстановления состояния безопасности сети. Представленные на графиках зависимости $P_{\text{безоп}}(t)$ позволяют оценить влияние времени восстановления состояния безопасности сети $t_{\text{восст}}$ и времени реализации ИВ $t_{\text{ИВ}}$ нарушителем на продолжительность пребывания ТКС в состоянии безопасности. До применения модуля СМПО и выполнения ОТМ, затрудняющих нарушителю реализацию ИВ, время восстановления состояния безопасности сети составляло $t_{\text{восст}} = 600$ мин, длительность реализации нарушителем ИВ – $t_{\text{ИВ}} = 31$ мин, при этом продолжительность пребывания сети в состоянии безопасности при $P_{\text{треб}} = 0,95$ составило 1,6 мин (кривая 1). После применения модуля СМПО и выполнения ОТМ время восстановления состояния безопасности сети составило $t_{\text{восст}} = 2$ мин, $t_{\text{ИВ}} = 40$ мин, при этом вероятность пребывания ТКС в состоянии безопасности – не ниже 0,96, что соответствует требованиям нормативных документов.

Заключение

Разработанный модуль СМПО ПППР СУИБ ТКС ЕДЦУ ОАО «РЖД», позволяет админи-

стратору ИБ оперативно принимать решение по управлению сетью, функционирующей в условиях реализации нарушителем ИВ.

Библиографический список

1. Болтенкова Е. О. Модуль построения макета телекоммуникационного объекта ОАО «РЖД» / Е. О. Болтенкова, В. О. Кириленко, А. А. Привалов // Труды 70-й науч.-технич. конф., посвященной Дню радио. – СПб., 2015. – С. 312–314.
2. Гапанович В. А. Системы автоматизации и информационные технологии управления перевозками на железных дорогах / В. А. Гапанович, А. А. Грачев. – М. : Маршрут, 2006. – 541 с.
3. ГОСТ РВ 51987-2002. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Типовые требования и показатели качества функционирования информационных систем. Общие положения. – М. : Госстандарт России, 2002. – 54 с.
4. Евглевская Н. В. Марковская модель конфликта автоматизированных систем обработки информации и управления с системой деструктивных воздействий нарушителя / Н. В. Евглевская, А. А. Привалов, Е. В. Скуднева // Известия ПГУПС. – 2015. – Вып. 1 (42). – С. 78–84.
5. Евглевская Н. В. Модель процесса подготовки злоумышленника к информационному воздей-

ствию на автоматизированные системы управления железнодорожным транспортом / Н.В. Евглевская, А.А. Привалов, Ал.А. Привалов // Бюллетень результатов научных исследований. – 2012. – № 5 (4). – С. 17–25.

6. Карабанов Ю.С. Модуль анализа потенциальных моделей угроз телекоммуникационных объектов ОАО «РЖД» / Ю.С. Карабанов, А.А. Привалов, П.Э. Чимирзаев // Труды 70-й науч.-технич. конф., посвященной Дню радио. – СПб., 2015. – С. 310–311.

7. Карабанов Ю.С. Модуль инициализации программного комплекса анализа угроз безопасности телекоммуникационного объекта ОАО «РЖД» / Ю.С. Карабанов, В.О. Кириленко, А.А. Привалов // Труды 70-й науч.-технич. конф., посвященной Дню радио. – СПб., 2015. – С. 311–312.

8. Королев А.И. Модуль математического моделирования компьютерных атак и добывания нарушителем данных по техническим каналам утечки информации / А.И. Королев, А.А. Привалов, П.Э. Чимирзаев // Труды 70-й науч.-технич. конф., посвященной Дню радио. – СПб., 2015. – С. 314–315.

9. Коцыняк М.А. Устойчивость информационно-телекоммуникационных сетей / М.А. Коцыняк, И.А. Кулешов, О.С. Лаута. – СПб. : Санкт-Петербург. гос. политехнич. ун-т, 2013. – 91 с.

10. Куделя В.Н. Методы математического моделирования систем и процессов связи / В.Н. Куделя, А.А. Привалов, О.В. Петриева, В.П. Чемиринко. – СПб. : Изд-во Политехнич. ун-та, 2009. – 368 с.

11. Привалов А.А. Метод топологического преобразования стохастических сетей и его использование для анализа систем связи ВМФ / А.А. Привалов. – СПб. : ВМА, 2000. – 166 с.

12. Привалов А.А. Модель процесса вскрытия каналов утечки информации на объектах телекоммуникаций / А.А. Привалов, Н.В. Евглевская, Ал.А. Привалов // Вопр. радиоэлектроники. – 2014. – №. 1. – С. 156–161.

13. Привалов А.А. Модель процесса вскрытия параметров сети передачи данных оператора IP-телефонной сети компьютерной разведкой организованного нарушителя / А.А. Привалов, Н.В. Евглевская, К.Н. Зубков // Изв. ПГУПС. – 2014. – Вып. 2 (39). – С. 106–111.

14. Привалов А.А. Разработка программного комплекса для оценки информационной безопасности торгового объекта / А.А. Привалов, Н.В. Евглевская, В.О. Кириленко, Е.О. Болтенкова // Проблемы экономики и управления в торговле и промышленности. – 2015. – № 3 (011). – С. 63–72.

15. Привалов А.А. Структура программного комплекса моделирования информационного конфликта системы безопасности телекоммуникационного объекта РЖД с подсистемой нарушителя / А.А. Привалов, Ю.С. Карабанов, А.И. Королев, С.И. Сидоров // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2015. – № 1. – С. 22–31.

References

1. Boltenkova Ye.O., Kirilenko V.O. & Privalov A.A. Modul postroyeniya maketa telekommunikatsionnogo obyektu ОАО RZhD [Modular Layout for Designing Telecommunications Object of the Russian Railways JSC]. *Trudy 70-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy Dnyu Radio (Proc. of 70th Sci. and Practical Conf. Dedicated to Radio Day)*. St. Petersburg, 2015. Pp. 312-314.
2. Gapanovich V.A. & Grachev A.A. Sistemy avtomatizatsii i informatsionnyye tekhnologii upravleniya perevozkami na zheleznnykh dorogakh [Automation Systems and Information Technologies for Railway Traffic Control]. Moscow, Marshrut, 2006. 541 p.
3. GOST RV 51987-2002. Informatsionnaya tekhnologiya. Kompleks standartov na avtomatizirovannye sistemy. Tipovye trebovaniya i pokazateli kachestva funkcionirovaniya informacionnykh sistem. Obshchie polozheniya [Information Technology. Set of Standards for Automated Systems. Typical Requirements and Indicators of the Quality of Information Systems. General Provisions]. Moscow, Gosstandart Rossii, 2002. 54 p.
4. Evglevskaya N. V., Privalov A.A. & Skudneva Ye. V. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2015, Is. 1 (42), pp. 78-84.
5. Evglevskaya N. V., Privalov A.A. & Privalov Al.A. *Byulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy – Bull. Res. Results*, 2012, no. 5 (4), pp. 17-25.
6. Karabanov Yu.S., Privalov A.A. & Chimirzayev P. E. Modul analiza potentsialnykh modeley ugroz telekommunikatsionnykh obyektov ОАО RZhD

[Potential Threat Analysis Module for Russian Railways JSC Telecommunications Objects]. *Trudy 70-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy Dnyu Radio (Proc. of 70th Sci. and Practical Conf. Dedicated to Radio Day)*. St. Petersburg, 2015. Pp. 310-311.

7. Karabanov Yu.S., Kirilenko V.O. & Privalov A.A. Modul initsializatsii programmnoy kompleksa analiza ugroz bezopasnosti telekommunikatsionnogo obyekta OAO RZHD [Module for Initiation of Program Complex for Analysis of Security Threats for Russian Railways JSC Telecommunications Object]. *Trudy 70-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy Dnyu Radio (Proc. of 70th Sci. and Practical Conf. Dedicated to Radio Day)*. St. Petersburg, 2015. Pp. 311-312.

8. Korolev A.I., Privalov A.A. & Chimirzayev P.E. Modul matematicheskogo modelirovaniya kompyuternykh atak i dobyvaniya narushitelem dannykh po tekhnicheskim kanalim utechki informatsii [Module for Mathematical Simulation of Computer Attacks and Attacker Obtaining Data through Technical Channels of Information Leak]. *Trudy 70-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy Dnyu Radio (Proc. of 70th Sci. and Practical Conf. Dedicated to Radio Day)*. St. Petersburg, 2015. Pp. 314-315.

9. Kotsynyak M.A., Kuleshov I.A. & Lautta O.S. Ustoychivost informatsionno-telekommunikatsionnykh setey [Stability of Information and

Telecommunications Networks]. St. Petersburg, Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy politekhnicheskii universitet, 2013. 91 p.

10. Kudelya V.N., Privalov A.A., Petriyeva O.V. & Chemirenko V.P. Metody matematicheskogo modelirovaniya sistem i protsessov svyazi [Methods of Mathematical Simulation of Communication Systems and Processes]. St. Petersburg, Izdatelstvo Politekhnicheskogo universiteta, 2009. 368 p.

11. Privalov A.A. Metod topologicheskogo preobrazovaniya stokhasticheskikh setey i yego ispolzovaniye dlya analiza sistem svyazi VMF [A Method of Topological Transformation of Stochastic Networks and Its Application for Analysis of Navy Communication Systems]. St. Petersburg, VMA, 2000. 166 p.

12. Privalov A.A., Evglevskaya N.V. & Privalov A.I. *Voprosy radioelektroniki – Radioelectronics Issues*, 2014, no. 1, pp. 156-161.

13. Privalov A.A., Evglevskaya N.V. & Zubkov K.N. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2014, Is. 2 (39), pp. 106-111.

14. Privalov A.A., Evglevskaya N.V., Kirilenko V.O. & Boltenkova Ye.O. *Problemy ekonomiki i upravleniya v trgovle i promyshlennosti – Prob. of Econ. and Management in Trade and Industry*, 2015, no. 3 (011), pp. 63-72.

15. Privalov A.A., Karabanov Yu.S., Korolev A.I. & Sidorov S.I. *Intellectualnyye tekhnologii na transporte – Intelligent Technologies in Transport*, 2015, no. 1, pp. 22-31.

*ЕВГЛЕВСКАЯ Наталья Валерьевна – электромеханик, n.evglevskaya@gmail.com (Центральный региональный центр связи); БЕКБАЕВ Гамзатдин Алеуатдинович – аспирант, gamzat-86@mail.ru; ПРИВАЛОВ Андрей Андреевич – доктор воен. наук, профессор, aprivalov@inbox.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); ШАХМАТОВ Дмитрий Николаевич – соискатель, d.shakhmatov@mail.ru (Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Будённого).

УДК 656.21

Ю. И. Ефименко, М. В. Четчуев, А. Г. Филиппов**ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ,
НЕЛИНЕЙНО СВЯЗАННЫХ С РАЗМЕРАМИ РАБОТЫ СТАНЦИЙ**

Дата поступления: 05.02.2016

Решение о публикации: 14.04.2016

Цель: Рассмотреть возможные методы расчета эксплуатационных показателей, нелинейно связанных с размерами работы станций. Определить наиболее простой метод и оценить достоверность результатов расчетов, полученных с его использованием. **Методы:** В статье изложены два приближенных метода учета колебаний объемов работы и пропускной способности при определении показателей работы станций. **Результаты:** По предлагаемым методам выполнены расчеты средних значений времени ожидания формирования и расформирования составов на сортировочной станции. Сравнение результатов расчетов показало, что расхождения в полученных значениях времени ожидания формирования и расформирования составов незначительны, поэтому для выполнения таких расчетов рекомендован более простой из сравниваемых в статье методов учета нестационарности транспортного процесса. **Практическая значимость:** Использование рекомендуемого в статье метода позволит существенно упростить расчеты эксплуатационных показателей, нелинейно связанных с размерами работы станций.

Эксплуатационные показатели, железнодорожная станция, неравномерность транспортного процесса, размеры движения, пропускная способность, время ожидания обслуживания.

Yuriy I. Yefimenko, D. Eng., professor, kjdstan@pgups.edu.ru; **Maksim V. Chetchuyev**, Cand. Eng., assistant professor, maxetion@mail.ru; ***Anton G. Filippov**, postgraduate student, tigropard10@mail.ru (Petersburg State Transport University) SPECIFIC FEATURES OF CALCULATION OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS NONLINEARLY CONNECTED TO STATION TRAFFIC VOLUMES

Objective: To consider possible methods for calculation of operational characteristics nonlinearly connected to station traffic volumes. To identify the simplest method and to evaluate the reliability of calculation results obtained through it. **Methods:** The paper describes two approximate methods for registering fluctuations in the traffic volume and train-handling capacity in determining stations' operational characteristics. **Results:** The proposed methods were used to calculate average values of waiting for train forming and splitting at a marshal yard. Comparison of calculation results indicated that the discrepancies between obtained values of train forming and splitting waiting time are insignificant, thus the simpler of the two methods for registering non-stationary character of transport process was recommended for such calculations. **Practical importance:** Application of the method recommended in the article will allow for significant simplification of calculations of operational characteristics nonlinearly connected to station traffic volumes.

Operational characteristics, railway station, irregularity of transport process, traffic volumes, train-handling capacity, service waiting time.

При обосновании рациональных этапов развития железнодорожных станций и узлов срок целесообразного перехода к очередному этапу устанавливается путем сопоставления потребных капиталовложений на усиление мощности устройств с экономией эксплуатационных расходов, достигаемой за счет этого усиления мощности, а также совершенствования схемы и технологии работы станций. Основная экономия эксплуатационных расходов достигается за счет сокращения простоев подвижного состава в ожидании обслуживания и задержек поездов из-за неприема станциями. Трудности правильной оценки этих расходов, нелинейно зависящих от размеров работы, связаны с неравномерностью транспортных процессов в течение года.

Общие положения

Средние значения простоев в ожидании обслуживания зависят от загрузки обслуживающих устройств ρ [1–5, 10–12, 15, 16], которая представляет собой отношение плотности входящего потока λ к интенсивности обслуживания μ : $\rho = \lambda/\mu$. Величины λ и μ можно определить через суточные значения размеров движения N и наличной пропускной (перерабатывающей) способности N_H :

$$\lambda = \frac{N}{24}; \mu = \frac{N_H}{24}.$$

Следовательно, загрузка системы может быть представлена в виде

$$\rho = \frac{N}{N_H}. \quad (1)$$

Использование значения ρ , полученного по формуле (1) для подсчета годовых расходов, затруднено из-за непостоянства величин N и N_H . В настоящее время общепризнано, что колебания суточных размеров грузового движения N подчиняются нормальному закону распределения [7, 13, 14]. Согласно исследованиям БелИИЖТа [8, 9] наличная пропускная способность станционных устройств N_H также подвержена случайным колебаниям. Это естественно приводит к колебаниям коэффициента загрузки обслуживающих устройств ρ .

Таким образом, в реальности станционные устройства работают в условиях переменной загрузки, меняющейся в отдельные сутки в некоторых пределах от $\rho_{\min}$ до $\rho_{\max}$ (рис. 1), где

$$\rho_{\min} = \frac{N^{\min}}{N_i^{\max}}; \rho_{\max} = \frac{N^{\max}}{N_i^{\min}}.$$

При этом не исключается, что вследствие колебаний размеров движения и наличной пропускной способности загрузка обслужи-

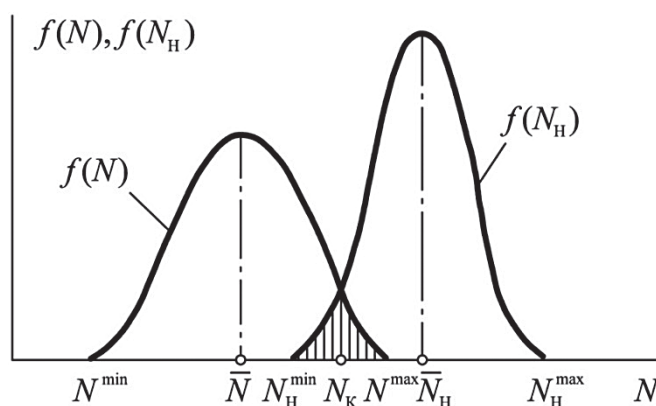


Рис. 1. Кривые плотности распределения суточных размеров работы и наличной пропускной способности

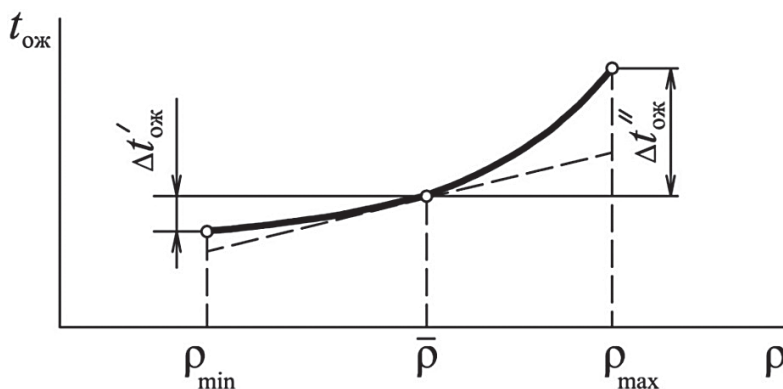


Рис. 2. Характер зависимости времени ожидания обслуживания от загрузки системы

вающего устройства или канала в отдельные сутки может превышать единицу, если размеры движения окажутся больше пропускной способности. В этом случае произойдет переполнение системы, вероятность чего будет характеризоваться площадью области, заштрихованной на рис. 1. Такие ситуации возникают в зимний период перед сортировочными станциями, когда из-за сильных морозов или снегопадов резко возрастает сопротивление скатыванию отцепов на горках и уменьшается интенсивность роспуска составов, в то время как размеры поступления поездов в переработку остаются высокими. Приходится принимать специальные регулировочные меры, наиболее распространенной из которых является временное оставление части составов на предузловых станциях. Аналогичные трудности периодически возникают при неблагоприятных погодных условиях и перед портовыми станциями.

Для правильной оценки потерь, связанных с простоями подвижного состава в ожидании обслуживания, а также с задержками поездов на участках из-за неприема станциями, необходимо знать среднее время этих простоев, приходящихся на одну транспортную единицу в течение года. Если бы зависимость времени ожидания $t_{ож}$ и времени задержек $t_{зд}$ от загрузки системы ρ была линейной, то средние значения этого времени, подсчитанные для среднего за год значения $\bar{\rho} = \bar{N}/\bar{N}_n$, можно было бы принять в качестве средних для всех транспортных единиц. Однако функции $t_{ож} = f(\rho)$ и

$t_{зд} = f(\rho)$ являются нелинейными и выпуклыми, поэтому среднее время ожидания и задержки одной транспортной единицы в течение года будет всегда больше величин, рассчитанных для средних значений $\bar{\rho}$ (рис. 2).

Задачу учета случайных колебаний загрузки транспортных систем при определении времени ожидания обслуживания и задержек поездов по неприему в общем виде точно решить невозможно, поскольку эмпирические формулы, полученные при статистической обработке результатов имитационного моделирования работы станций, справедливы на ограниченном отрезке значений ρ . Поэтому ниже рассмотрим два приближенных метода учета колебаний объемов работы и пропускной способности при определении показателей работы станций.

Первый из них (метод 1) основан на замене нестационарного потока кусочно-стационарным, а второй (метод 2) – на использовании числовых характеристик случайной величины ρ , представляющих собой отношение двух случайных величин N и N_n с известными параметрами распределения.

Первый метод учёта нестационарности транспортного потока

Если выражение для определения среднего времени ожидания обслуживания представить в общем виде

$$t_{ож} = \varphi(\rho) = \varphi(N, N_n),$$

то при использовании первого метода учета нестационарности транспортного потока кривые плотности вероятности $f(N)$ и $f(N_n)$ (см. рис. 1) необходимо заменить гистограммами с величиной разрядов не менее среднеквадратических отклонений σ_N и σ_{N_n} и рассмотреть вероятности сочетания каждого разряда одной гистограммы со всеми разрядами другой гистограммы.

Тогда среднее время ожидания обслуживания, приходящееся на одну транспортную единицу в течение года, можно получить из выражения

$$t_{ож}^{cp} = \sum_{i=1}^k p_i^{(N)} \sum_{j=1}^s \varphi(\overline{N_i}, \overline{N_{nj}}) p_j^{(N_n)}, \quad (2)$$

где k, s – число разрядов, на которое разделены значения, соответственно, N и N_n ; $p_i^{(N)}$, $p_j^{(N_n)}$ – вероятности попадания значений N и N_n , соответственно, в i -й и j -й разряды; $\overline{N_i}$, $\overline{N_{nj}}$ – средние значения N и N_n в соответствующих разрядах.

Аналогичным образом можно определить средние значения числа задержанных поездов $N_{зд}^{cp}$ и времени их простоя на предузловых станциях $t_{зд}^{cp}$, для чего необходимо только заменить вид функции $\varphi(N, N_n)$.

Учитывая большую трудоемкость расчетов по формуле (2), их целесообразно выполнять на ЭВМ.

Второй метод учёта нестационарности транспортного потока

Реализация второго метода учета колебаний объемов работы и пропускной способности рассмотрим на примере времени ожидания расформирования $t_{ож}^{pф}$ и формирования $t_{ож}^{\Phi}$ составов на сортировочных станциях.

Среднее время ожидания расформирования составов на сортировочных станциях по рекомендованной для проектных целей методике [6] определяется по формуле

$$t_{ож}^{pф} = 14,4 \cdot (av_{вх}^2 + bv_{вх}),$$

где a и b – эмпирические коэффициенты, зависящие от коэффициента загрузки горки ρ_r :

$$a = 43,5069\rho_r^2 - 20,2034\rho_r - 8,3783; \quad (3)$$

$$b = 7,3172\rho_r^2 - 38,2992\rho_r + 24,288; \quad (4)$$

$v_{вх}$ – коэффициент вариации входящего потока перерабатываемых поездов.

Среднее время ожидания формирования составов в сортировочном парке при загрузке маневровых локомотивов, работающих на вытяжных путях, при $\rho_b \leq 0,55$ рекомендуется принимать в размере 1,5 мин, а при $\rho_b > 0,55$ – определять из выражения

$$t_{ож}^{\Phi} = 146,4 - 526,2\rho_b + 478,8\rho_b^2. \quad (5)$$

Чтобы учесть влияние случайных колебаний суточных размеров работы и перерабатывающей способности обслуживающих устройств на среднесуточные за год простои составов в ожидании обслуживания, предварительно необходимо решить задачу об определении числовых характеристик распределения отношения двух случайных величин.

Предположим, что случайные величины X и Y независимы, имеют конечные моменты и все возможные значения X и Y сосредоточены на положительной полуоси. Необходимо получить формулы для вычисления моментов первых двух порядков величины $Z = \frac{X}{Y}$ по заданным моментам величин X и Y :

$$m_X = MX > 0; \quad \sigma_X^2 = M(X - MX)^2 = DX;$$

$$m_Y = MY > 0; \quad \sigma_Y^2 = M(Y - MY)^2 = DY,$$

где m_X, m_Y – первые моменты случайных величин X и Y , равные их математическим ожиданиям MX и MY ; σ_X^2, σ_Y^2 – среднеквадратические отклонения величин X и Y , соответственно.

Как увидим из дальнейшего, точность полученных приближенных формул окажется

тем выше, чем меньше будет коэффициент вариации величины Y

$$v_Y = \frac{\sigma_Y}{m_Y}.$$

Рассмотрим величину

$$Y_0 = \frac{Y - m_Y}{\sigma_Y},$$

являющуюся результатом центрирования и нормирования случайной величины Y , так, что

$$m_{Y_0} = MY_0 = 0; \sigma_{Y_0}^2 = DY_0 = 1.$$

Тогда величину Z можно представить в виде

$$Z = \frac{X}{m_Y(1 + v_Y Y_0)},$$

или, применяя разложение в ряд,

$$Z = \frac{X}{m_Y}(1 - v_Y Y_0 + v_Y^2 Y_0^2 - \dots). \quad (6)$$

Правомерность такого разложения гарантируется, если коэффициент вариации v_Y достаточно мал, так что с вероятностью, близкой к единице, справедливо неравенство

$$v[Y_0] < 1.$$

Переходя к математическим ожиданиям в обеих частях равенства (6), получаем приближенную формулу

$$MZ \cong \frac{m_X}{m_Y}(1 + v_Y^2). \quad (7)$$

Погрешность вычисления MZ по формуле (7) определяется величиной отброшенного в скобках выражения (6) остатка, т.е. в общем случае имеет порядок v_Y^2 , а в случае симметричных распределений, к которым относится нормальное, – v_Y^2 .

Для вычисления второго момента величины Z целесообразно воспользоваться разложением

$$Z^2 = \frac{X^2}{m_Y^2}(1 - 2v_Y Y_0 + 3v_Y^2 Y_0^2 - \dots).$$

В результате получим следующую приближенную формулу:

$$MZ^2 = \frac{m_X^2 + \sigma_X^2}{m_Y^2}(1 + 3v_Y^2), \quad (8)$$

погрешность вычисления по которой имеет тот же порядок, что и в формуле (16).

Из (8) и (7) получим формулу для дисперсии величины Z :

$$\begin{aligned} DZ &= MZ^2 - (MZ)^2 \cong \\ &\cong \frac{(v_Y^2 m_X^2 + 1 + 3v_Y^2)\sigma_X^2}{m_Y^2}. \end{aligned}$$

Зная дисперсию, легко определить среднее-квадратическое отклонение:

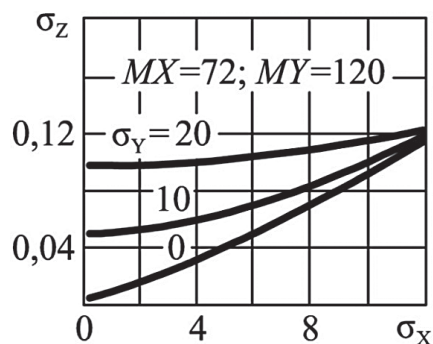
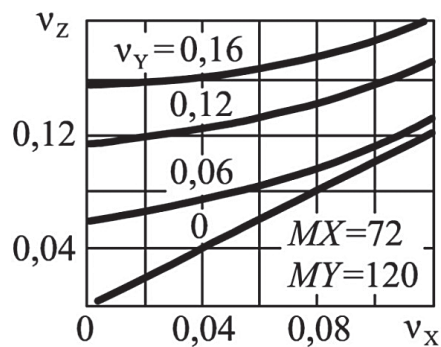
$$\sigma_Z = \sqrt{DZ}; v_Z = \sigma_Z / MZ.$$

Полученные формулы позволяют установить зависимость числовых характеристик σ_Z и v_Z от исходных значений MX , MY , σ_X и σ_Y (рис. 3, 4) для любых рассматриваемых распределений случайных величин X и Y . Кроме того, представляется возможным, используя выражения (7) и (8), уточнить расчетные формулы для определения среднего времени ожидания расформирования и формирования составов на сортировочных станциях. Для этого необходимо вместо значений ρ и ρ^2 подставить в расчетные формулы (3)–(5) их математические ожидания, определяемые из выражений

$$M\rho = \frac{\bar{N}}{N_H}(1 + v_{N_H}^2);$$

$$M\rho^2 = \frac{\bar{N}^2 + \sigma_N^2}{N_H^2}(1 + 3v_{N_H}^2),$$

где v_{N_H} – коэффициент вариации наличной перерабатывающей способности.

Рис. 3. Зависимость σ_z от σ_x и σ_y Рис. 4. Зависимость v_z от v_x и v_y

Заключение

Сравнение части результатов расчетов средних значений времени ожидания расформирования и формирования составов по

первому и второму рассмотренным методам учета колебаний загрузки системы представлено в таблице, из которой видно, что полученные по обоим методам результаты весьма близки. Расхождение составляет не более 2%.

Сравнение методов учета колебаний загрузки станций

Исходные данные для расчетов				Среднее время ожидания, мин			
				расформирования		формирования	
$\bar{N}$	$\bar{N}_H$	v_N	v_{N_H}	Метод 1	Метод 2	Метод 1	Метод 2
72	90	0	0	11,22	11,22	31,87	31,87
			0,02	11,41	11,40	32,07	32,07
			0,04	11,97	11,91	32,69	32,67
			0,06	12,92	12,77	33,73	33,67
		0,03	0	11,52	11,50	32,15	32,15
			0,02	11,71	11,68	32,35	32,35
	80	0,06	0	12,42	12,34	32,99	32,98
			0,02	12,60	12,52	33,19	33,18
			0,04	13,17	13,04	33,81	33,78
			0,06	14,13	13,90	34,86	34,78
		0	0	30,98	30,98	60,65	60,65
			0,02	31,24	31,22	60,93	60,92
			0,04	32,04	31,96	61,78	61,75
			0,06	33,40	33,19	63,22	63,13
	80	0,06	0	32,49	32,39	62,06	62,04
			0,02	32,75	32,64	62,34	62,32
			0,04	33,56	33,38	63,19	63,15
			0,06	34,93	34,62	64,64	64,54

Это свидетельствует о целесообразности применения в практических расчетах более простого второго метода учета нестационарности транспортного процесса, основанного на представлении суточной загрузки обслуживающих устройств как отношения случайных значений объема работы и наличной пропускной или перерабатывающей способности.

Что касается увеличения времени ожидания операции при учете колебаний размеров работы и наличной пропускной способности, то в зависимости от соотношения коэффициентов вариации v_N и v_{N_n} это увеличение может достигать и более 40 % по сравнению с расчетами по средним значениям. Это свидетельствует о необходимости такого учета, что существенно повысит обоснованность проектных решений по развитию станций и узлов.

Библиографический список

1. Акулиничев В. М. Научные основы решения задачи оптимизации перевозочного процесса / В. М. Акулиничев // Оптимальная эксплуатация железных дорог : Сб. трудов МИИТа. – М., 1973. – Вып. 420. – С. 6–15.
2. Акулиничев В. М. Организация вагонопотоков / В. М. Акулиничев. – М. : Транспорт, 1982. – 224 с.
3. Акулиничев В. М. Основные направления в размещении и развитии сортировочных станций на сети железных дорог / В. М. Акулиничев // Вопросы эксплуатации железных дорог : Сб. трудов МИИТа. – М., 1970. – Вып. 333. – С. 3–65.
4. Архангельский Е. В. Уровни загрузки и потребная мощность устройств сортировочной станции : Труды ВНИИЖТа / Е. В. Архангельский. – М., 1975. – Вып. 544. – 128 с.
5. Буянова В. К. Система организации вагонопотоков / В. К. Буянова, А. И. Сметанин, Е. В. Архангельский. – М. : Транспорт, 1988. – 223 с.
6. Методические рекомендации по выбору оптимального варианта организации строительных работ при развитии станций. – М. : ВНИИ трансп. Строительства, 1984. – 94 с.

7. Негрей В. Я. Научные основы расчетов и проектирования железнодорожных станций и узлов : дисс. ... д-ра техн. наук / В. Я. Негрей. – Гомель, 1987. – 402 с.

8. Правдин Н. В. Методика расчета наличной пропускной способности одноканальных транспортных систем (на основе вероятностного подхода) / Н. В. Правдин, В. Я. Негрей, Н. П. Негрей // Проблемы развития железнодорожных станций и узлов : Межвуз. сб. науч. статей. – Гомель : БелИИЖТ, 1985. – С. 3–27.

9. Правдин Н. В. Прогнозирование грузовых потоков / Н. В. Правдин, М. Л. Дыканюк, В. Я. Негрей. – М. : Транспорт, 1988. – 347 с.

10. Правдин Н. В. Проектирование железнодорожных станций и узлов / Н. В. Правдин, Т. С. Банек, В. Я. Негрей. – Ч. 1. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск : Выш. шк., 1984. – 288 с.

11. Сотников И. Б. Взаимодействие станций и участков железных дорог (Исследование операций на станциях) / И. Б. Сотников. – М. : Транспорт, 1976. – 272 с.

12. Сотников И. Б. Теоретические основы взаимодействия в работе приемо-отправочных парков станций и прилегающих участков: учеб. пособие / И. Б. Сотников. – М. : МИИТ, 1967. – 62 с.

13. Угрюмов А. К. Неравномерность движения поездов / А. К. Угрюмов. – М. : Транспорт, 1968. – 112 с.

14. Федотов Н. И. Колебания потоков в транспортных системах : Тр. НИИЖТа / Н. И. Федотов. – Новосибирск, 1972. – Вып. 139. – 58 с.

15. Шабалин Н. Н. Оптимизация процесса переработки вагонов на станциях / Н. Н. Шабалин. – М. : Транспорт, 1973. – 184 с.

16. Шабалин Н. Н. Применение теории массового обслуживания для расчета устройств станций / Н. Н. Шабалин. – М. : МИИТ, 1968. – 89 с.

References

1. Akulinichev V. M. Nauchnye osnovy resheniya zadachi optimizacii perevozochnogo processa [Scientific Basis for Solving the Problem of Optimizing the Transportation Process]. *Optimalnaya ekspluatatsiya zheleznikh dorog: Sbornik trudov MIITa (Optimum*

Operation of Railways: MIIT Proc.). Moscow, 1973, Is. 420. Pp. 6-15.

2. Akulinichev V.M. Organizatsiya vagonopotokov [Railcar Traffic Organisation]. Moscow, Transport, 1982. 224 p.

3. Akulinichev V.M. Osnovnye napravleniya v razmeshchenii i razvitii sortirovochnykh stantsiy na seti zheleznykh dorog [The main directions in the distribution and development of marshalling yards on the rail network]. *Optimalnaya ekspluatatsiya zheleznykh dorog: Sbornik trudov MIITa (Optimum Operation of Railways: MIIT Proc.)*. Moscow, 1970, Is. 333. Pp. 3-65.

4. Arkhangelskiy Ye. V. Urovni zagruzki i potrebnaya moshchnost' ustroystv sortirovochnoy stantsii [Levels and Download the Required Power Yard Equipment]. *Trudy VNIIZhTa – VNIIZhT Proc.* Moscow, 1975, Is. 544. 128 p.

5. Buyanova V. K., Smetanin A. I. & Arkhangelskiy Ye. V. Sistema organizatsii vagonopotokov [Railcar Traffic Organisation System]. Moscow, Transport, 1988. 223 p.

6. Metodicheskiye rekomendatsii po vyboru optimalnogo varianta organizatsii stroitelnykh rabot pri razvitii stantsiy [Recommended Practices for Choice of Optimal Variant of Organisation of Construction Works in Station Development]. Moscow, VNII transportnogo stroitelstva, 1984. 94 p.

7. Negrey V.Ya. Nauchnyye osnovy raschetov i proyektirovaniya zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov [Scientific Foundations for Calculations and Designs of Railway Stations and Hubs]: A Dissertation for Doctorate in Engineering. Gomel, 1987. 402 p.

8. Pravdin N. V., Negrey V.Ya. & Negrey N. P. Metodika rascheta nalichnoy propusknok sposobnosti odnokanal'nykh transportnykh sistem (na osnove veroyatnostnogo podhoda) [Methods of Calculating Cash Bandwidth Single-Channel Transport Systems (Based

on Probabilistic Approach)]. *Problemy razvitiya zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov: Mezhevuzovskiy sbornik nauchnykh statey (Prob. in Development of Railway Stations and Hubs: Inter-University Coll. of Papers)*. Gomel, BelIIZht, 1985. Pp. 3-27.

9. Pravdin N.V., Dykanyuk M.L. & Negrey V.Ya. Prognozirovaniye gruzovykh potokov [Forecasting Freight Flows]. Moscow, Transport, 1988. 347 p.

10. Pravdin N. V., Banek T. S. & Negrey V.Ya. Proyektirovaniye zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov [Designing Railway Stations and Hubs]. Pt. 1. Minsk, Vysheyschaya shkola, 1984. 288 p.

11. Sotnikov I. B. Vzaimodeystviye stantsiy i uchastkov zheleznykh dorog (Issledovaniye operatsiy na stantsiyakh) [Interaction Between Stations and Railway Sections (Study of Station Operation)]. Moscow, Transport, 1976. 272 p.

12. Sotnikov I. B. Teoreticheskiye osnovy vzaimodeystviya v rabote priyemo-otpravochnykh parkov stantsiy i prilgayushchikh uchastkov: uchebnoye posobiye [Theoretical Foundations for Interaction in the Operation of Station Receiving-departure Yards and Adjacent Railway Sections: Course Guide]. Moscow, MIIT, 1967. 62 p.

13. Ugryumov A. K. Neravnomernost dvizheniya poyezdov [Irregularity of Train Traffic]. Moscow, Transport, 1968. 112 p.

14. Fedotov N. I. Kolebaniya potokov v transportnykh sistemakh [Fluctuations of Flows in Transport Systems]. Novosibirsk, NiiZhT, 1972. 58 p.

15. Shabalin N. N. Optimizatsiya protsessa pere-rabotki vagonov na stantsiyakh [Optimisation of Yard Operation Process at Stations]. Moscow, Transport, 1973. 184 p.

16. Shabalin N. N. Primeneniye teorii massovogo obsluzhivaniya dlya rascheta ustroystv stantsiy [Application of Mass Service Theory to Calculation of Station Design]. Moscow, MIIT, 1968. 89 p.

ЕФИМЕНКО Юрий Иванович – доктор техн. наук, профессор, kjdstan@pgups.edu.ru; ЧЕТЧУЕВ Максим Владимирович – канд. техн. наук, доцент, maxetion@mail.ru; *ФИЛИППОВ Антон Геннадьевич – аспирант, tigropard10@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 656.34

А. М. Костроминов, С. А. Рахманин, Б. О. Смирнов, О. Н. Тюляндин**КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ РИДЕР-АНТЕННОГО ТРАКТА АППАРАТУРЫ СБПП
В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОДЕПО МЕТРОПОЛИТЕНА**

Дата поступления: 21.04.2016

Решение о публикации: 10.05.2016

Цель: Разработать стационарный метод контроля состояния ридер-антенного тракта аппаратуры системы бесконтактной привязки к координатам пути (СБПП). **Методы:** При анализе и решении исходной задачи использован аксиоматико-дедуктивный метод. Для верификации некоторых положений предложенного метода применен корреляционный анализ. Аппроксимация экспериментальных кривых выполнена по методу наименьших квадратов. **Результаты:** Сформулированы основные положения по рассматриваемому тракту. Экспериментально получены функциональные зависимости, характеризующие процесс увеличения «паразитного» затухания. Разработан возможный метод контроля состояния ридер-антенного тракта. Даны рекомендации по его применению. **Практическая значимость:** Причиной роста интереса к данной теме послужили несколько случаев увеличения затухания сигналов в ридер-антенном тракте. Предложенный метод позволяет увеличить надежность функционирования СБПП, так как минимизирует вероятность выхода на линию поездов с неработоспособным RFID-оборудованием.

RFID-технологии, ридер-антенный тракт, контроль состояния, увеличение затухания, система бесконтактной привязки к пути, СБПП.

Alexander M. Kostrominov, D. Eng., professor, triak@grozon.sbp.ru; **Sergey A. Rakhmanin**, postgraduate student, beethovin@mail.ru; **Bogdan O. Smirnov**, student, smirnov@vklay.ru; ***Oleg N. Tyulyandin**, postgraduate student, tyulyandin@vklay.ru (Petersburg State Transport University)
CONTROL OF READER-ANTENNA LINK OF SNCBT EQUIPMENT IN THE CONDITIONS OF METRO DEPOT

Objective: To develop a stationary method for control of reader-antenna link for the system of non-contact binding to the underground track (SNCBT). **Methods:** The original problem was solved by axiomatic deductive method. Correlation analysis was applied for verification of certain provisions. The method of least squares was used for the approximation of experimental curve data. **Results:** The basic positions for the link under consideration were formulated. Experimentally derived functional relationships for increasing the «parasitic» attenuation were obtained. A possible reader-antenna link control method was developed. Recommendations on its application were given. **Practical importance:** Several cases of increasing attenuation of signals in the reader-antenna link attracted attention to this subject. The proposed method makes it possible to increase the reliability of SNCBT as it minimises the likelihood of trains with inoperable RFID-equipment entering line.

RFID-technology, reader-antenna link, control of conditions, increasing the attenuation, SNCBT, the system of non-contact binding to the underground track.

В процессе эксплуатации системы бесконтактной привязки к пути (СБПП), базовой частью которой являются RFID-средства [2, 11,

12] (радиометки, устанавливаемые на стенах тоннеля, и ридеры с антеннами, располагаемые на борту головных вагонов пассажирских

поездов) [4–6], имели место случаи увеличения затухания сигналов в цепи ридер – антенна. Вероятные причины затухания – повышение переходного сопротивления в разъемах кабельного соединения ридера с антенной, а также возможное затекание влаги в разъемные соединения при мойке вагонов. Отсюда следует задача – разработать метод контроля состояния тракта ридер – антенна, позволяющий убедиться в его работоспособности в процессе плановых технических осмотров перед выездом поездов из электродепо на линию.

Способ решения задачи

Рассмотрим возможный метод контроля состояния ридер-антенного тракта аппаратуры СБПП, но сначала введем несколько уточнений для облегчения чтения и понимания последующего текста.

Во-первых, условимся под расстоянием между радиометкой и антенной ридера понимать длину пространственного отрезка, соединяющего центры излучающей плоскости антенны и радиометки, причем последние располагаются друг напротив друга.

Во-вторых, введем условное понятие предельного расстояния между радиометкой и антенной ридера. Логично предположить: из-за того, что в выходной цепи ридера мощность конечна, существует некоторое предельное расстояние между радиометкой и антенной, при котором можно установить сеанс обмена информацией в RFID-системе (подробнее с процедурой установления сеанса связи можно ознакомиться в [14]).

И в-третьих, определим понятие ширины зоны радиовидимости. В общем смысле под шириной зоны радиовидимости следует понимать максимально достижимую длину пространственного отрезка, параллельного излучающей плоскости антенны и совпадающего с осью движения метки, на котором можно установить сеанс обмена информацией в RFID-системе. А в узком смысле (справедли-

во при эксплуатации поездов) – метрическое продвижение поезда от момента начала установления сеанса связи с меткой до момента обрыва обмена информацией.

С учетом сказанного перейдем к обоснованию и описанию предлагаемого нами метода контроля.

Сперва перечислим необходимые аксиоматические сведения об исследуемом радиотракте:

- в ридерах поездной аппаратуры СБПП есть возможность изменять уровень мощности P_{cir} в его выходной цепи;
- уровень излучаемой антенной мощности P_{rad} равен разнице между уровнем мощности в выходной цепи ридера и величиной «паразитного» затухания a_0 в ридер-антенном тракте:

$$P_{rad} = P_{cir} - a_0, \text{ дБм};$$

- «паразитное» затухание в эталонном радиотракте принимается равным нулю;
- имеет место функциональная зависимость предельного расстояния между радиометкой и антенной d_m от уровня излучаемой мощности;
- существует функциональная зависимость ширины зоны радиовидимости l на некотором расстоянии между радиометкой и антенной от уровня излучаемой мощности.

Теперь выберем параметр, подходящий для контроля состояния радиотракта. На первый взгляд может показаться, что таковым является значение «паразитного» затухания; но по нему сложно нормировать тракт ридер – антенна, так как отклонения в работе системы остаются скрытыми.

С нашей точки зрения, в качестве контрольного параметра рациональнее использовать ширину зоны радиовидимости на расстоянии между радиометкой и антенной, как в тоннеле. Причина такого выбора кроется в прямой зависимости числа сеансов связи между ридером и меткой от ширины зоны радиовидимости при эксплуатации системы. Нетрудно заметить, что число сеансов связи определяет надежность функционирования RFID-системы.

Наконец, сформулируем двухэтапный метод контроля состояния тракта, являющийся дедуктивным следствием озвученных аксиом (подробнее о дедукции в [8]).

На первом этапе проверки необходимо оценить значение «паразитного» затухания. Для этого следует:

- поместить метку на некотором контрольном расстоянии от антенны d_c (выбирается в зависимости от внешних условий: малое расстояние между смежными путями в электродепо, препятствие в виде стены и т. д.);
- подобрать уровень мощности p_c в выходной цепи ридера (например последовательным перебором), при которой контрольное расстояние совпадет с предельным;
- после успешного подбора вычислить значение «паразитного» затухания

$$a_0 = p_c - p_{rad}(d_c), \text{ дБ}, \quad (1)$$

где $p_{rad}(d_c)$ – уровень излучаемой мощности эталонным оборудованием, соответствующий предельному расстоянию d_c .

На втором этапе – оценить эксплуатационную ширину зоны радиовидимости. Для этого сначала надо вычислить фактический уровень излучаемой мощности (как разность уровня мощности в выходной цепи ридера и значения полученного «паразитного» затухания), а затем через найденное значение по известной функциональной зависимости оценить искомый параметр.

Очевидно, что для реализации предложенного метода контроля необходимо исследовать функциональные зависимости между различными параметрами, характеризующими ридер-антенный тракт, так как априорно они неизвестны.

Экспериментальные исследования

Программа и методика исследований

Согласно предложенному методу контроля, требуется экспериментальное изучение следующих функциональных зависимостей:

- зависимости предельного расстояния между меткой и антенной от уровня излучаемой мощности;
- зависимости эксплуатационной ширины зоны радиовидимости от уровня излучаемой мощности.

Для исследований на кафедре «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I был установлен испытательный стенд, включающий в себя эталонное каналобразующее RFID-оборудование аппаратуры СБПП (ридер, антенну, разъемы, высокочастотный кабель) и ноутбук со специально разработанным программным обеспечением.

Отметим, что на стенде нет возможности физически вносить «паразитное» затухание, поэтому при исследовании зависимости эксплуатационной ширины зоны радиовидимости от уровня излучаемой мощности последняя изменялась с уровнем мощности в выходной цепи ридера. Справедливость этого допущения мы подтвердили экспериментально.

В представленных исследованиях принималась во внимание случайная природа чувствительности радиометок. Дисперсия параметров эталонного каналобразующего оборудования не рассматривалась. Используемый объем выборки составлял $n = 20$ радиометок.

Результаты исследований

Начнем с зависимости предельного расстояния между антенной и радиометкой от уровня излучаемой мощности. При ее исследовании использовали стендовое оборудование (напомним, что в таком случае «паразитное» затухание отсутствует и уровень излучаемой мощности равен уровню мощности в выходной цепи ридера).

Для каждого p , принадлежащего набору уровней излучаемой мощности каналобразующей аппаратурой $p_{rad} = \{5, 10, 15\}$ дБм, было статистически исследовано предельное расстояние между антенной и радиометкой. Большие значения уровня мощности не рас-

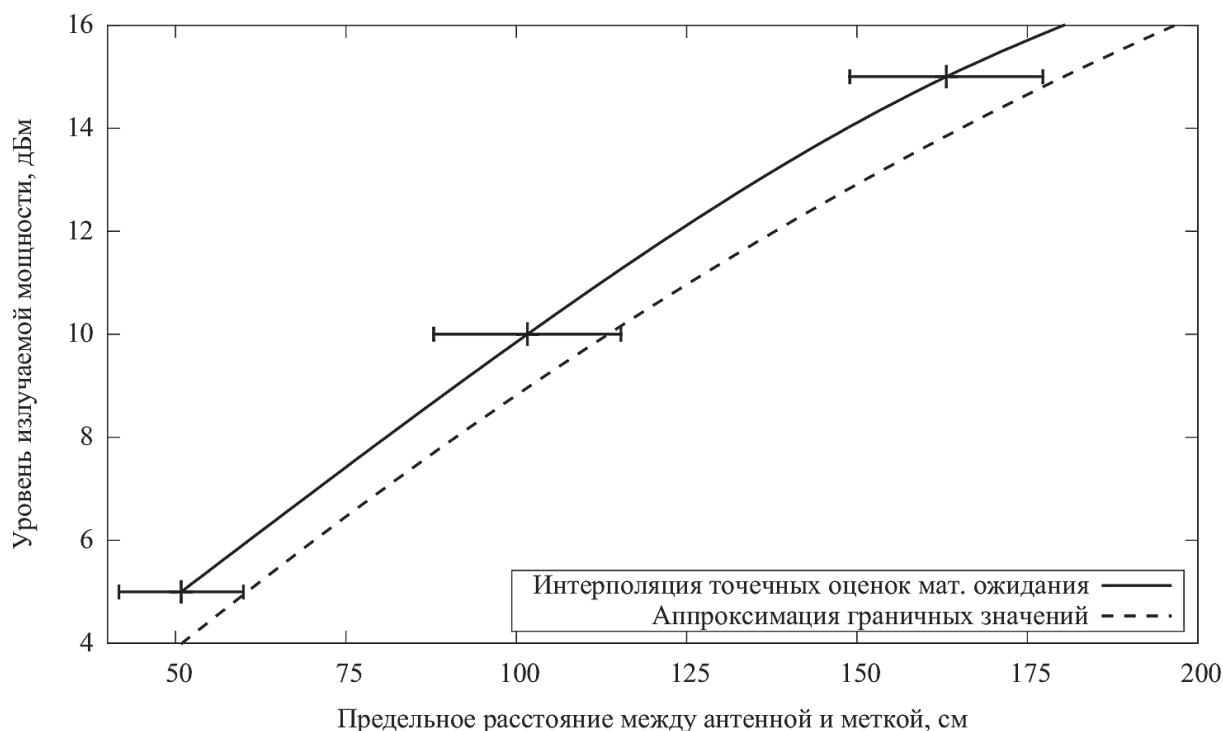


Рис. 1. Зависимость предельного расстояния между радиометкой и антенной от уровня излучаемой антенной мощности

сматривались, так как контрольное расстояние при них превышает межпутевое расстояние в условиях электродепо.

Результаты исследований представлены на рис. 1, где горизонтальными штрихами обозначен статистический интервал предельных расстояний, покрывающий диапазон возможных значений с вероятностью не менее 0,95.

Перейдем к рассмотрению зависимости эксплуатационной ширины зоны радиовидимости от уровня излучаемой мощности. Уточним, что при эксплуатации расстояние между антенной и радиометкой составляет 215 см.

Для каждого p , принадлежащего набору уровней излучаемой мощности $p_{rad} = \{30, 28, 26, 24, 22, 20, 18\}$ дБ, была статистически исследована эксплуатационная ширина зоны радиовидимости меток.

Графически результаты исследований представлены на рис. 2. Вертикальными штрихами показан интервал возможных значений ширины зоны радиовидимости, покрывающий диапазон возможных значений с вероятностью не менее 0,95.

При контроле состояния ридер-антенного тракта предлагалось оценивать значение «паразитного» затухания на контрольном расстоянии между антенной и меткой, выбираемом в зависимости от внешних условий. Рассмотрим через корреляционную зависимость, насколько сильно влияние дисперсии чувствительности контрольной радиометки на полученный результат.

Для этого введем многомерную случайную величину $\mathbf{R} = (r_5, r_{10}, r_{15})^T$, где r_5, r_{10}, r_{15} – случайные величины предельного расстояния между антенной и радиометкой на уровне излучаемой мощности $p = 5, 10, 15$ дБм, соответственно. Подробнее с многомерными случайными величинами и корреляцией можно ознакомиться в [1, 10, 13].

С помощью свободного программного обеспечения Maxima¹ вычислим корреляционную матрицу многомерной случайной величины $\mathbf{R}$:

¹ <http://maxima.sourceforge.net>.

$$\text{Corr}(\mathbf{R}) = \begin{pmatrix} 1,000 & 0,963 & 0,832 \\ 0,963 & 1,000 & 0,813 \\ 0,832 & 0,813 & 1,000 \end{pmatrix}.$$

Полученный результат подтверждает справедливость предлагаемого решения: погрешность оценки «паразитного» затухания из-за дисперсии чувствительности радиометки при изменении контрольного расстояния крайне мала.

Анализ результатов и рекомендации

Согласно предложенному методу контроля, на первом этапе необходимо вычислить значение «паразитного» затухания в тракте по формуле (1). Сразу возникает логичный вопрос, по какой экспериментальной кривой определять уровень излучаемой антенной мощности для исправного оборудования.

В качестве эталонной предлагаем выбрать кривую, соответствующую наихудшим возможным условиям. Данному требованию соответствует кривая, проходящая через гра-

ничные точки экспериментально полученной зависимости, как показано на рис. 1.

Для аппроксимации предложенной кривой полиномом второй степени (использован метод наименьших квадратов [7, 15]) используем следующее уравнение:

$$p_{rad}(d_m) = -0,0002 d_m^2 + 0,1228 d_m - 1,8322, \text{ дБм.}$$

На втором этапе контроля по полученному значению «паразитного» затухания оценивается ширина зоны радиовидимости. Поступим аналогичным образом при выборе функциональной зависимости, характеризующей влияние «паразитного» затухания на ширину зоны радиовидимости, и выберем наихудшие условия (см. рис. 2). Аппроксимация интересующей функции полиномом второй степени имеет вид

$$l(a_0) = -1,507 a_0^2 + 90,626 a_0 - 1145,69, \text{ см.}$$

На рис. 3 представлен возможный алгоритм контроля состояния радиотракта, выполненный с использованием псевдокода. Ознакомиться с понятием псевдокода можно в [3, 9].

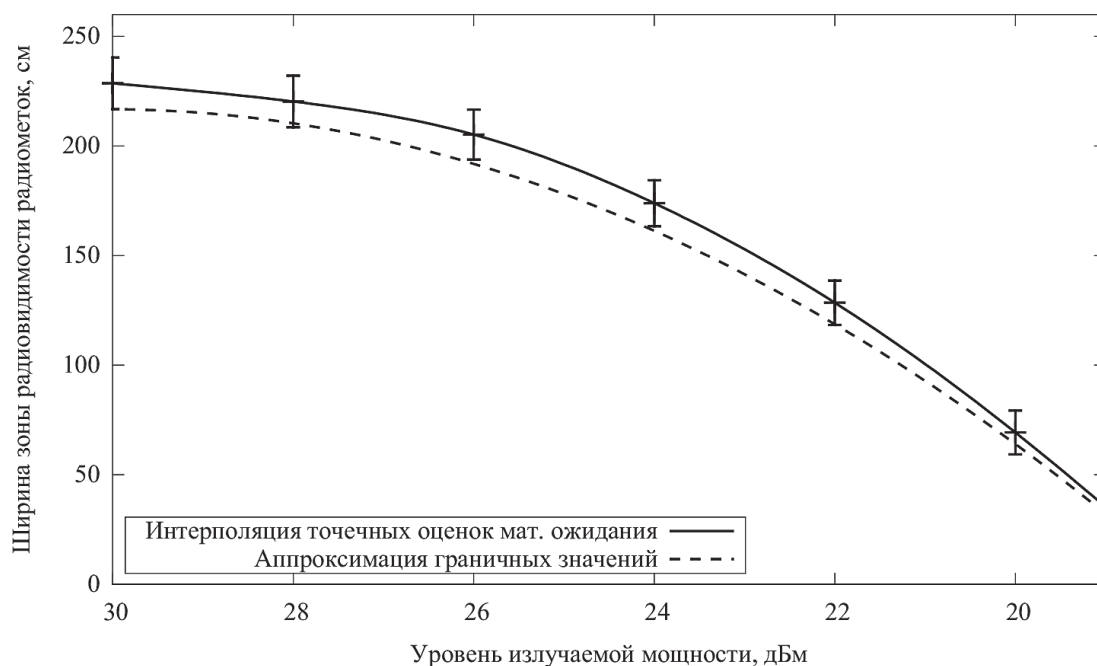


Рис. 2. Зависимость эксплуатационной ширины зоны радиовидимости от уровня излучаемой антенной мощности

Входные данные: контрольное расстояние d_c
Выходные данные: оценка ширины зоны радиовидимости l

```

/* Обозначим максимальный уровень мощности в выходной цепи ридера */
 $p_m \leftarrow 30$ ;
/* Определим эксплуатационный уровень мощности в выходной цепи ридера */
 $p_e \leftarrow 30$ ;
Инициализация ридера;
/* Зададим начальное значение уровня мощности в выходной цепи ридера */
 $p \leftarrow 6$ ;
пока выполняется условие «метка не видна» выполнять
     $p \leftarrow p + 1$ ;
    если  $p > p_m$  тогда
        Вывести сообщение «Метку не удалось обнаружить»;
        Прервать дальнейшее выполнение алгоритма;
    конец
конец
 $p \leftarrow p - 1$ ;
пока выполняется условие «метка не видна» выполнять
     $p \leftarrow p + 0,1$ ;
    если  $p > p_m$  тогда
        Вывести сообщение «Метку не удалось обнаружить»;
        Прервать дальнейшее выполнение алгоритма;
    конец
конец
/* Вычислим номинальный уровень мощности для  $d_c$  */
 $p_0 \leftarrow -0,0002 d_c^2 + 0,1228 d_c - 1,8322$ ;
/* Оценим значение «паразитного» затухания в тракте  $a_0$  */
 $a_0 \leftarrow p - p_0$ ;
/* Оценим ширину зоны радиовидимости  $l$  */
 $l \leftarrow -1,507 (p_e - a_0)^2 + 90,626 (p_e - a_0) - 1145,69$ ;

```

Рис. 3. Алгоритм контроля радиотракта

Заключение

Предложенный метод контроля состояния ридер-антенного тракта аппаратуры СБПП позволяет решить задачу, актуальную для эксплуатации системы бесконтактной привязки к пути, базирующейся на RFID-технологии. С помощью этого метода можно при плановом техническом осмотре или после выполнения плановых технических ремонтов выявить в стационарных условиях депо повышенное затухание в тракте ридер – антенна, принять превентивные меры и привести его в нормальное состояние до выхода поезда на линию.

Библиографический список

1. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – 4-е изд. – М. : Наука, 1969. – 576 с.

2. Дшхунян В. Л. Электронная идентификация. Бесконтактные электронные идентификаторы и смарт-карты / В. Л. Дшхунян, В. Ф. Шаньгин. – М. : АСТ ; НТ Пресс, 2004. – 695 с.

3. Кормен Т. Х. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Х. Кормен, Ч. И. Лейзерсон, Р. Л. Ривест, К. Штайн. – 3-е изд. – М. : Вильямс, 2013. – 1328 с.

4. Костроминов А. М. Алгоритм функционирования системы управления движением электроподвижного состава в метрополитене на базе RFID-технологии / А. М. Костроминов, Т. В. Крючкова // Изв. ПГУПС. – 2014. – Вып. 2. – С. 42–48.

5. Костроминов А. М. Применение RFID-технологий в системе автоведения поездов метрополитена / А. М. Костроминов, М. Ю. Королев, В. В. Гаврилов, Т. В. Крючкова // Изв. ПГУПС. – 2009. – Вып. 3. – С. 91–97.

6. Костроминов А. М. Регрессионная модель зоны радиовидимости для системы бесконтактной

привязки к пути подвижного состава метрополитена / Костроминов А. М., Крючкова Т. В. // Транспорт Урала. – 2012. – Т. 34, № 3. – С. 49–53.

7. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений / Ю. В. Линник. – 2-е изд. – Л. : Физматгиз, 1962. – 352 с.

8. Светлов В. А. История научного метода / В. А. Светлов. – М. : Академический проект ; Деловая книга, 2008. – 700 с.

9. Cormen T. Introduction to Algorithms / T. Cormen, C. Leiserson, R. Rivest, C. Stein. – 3rd ed. – Cambridge, MA, USA : The MIT Press, 2009. – 1312 p.

10. Davidson A. C. Statistical Models / A. C. Davidson. – Cambridge, NY, USA : Cambridge Univ. Press, 2008. – 726 p.

11. Dobkin D. M. The RF in RFID : Passive UHF RFID in Practice / D. M. Dobkin. – Newton, MA, USA : Newnes, 2007. – 504 p.

12. Finkenzeller K. RFID Handbook. Fundamental and Applications in Contactless Smart Cards and Identification / K. Finkenzeller. – 2nd ed. – Chichester, West Sussex, England : Wiley, 2003. – 427 p.

13. Freedman D. Statistics. International student edition / D. Freedman, R. Pisani, R. Purves. – 4th ed. – NY, USA : W. W. Norton & Co., 2007. – 720 p.

14. GS1 EPCglobal Inc. – EPC™ Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID, 2015. – Online; accessed 11 April 2016. URL : http://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/Gen2_Protocol_Standard.pdf.

15. Rao C. R. Linear Models: Least Squares and Alternatives / C. R. Rao, H. Toutenburg. – 2nd ed. – NY, USA : Springer, 1999. – 427 p.

References

1. Ventsel Ye. S. Teoriya veroyatnostey [Probability Theory]. Moscow, Nauka, 1969. 576 p.

2. Dshkhunyan V. L. & Shagin V. F. Elektronnaya identifikatsiya. Beskontaknyye elektronnyye identifikatory i smart-karty [Electronic Identification.

Contactless Electronic Identifiers and Smart Cards]. Moscow, AST, NT Press, 2004. 695 p.

3. Cormen T., Leiserson C., Rivest R. & Stein C. Algoritmy: postroyeniye i analiz [Introduction to Algorithms]. 3rd ed. Moscow, Williams, 2013. 1328 p.

4. Kostrominov A. M. & Kryuchkova T. V. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2014, Is. 2, pp. 42-48.

5. Kostrominov A. M., Korolev M. Yu., Gavrilo V. V. & Kryuchkova T. V. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2009, Is. 3, pp. 91-97.

6. Kostrominov A. M. & Kryuchkova T. V. *Transport Urala – Urals Transport*, 2012, Vol. 34, Is. 3, pp. 49-53.

7. Linnik Yu. V. Metod naimenshih kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy teorii obrabotki nablyudeniy [Method of Least Squares and Principles of the Theory of Observations]. 2nd ed. Leningrad, Fizmatgiz, 1962. 352 p.

8. Svetlov V. A. Istoriya nauchnogo metoda [History of Scientific Method]. Moscow, Akademicheskii proyekt, Delovaya kniga, 2008. 700 p.

9. Cormen T., Leiserson C., Rivest R. & Stein C. Introduction to Algorithms. 3rd ed. Cambridge, MA, USA, The MIT Press, 2009. 1312 p.

10. Davidson A. C. Statistical Models. Cambridge, NY, USA, Cambridge Univ. Press, 2008. 726 p.

11. Dobkin D. M. The RF in RFID: Passive UHF RFID in Practice. Newton, MA, USA, Newnes, 2007. 504 p.

12. Finkenzeller K. RFID Handbook. Fundamental and Applications in Contactless Smart Cards and Identification. 2nd ed. Chichester, West Sussex, England, Wiley, 2003. 427 p.

13. Freedman D., Pisani R. & Purves R. Statistics. International student edition. 4th ed. NY, USA, W. W. Norton & Company, 2007. 720 p.

14. GS1 EPC™ Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID, available at: http://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/Gen2_Protocol_Standard.pdf.

15. Rao C. R. & Toutenburg H. Linear Models: Least Squares and Alternatives. 2nd ed. NY, USA, Springer, 1999. 427 p.

КОСТРОМИНОВ Александр Михайлович – доктор техн. наук, профессор, triak@grozon.spb.ru; РАХМАНИН Сергей Анатольевич – аспирант, beethovin@mail.ru; СМЕРНОВ Богдан Олегович – студент, smirnov@vklay.ru; *ТЮЛЯНДИН Олег Николаевич – аспирант, tyulyandin@vklay.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 621.87

А. А. Мигров, В. В. Кучук, А. С. Хрущёв, С. В. Орлов**ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММ
3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ПОДВИЖНОГО
СОСТАВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

Дата поступления: 21.03.2016

Решение о публикации: 19.04.2016

Цель: Продемонстрировать практическое применение технологий 3D-проектирования для модернизации подвижного состава железнодорожного транспорта. Оптимизировать конструкции трапов для погрузки-разгрузки бульдозера восстановительного поезда. **Методы:** Использованы методы компьютерного моделирования, анализа данных, оптимизационного проектирования. **Результаты:** Проанализированы имеющиеся средства погрузки-разгрузки тяжёлой техники, предложена классификация этих средств, после чего с помощью средств трёхмерного моделирования спроектирована конструкция трапов для погрузки-разгрузки бульдозера восстановительного поезда с учётом рациональных критериев конструирования, в частности, минимизации массы и экономии материалов. **Практическая значимость:** Работа имеет прикладной характер, её результаты внедрены в восстановительном поезде № 3024 Дирекции аварийно-восстановительных средств Октябрьской железной дороги. В службы разработки технической документации предприятий по ремонту подвижного состава можно внедрить инновационные методики усовершенствования узлов и агрегатов.

Подвижной состав, навесные устройства, навесное оборудование, виртуальное проектирование узлов и металлоконструкций, восстановительный поезд.

Aleksandr A. Migrov, senior lecturer, amigrov@gmail.com; ***Anton S. Khrushchev**, Cand. Eng., assistant professor, djerda@mail.ru (Petersburg State Transport University); **Vitaliy V. Kuchuk**, production supervisor, vital_vernylsia2010@mail.ru (Emergency recovery works directorate, Russian Railways JSC); **Sergey V. Orlov**, Museum of Cosmonautics and Rocket Technology head, orlov@spbmuseum.ru (State Museum of the History) APPLICATION OF MODERN 3D-MODELLING PROGRAMS FOR MODERNISATION OF RAILWAY TRANSPORT ROLLING STOCK

Objective: To demonstrate practical application of 3D-projection technologies for modernisation of railway transport rolling stock. To optimise designs of bulldozer lift-on/lift-off brows of emergency train. **Methods:** Applied were methods of computer simulation, data analysis, and optimisation designing. **Results:** Existing heavy equipment lift-on/lift-off devices were analysed, a classification of these devices proposed, after which 3D-modelling was used in designing bulldozer lift-on/lift-off brows of emergency train, which also took into account rational designing criteria such as minimising mass and material saving. **Practical importance:** The study has applied character, its results were implemented on emergency train N 3024 of the Oktyabrskaya Railway's emergency recovery works directorate. Innovative methods for advanced development of components and assemblies can be introduced in technical documentation development services of rolling stock repair enterprises.

Rolling stock, linkage mounting, detachable equipment, virtual designing of units and metallic structures, emergency train.

Неотъемлемой частью технического оснащения восстановительного поезда является тяжёлая гусеничная техника, в транспортном положении находящаяся на платформе, на которую она погружается и с которой разгружается для производства восстановительных работ (рис. 1).

В настоящее время для погрузки-разгрузки тракторов с платформ применяют специальные откидные трапы, зачастую изготавливаемые самостоятельно силами ремонтных предприятий дороги (рис. 2).

Часто ремонтники разрабатывают конструкцию трапов без специальных расчётов, поэтому ради безопасности и прочности в ней содержится излишнее количество деталей, из-за чего перерасходуются материалы на её изготовление и конструкция имеет большую массу.

Цель нашей работы – спроектировать погрузочно-разгрузочный трап такой конструкции, которая отвечала бы принципам рационального проектирования.

Самым тяжелым и крупногабаритным образцом строительных машин в восстановительных поездах является бульдозер ДЭТ-320 массой 58 300 кг (рис. 3). Его характеристики использованы в качестве исходных данных при проектировании металлоконструкции трапа. Основным типом транспортного средства, на которое планируется установить трап, является железнодорожная платформа модели 13-4012.

Краткий анализ конструкций для погрузки-разгрузки гусеничной техники с платформ

Имеется много информации о проектах таких конструкций. Часть из них используется в практике восстановительных поездов, часть оформлена в виде перспективных патентов и изобретений [1, 6, 8, 10]. Средства можно классифицировать по признаку мобильности: стационарные и мобильные. Стационарные средства могут иметь разборную и неразбор-



Рис. 1. Трактор ДЭТ-250 на платформе восстановительного поезда [13]



Рис. 2. Вариант откидного трапа для сгона трактора ДЭТ-250

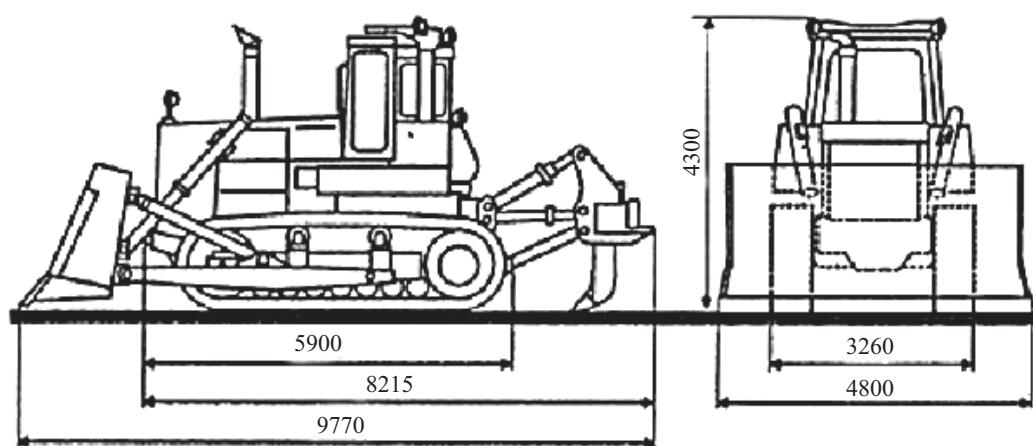


Рис. 3. Основные геометрические размеры перевозимого бульдозера

ную конструкцию, мобильные могут быть выполнены как неотъемлемая часть железнодорожной платформы, либо как перевозимая сборно-разборная конструкция, либо как съемный модуль.

В восстановительных поездах ОАО РЖД наиболее распространен способ погрузки самоходной техники на железнодорожную платформу восстановительного поезда с помощью

устройства, описанного в [6]. При этом со стороны торца железнодорожной платформы устанавливают устройство в виде наклонных направляющих, снабженных приводами для подъема-опускания (рис. 4).

Анализ показывает, что несмотря на частое использование трапов в восстановительных поездах, задача проектирования их конструкций сегодня актуальна [5].

Разработка конструкции трапа для погрузки-разгрузки бульдозера

Для учета действующих нагрузок разработана расчётная схема трапа (рис. 5) и вы-

бран материал для его изготовления согласно [11].

В программе SolidWorks с учётом [2–4, 7, 9, 12, 14] трап был смоделирован в нескольких вариантах и проанализирован на предмет оптимальности (рис. 6).



Рис. 4. Общий вид техники на платформе с аппаратами

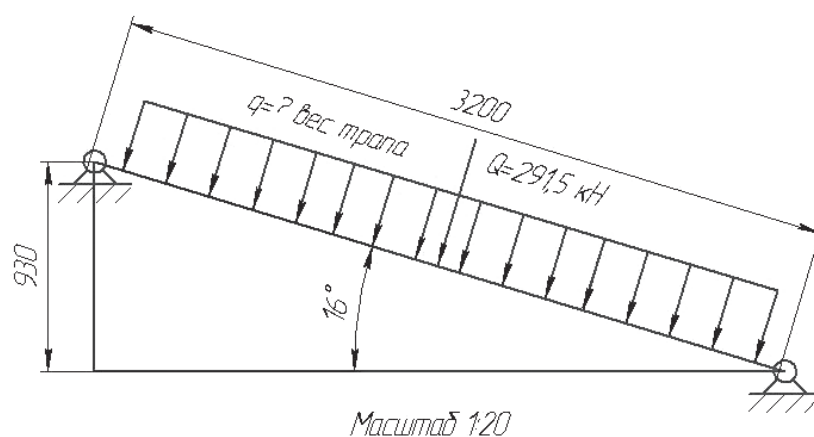


Рис. 5. Расчётная схема трапа

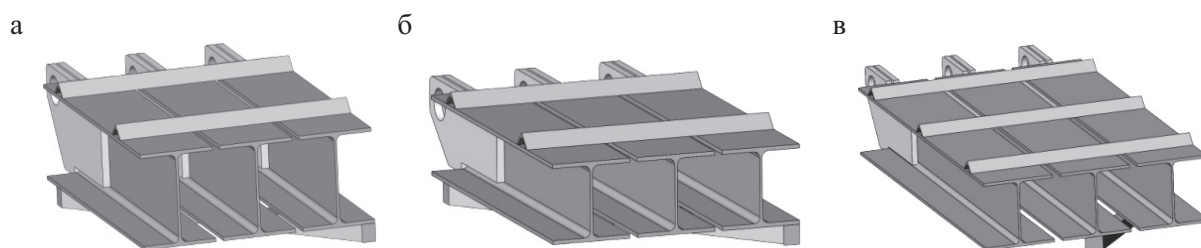


Рис. 6. Варианты поперечного сечения трапа:
двутавр а) увеличенный (вариант 1); б) средний (вариант 2); в) уменьшенный (вариант 3)

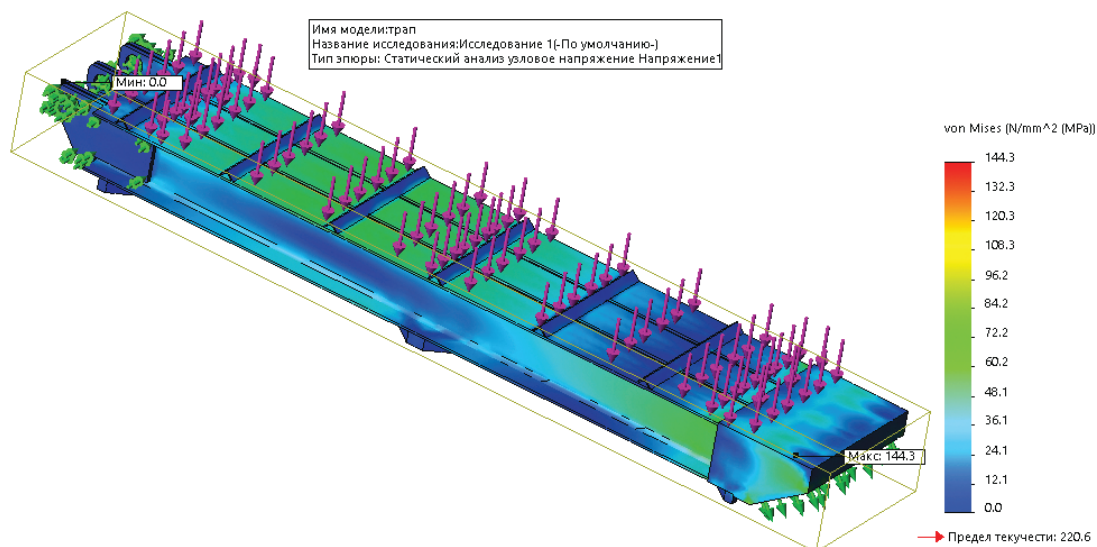


Рис. 7. Моделирование аппарата. Вариант 1

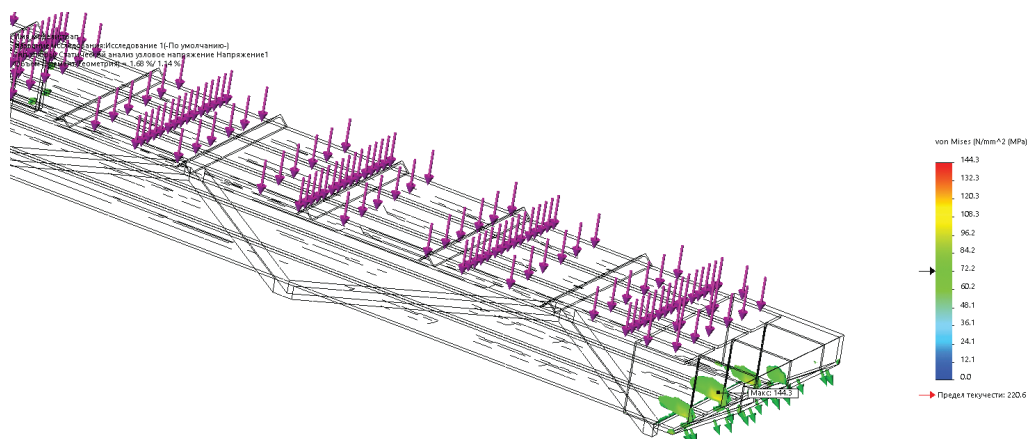


Рис. 8. Аппарель, вариант 1. Статический анализ. Узловые напряжения

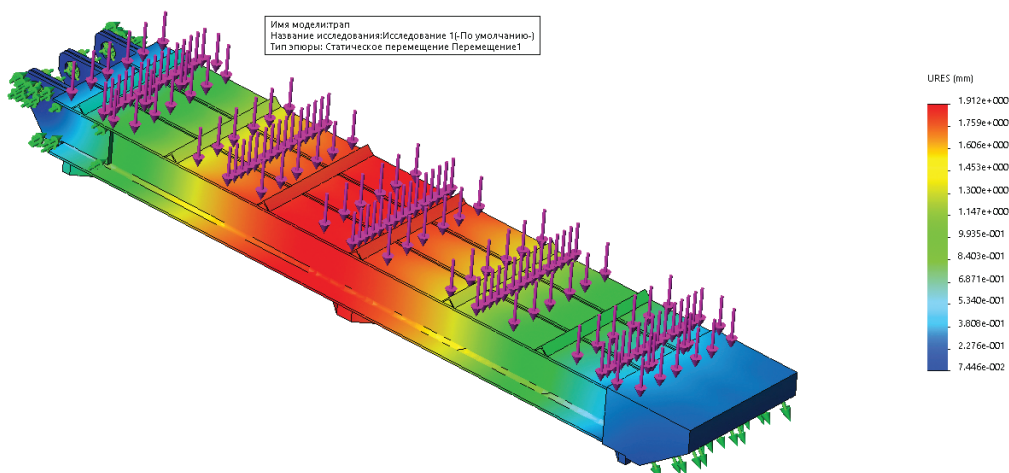


Рис. 9. Аппарель, вариант 1. Анализ на статические перемещения

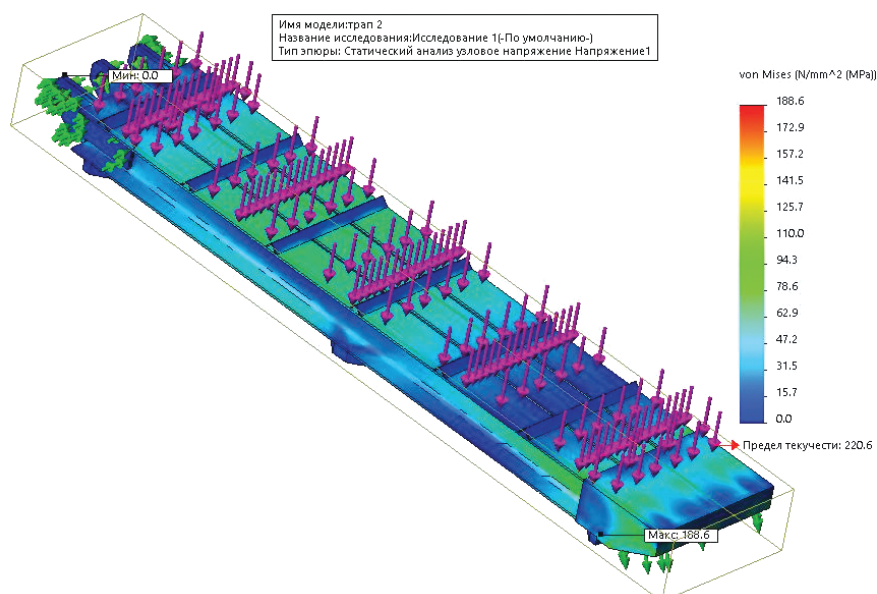


Рис. 10. Моделирование аппарата. Вариант 2

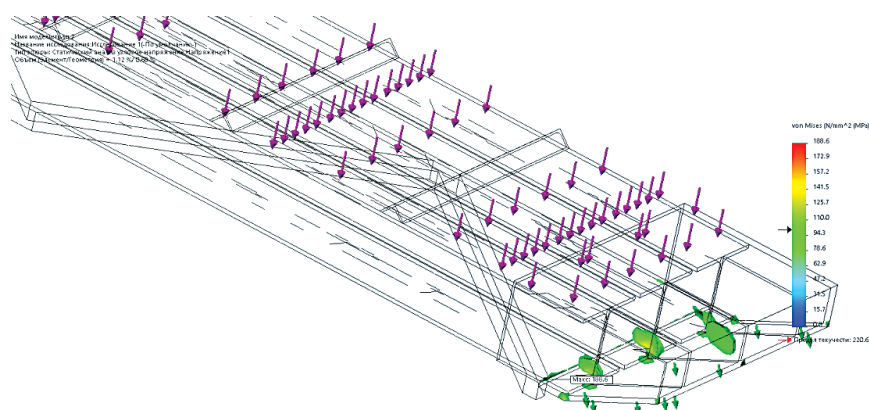


Рис. 11. Аппарель, вариант 2. Статический анализ. Узловые напряжения

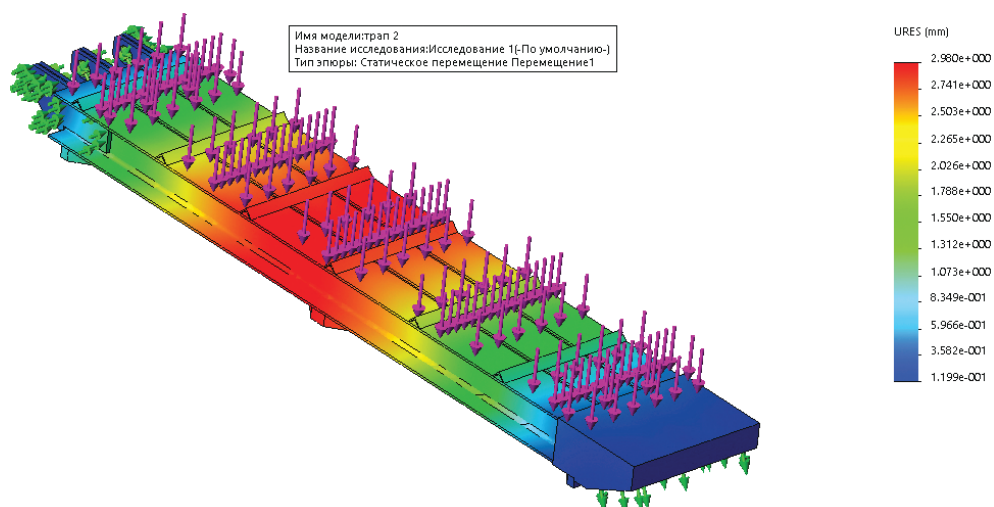


Рис. 12. Аппарель, вариант 2, анализ на статические перемещения

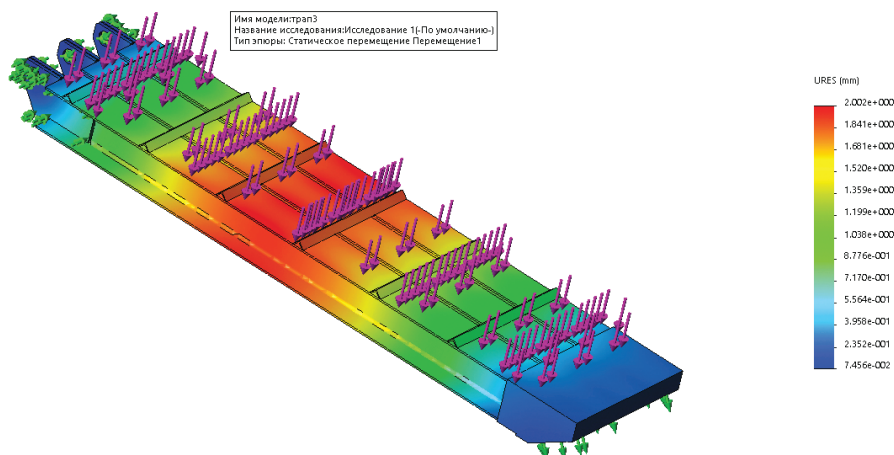


Рис. 13. Моделирование аппарата. Вариант 3

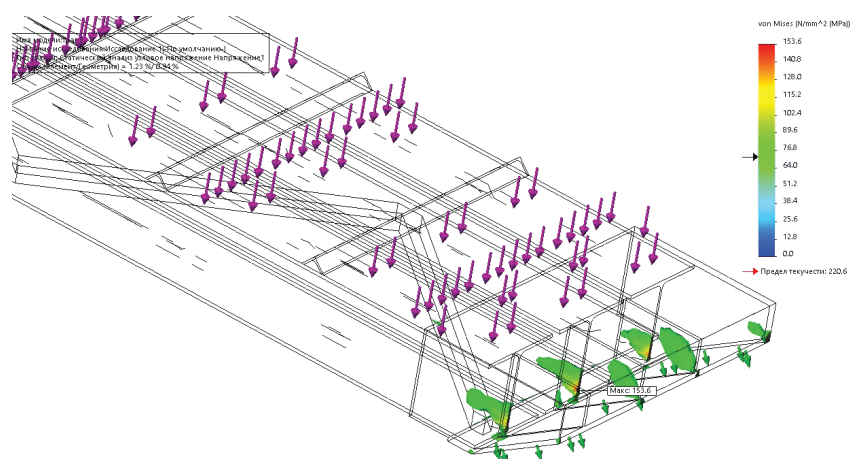


Рис. 14. Аппарель, вариант 3. Статический анализ. Узловые напряжения

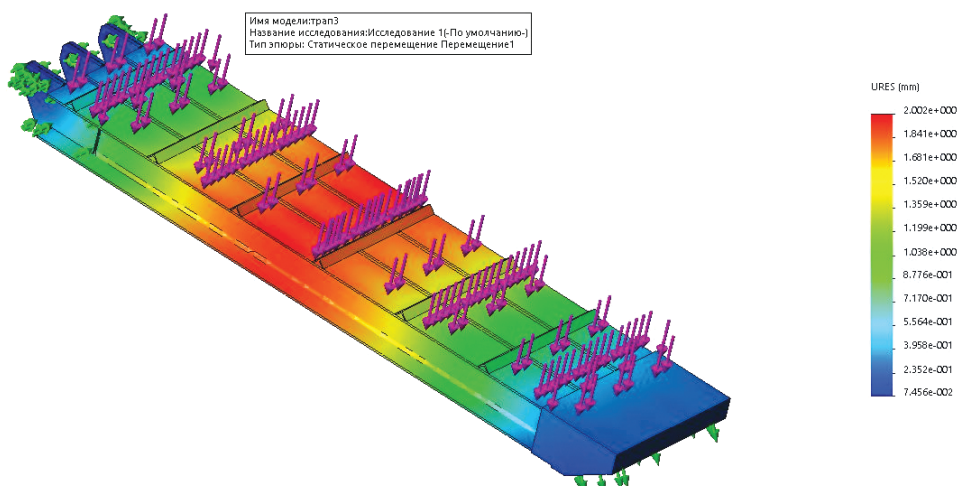


Рис. 15. Аппарель, вариант 3, анализ на статические перемещения

Выводы по расчетам:

- аппарат, увеличенный двутавр № 26 (вариант 1). В рассматриваемой конструкции имеется лимитирующий элемент, где минимальный коэффициент запаса прочности составляет 1,5 (узел крепления опорной площадки с двутаврами). Исследование на предмет жесткости показывает, что лимитирующий элемент (двутавр) имеет следующие характеристики: $l_{\max} = 3,2$ м, стрела прогиба 2,0 мм, что не превышает допустимого значения, рассматриваемая конструкция соответствует требованиям прочности и жесткости (рис. 7–9);

- аппарат, двутавр средний (вариант 2). В рассматриваемой конструкции имеется лимитирующий элемент, минимальный коэффициент запаса прочности которого составляет 1,15 (узел крепления опорной площадки с двутаврами). Исследование на предмет жесткости показывает, что лимитирующий элемент (двутавр) имеет такие характеристики: $l_{\max} = 3,2$ м, стрела прогиба 2,9 мм, что не превышает допустимого значения, рассматриваемая конструкция соответствует требованиям прочности и жесткости (рис. 10–12);

- аппарат, уменьшенный двутавр № 23Ш (вариант 3). В рассматриваемой конструкции имеется лимитирующий элемент, минималь-

ный коэффициент запаса прочности которого составляет 1,4 (узел крепления опорной площадки с двутаврами). Исследование на предмет жесткости показывает, что лимитирующий элемент (двутавр) имеет такие характеристики: $l_{\max} = 3,2$ м, стрела прогиба 1,9 мм, что не превышает допустимого значения, рассматриваемая конструкция соответствует требованиям прочности и жесткости (рис. 13–15).

Таким образом, элементы конструкции трапа рассчитаны на прочность исходя из приложенных нагрузок. Подобрано оптимальное соотношение их размеров, благодаря которому уменьшается вес всей конструкции и экономятся материалы (рис. 16).

Заключение

Рассмотренные конструкции трапа имеют преимущество перед ныне эксплуатируемыми конструкциями благодаря меньшему весу и стоимости за счет экономии металла.

Размеры напряжённых зон и значения максимумов напряжений при этом не превышают допустимых пределов.

При необходимости (к примеру, при создании трапов для более тяжёлой техники) есть

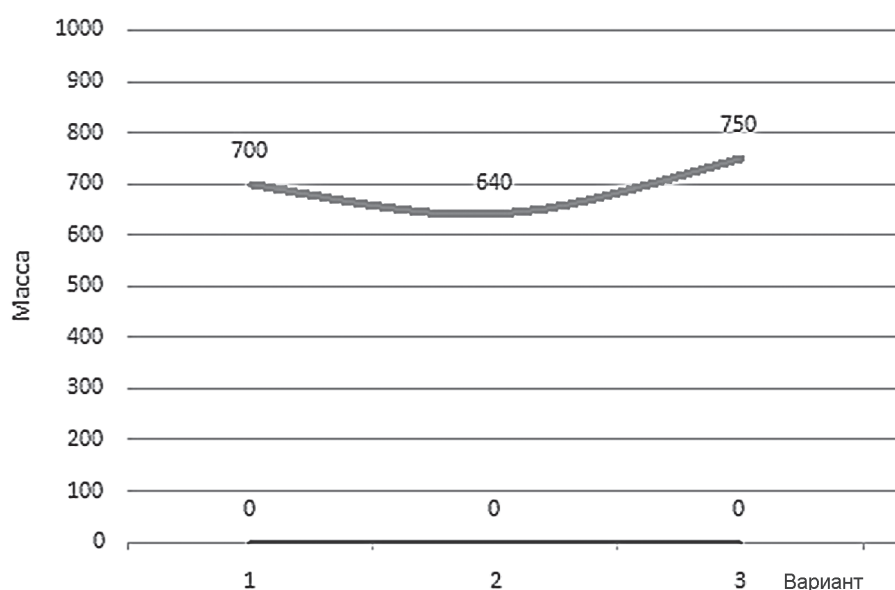


Рис. 16. Зависимость массы трапа от варианта конструктивного исполнения

возможность управлять распределением напряжений в конструкции, варьируя положения её отдельных элементов.

Минимальным весом, согласно рис. 16, обладает вариант 2, который может быть принят в качестве оптимального при изготовлении трапов для погрузки-разгрузки бульдозеров восстановительных поездов.

Представленные результаты получены с применением САД и САЕ функционалов технологии гибридного параметрического моделирования в среде SolidWorks.

Библиографический список

1. А. с. 98573 СССР, МПК B61D47/00. Разборная металлическая аппарель для погрузки колесных и гусеничных самоходных машин на открытый железнодорожный состав / М. А. Кудрявцев, В. С. Кудряшов, В. В. Ковылин. – № 732 / 448078; заявл. 29.04.52 ; опубл. 1958, Бюл. № 12.
2. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовский. – М. : ДМК-пресс, 2015.
3. Алямовский А. А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский. – СПб. : БХВ-Петербург, 2008.
4. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов. Задачи, методы, рекомендации / А. А. Алямовский. – М. : ДМК-пресс, 2015.
5. Бульдозеры ЧТЗ для восстановительных поездов. – URL : <http://chtz-uraltrac.ru/news/topics/56.php>.
6. Васильев Н. В. Восстановительные работы на железных дорогах / Н. В. Васильев, Р. А. Родионов, О. И. Комаров и др. ; под ред. В. М. Шитова, Н. А. Шелудько. – М. : Транспорт, 1993.
7. Дударева Н. Ю. SolidWorks. Оформление проектной документации / Н. Ю. Дударева, С. А. Загайко. – М. : БНВ, 2009.
8. Попов Д. Бульдозеры пойдут по трапу / Д. Попов // Гудок. – 2008. – 11 ноября.
9. Прохоренко В. SolidWorks. Практическое руководство / В. Прохоренко. – М. : Бином, 2004.
10. Разгрузка танка с вагона-рампы компании LMR на Дне открытых дверей компании Longmoor

1 мая 1965 г. – URL : <http://www.rcts.org.uk/branches/south%20east/images/longmoor005.htm>.

11. Справочник снабженца. Вып. 85. Металлопрокат. Марки сталей, сплавов, чугуна. Сортамент / под ред. Л. Драчук. – М. : Торговый Дом Металлов, 2007. – 596 с.

12. Тихомиров Г. И. Конструирование элементов механических приводов машин и механизмов с использованием компьютерных технологий: учеб. пособие / Г. И. Тихомиров. – СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2014.

13. Трактор ДЭТ-250, восстановительный поезд станции Канаш, Чувашия, Россия. – URL : <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:DET-250.jpg?uselang=ru>.

14. Хрущёв А. С. Применение программы SolidWorks при прочностных расчётах в курсовом проектировании по «Деталям машин и конструкций»: учеб. пособие / А. С. Хрущёв, М. С. Яшкин, А. А. Алексеев. – СПб. : ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015.

References

1. A. S. 98573 SSSR, MPK B61D47/00. Razbornaya metallichesкая apparel dlya pogruzki kolesnykh i gusenichnykh samokhodnykh mashin na otkrytyy zheleznodorozhnyy sostav [Detachable Metallic Ramp for Loading Wheeled and Tracked Self-Propelled Vehicles into Open Train]. M. A. Kudryavtsev, V. S. Kudryashov, V. V. Kovylin. No. 732/448078; filed 29.04.52; publ. 1958, Bulletin no. 12.
2. Alyamovskiy A. A. Inzhenernyye raschety v SolidWorks Simulation [Engineering Calculations in SolidWorks Simulation]. Moscow, DMK-press, 2015.
3. Alyamovskiy A. A. SolidWorks 2007/2008. Kompyuternoye modelirovaniye v inzhenernoy praktike [SolidWorks 2007/2008. Computer Simulation in Engineering Practice]. St Petersburg, BKhV-Peterburg, 2008.
4. Alyamovskiy A. A. SolidWorks Simulation. Inzhenernyy analiz dlya professionalov. Zadachi, metody, rekomendatsii [SolidWorks Simulation. Engineering Analysis for Professionals. Problems, Methods, Recommendations]. Moscow, DMK-press, 2015.

5. Bulldozery ChTZ dlya vosstanovitelnykh poyezdov [ChTZ Bulldozers for Emergency Trains], available at: <http://chtz-uraltrac.ru/news/topics/56.php>.
6. Vasilyev N. V., Rodionov R. A., Komarov O. I. et al. Vosstanovitelnyye raboty na zheleznykh dorogakh [Emergency Operations on Railways]; ed. V. M. Shitov, N. A. Sheludko. Moscow, Transport, 1993.
7. Dudareva N. Yu. & Zagayko S. A. SolidWorks. Oformleniye proyektnoy dokumentatsii [SolidWorks. Execution of Design Documentation]. Moscow, BHV, 2009.
8. Popov D. *Gudok – Signal*, Nov. 11, 2008.
9. Prokhporenko V. SolidWorks. Prakticheskoye rukovodstvo [SolidWorks. Practical Guide]. Moscow, Binom, 2004.
10. LMR Tank Ramp Wagon with a Tank Off-loading from a Warplate at the Longmoor Open Day on May 1st, 1965, available at: <http://www.rcts.org.uk/branches/south%20east/images/longmoor005.htm>.
11. Spravochnik snabzhentsa [Buying Agent's Reference Book]. Is. 85. Metalloprokat. Marki staley, splavov, chuguna. Sortament [Rolled Metal Products. Grades of Steel, Alloys, Cast Iron. Dimensions]; ed. L. Drachuk. Moscow, Torgovyy Dom Metallov, 2007. 596 p.
12. Tikhomirov G. I. Konstruirovaniye elementov mekhanicheskikh privodov mashin i mekhanizmov s ispolzovaniyem kompyuternykh tekhnologiy: uchebnoye posobiye [Designing Elements of Mechanical Drives of Machines and Mechanisms with the Use of Computer Technologies: Course Book]. St. Petersburg, PGUPS, 2014.
13. DET-250 tractor, Kanash station emergency train, Chuvashia, Russia, available at: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:DET-250.jpg?uselang=en>.
14. Khrushchev A. S., Yashkin M. S. & Alekseyev A. A. Primeneniye programmy SolidWorks pri prochnostnykh raschetakh v kursovom proyektirovanii po "Detalyam mashin i konstruksiy" [Application of SolidWorks Program in Strength Calculations for Course Design in Machine and Constructions Details: Study Guide]. St. Petersburg, FGBOU VPO PGUPS, 2015.

МИГРОВ Александр Алексеевич – старший преподаватель, amigrov@gmail.com; *ХРУЩЁВ Антон Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, djerda@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); КУЧУК Виталий Валерьевич – мастер производственного участка, vital_vernylsia2010@mail.ru (Дирекция аварийно-восстановительных работ ОАО «РЖД»); ОРЛОВ Сергей Васильевич – руководитель музея космонавтики и ракетной техники, orlov@spbmuseum.ru (Государственный музей истории).

УДК 656.078

Н. С. Нестерова, Вл. А. Анисимов**СБАЛАНСИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТРАТЕГИЙ РАЗВИТИЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ**

Дата поступления: 06.04.2016

Решение о публикации: 20.06.2016

Цель: Предложить инструмент для методологии проектирования развития мультимодальной транспортной сети (МТС), обеспечивающий многокритериальную оценку стратегий этапного изменения облика и мощности МТС с учетом внешних и внутренних факторов, влияющих на формирование облика МТС, её функционирование и развитие. МТС в данном исследовании рассматривается как совокупность мультимодальных транспортных коридоров, которые состоят из мультимодальных транспортных узлов и транспортных звеньев различных видов транспорта для решения стратегических задач перевозки грузов и пассажиров. **Методы:** Применены методы системного анализа. **Результаты:** В качестве инструмента многокритериальной оценки стратегий развития МТС предложена сбалансированная система показателей (ССП), подобная Balanced Scorecard, позволяющая учесть особенности решаемой проблемы. Рассмотрены основные понятия, базовые компоненты ССП и этапы её построения, в соответствии с которыми ССП была разработана применительно к развитию МТС. Описаны такие базовые компоненты ССП, как перспективы, стратегические цели, показатели, целевые значения и стратегические инициативы, взаимоувязанные с помощью карты стратегических задач. **Практическая значимость:** Предложенная ССП позволит более обоснованно формировать область эффективных стратегий с учетом их всесторонней оценки на основе множества критериев, определять направленность стратегии изменения облика и мощности МТС, отражать реализацию стратегии, связывая стратегическое управление с оперативным на основе ключевых показателей эффективности и причинно-следственных связей между ними.

Мультимодальная транспортная сеть, сбалансированная система показателей, стратегия развития, стратегическая цель, стратегическая инициатива, карта стратегических задач, многокритериальная оценка.

***Natalya S. Nesterova**, Cand. Eng., assoc. professor, mer-maid2@yandex.ru, **Vladimir A. Anisimov**, D. Eng., professor, anisvl@mail.ru (Far Eastern State Transport University) **BALANCED SCORECARD FOR EVALUATION OF MULTIMODAL TRANSPORTATION NETWORK DEVELOPMENT STRATEGIES**

Objective: To propose an instrument for methodology of designing multimodal transportation network development which ensures multi-criterion evaluation of strategies of interval changes to layout and capacity of multimodal transportation network, taking into account internal and external factors that influence the forming of multimodal transportation network layout, its functioning and development. In this study, multimodal transportation network is treated as the whole of multimodal transportation corridors which consist of multimodal transportation hubs and transportation elements of various types of transport for solution of strategic tasks in cargo and passenger transportation. **Methods:** Systemic analysis methods were applied. **Results:** As an instrument of multi-criterion evaluation of multimodal transportation network development strategies, a balanced scorecard system (BSC) was proposed, similar to Balanced Scorecard, allowing to take specific features of the problem being solved into account. Basic definitions, basic BSC components and stages of its building were considered, according to which BSC

was developed in regards to development of multimodal transportation network. Basic BSC components were described, such as perspectives, strategic objectives, indices, target values and strategic initiatives, interconnected through strategic objective roadmap. **Practical importance:** Proposed BSC would allow to identify the range of efficient strategies on the basis of their overall assessment based on multiple criteria, to determine the direction of strategy of altering layout and capacity of multimodal transportation network, to reflect realisation of strategy by tying strategic management with operative control on the basis of key efficiency indices and cause-and-effect links between them.

Multimodal transportation network, balanced scorecard system, development strategy, strategic objective, strategic initiative, strategic objective roadmap, multi-criterion evaluation.

В соответствии с «Транспортной стратегией РФ до 2030 г. » (далее – Транспортная стратегия), одной из основных задач развития единой транспортной сети и её регионов является реализация транзитного потенциала страны посредством создания конкурентоспособных транспортных коридоров, формирующих основу интеграции России в мировую транспортную систему [13]. В работах [3, 9] предложено выделять из единой транспортной сети (ЕТС) мультимодальную транспортную сеть (МТС) для концентрации внимания на наиболее приоритетных задачах, поставленных в [13]. В соответствии с [3, 9] под МТС понимается совокупность мультимодальных транспортных коридоров, состоящих из мультимодальных транспортных узлов (МТУ) и транспортных звеньев (ТЗ) различных видов транспорта и решающих стратегические задачи перевозки грузов и пассажиров.

Исследование посвящено вопросам развития МТС, а именно формированию множества стратегий изменения облика и мощности МТС, выделению из него области эффективных стратегий и принятию решения, удовлетворяющего заданным условиям, определяющим поставленные цели развития системы.

Выбор стратегии должен быть научно обоснованным. Для этого необходим инструмент всесторонней оценки стратегий развития МТС с учетом внешних и внутренних факторов, влияющих на формирование облика МТС, её функционирование и развитие. Сложность проблемы развития МТС обусловлена следующими особенностями:

- многочисленностью объектов транспорта и связей между ними;

- многочисленностью управляющих структур, собственников, решающих вопросы развития, функционирования и взаимодействия данных объектов, использующих их и преследующих собственные интересы [6, 12];

- условиями рыночной экономики, отличающимися от плановой и влияющими на предпочтения и действия участников инвестиционного проекта развития МТС [6, 12];

- множеством других внешних факторов, влияющих на выбор стратегии изменения облика и мощности МТС (общественной эффективностью, транспортной мобильностью, геополитикой и т. п.).

Использование только экономических показателей (приведенных строительно-эксплуатационных затрат, интегрального эффекта и др.) не всегда позволяет учесть вышеперечисленные особенности.

В данной статье предложена система критериев, позволяющая количественно оценить стратегию развития МТС, которая является сбалансированной системой показателей (ССП), подобной Balanced Scorecard. Основанием для такого мнения служит то, что в транспортной отрасли для оценки результатов функционирования и развития транспортных систем всегда применяется совокупность технико-эксплуатационных и экономических показателей, адекватная СПП [2]. Например, постановка задачи увеличения мощности железной дороги заключается в выборе такого варианта её развития, при котором её провоз-

ная и пропускная способности, эксплуатационные затраты на перевозки и содержание основных фондов, капитальные вложения на развитие должны быть сбалансированы между собой и связаны с размерами потребных перевозок таким образом, чтобы эффективность от реализации принятого решения в пределах горизонта расчета была максимальной.

Основные положения ССП для оценки стратегий

Предпосылкой разработки ССП (Balanced Scorecard) было предположение, что финансовые показатели не должны быть единственными критериями оценки деятельности предприятия. Результаты исследований Роберт С. Каплан и Дейвид Нортон опубликовали в 1992 г. [14]. В настоящее время ССП широко используется на предприятиях всего мира. Опыт компаний, применивших данную систему, представлен в [15]. В условиях жесткой конкуренции ССП является хорошим инструментом для оценки функционирования

и развития организации через финансовые и нефинансовые показатели. Оптимальной системой показателей для организаций железнодорожного транспорта является система сбалансированных показателей, которая позволяет всесторонне оценивать результаты деятельности предприятия, учитывая при этом различные аспекты бизнеса: финансы, внутренние процессы, персонал и развитие, безопасность, клиентуру, рынки, технологические процессы [11]. Для решения задач развития объектов региональной сети железных дорог и МТУ авторы [2, 10] использовали идею Balanced Scorecard, определив набор показателей, стратегических инициатив развития и функционирования РСЖД и МТУ. В данной статье предлагается разработать ССП для этапного изменения облика и мощности МТС и её элементов, позволяющую на разных стадиях создания и реализации инвестиционного проекта управлять им практически непрерывно. В соответствии с идеей Balanced Scorecard [14, 15] процесс разработки ССП можно представить в виде последовательности (рис. 1).

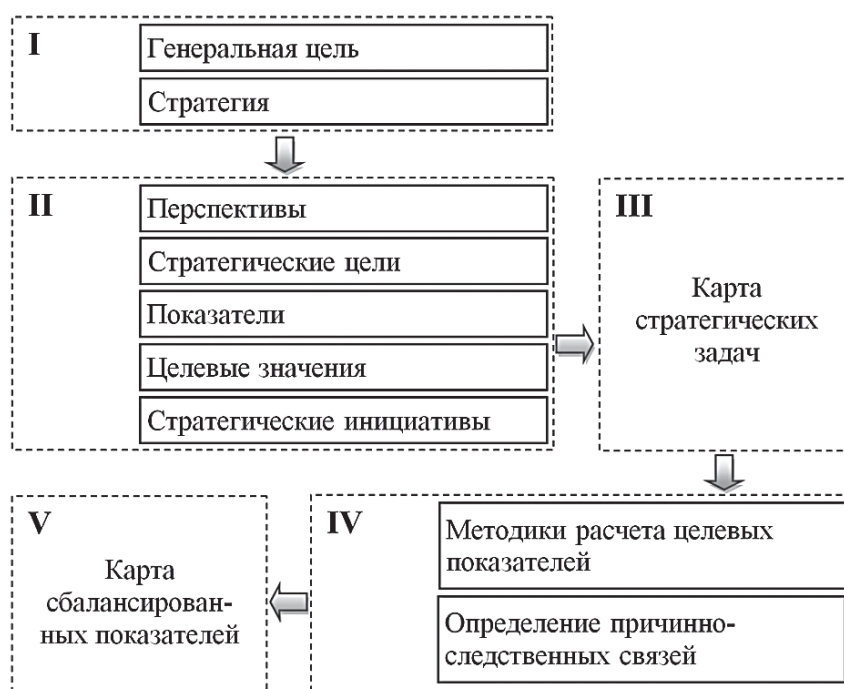


Рис. 1. Этапы разработки сбалансированной системы показателей для многокритериальной оценки стратегий развития МТС

Первый этап заключается в определении миссии (генеральной цели) и стратегии. Миссия определяет основную цель функционирования МТС как элемента единой транспортной сети (ЕТС). На основе анализа целей Транспортной стратегии принята генеральная цель развития и функционирования МТС – создание условий для экономического роста, повышения конкурентоспособности национальной экономики и качества жизни населения путем обеспечения доступа к безопасным и качественным транспортным услугам, превращение географических особенностей России в ее конкурентное преимущество [1]. Стратегия определяет способ достижения генеральной цели – поэтапное изменение облика и мощности мультимодальной транспортной сети, выделенной из ЕТС.

На втором этапе определяются базовые компоненты ССП:

а) перспективы – четыре составляющие, которые отражают стратегически важные аспекты развития и функционирования МТС:

- *финансовая* оценивает экономические эффекты стратегий развития МТС;

- *клиентская* (внешняя среда) оценивает возможные результаты реализации стратегии (удовлетворение спроса на перевозки и увеличение их объема);

- *внутренние процессы* определяют основные действия (стратегические инициативы), требующие максимального внимания, решающие для стратегии развития МТС, эффективности перевозочного процесса, поддержания транспортной инфраструктуры в работоспособном состоянии;

- *развитие технологий и обучение персонала* оценивают ожидаемый уровень усовершенствования информационных технологий и систем, а также переобучение персонала, оптимизацию организационных процедур и т. п., направленных на повышение качественных характеристик перевозочного процесса, его эффективность и надежность;

б) стратегические цели – наиболее важные цели, достижение которых значительно влияет на конкурентоспособность транспортной отрасли и её элементов:

- удовлетворение спроса на перевозки, включая транзитные, экспортные и импортные, увеличение их объема;

- развитие экономики и производительных сил страны и её регионов, интеграция в международное торговое пространство для реализации транзитного и экспортного потенциала;

- повышение благосостояния и социального положения населения, предоставление населению конкурентоспособных качественных транспортных услуг;

- развитие МТС для обеспечения потребных объемов перевозок и привлечения потенциальных грузо- и пассажиропотоков;

- оптимизация эксплуатационного процесса на элементах МТС по критериям эффективности, надежности и качества;

- внедрение передовых транспортных технологий. Повышение квалификации работников транспортной отрасли;

в) показатели – измерители эффективности стратегий развития МТС. В результате анализа основных индикаторов целей развития транспортной системы [13] и генеральной цели приняты следующие показатели:

- общественная, народно-хозяйственная и отраслевая эффективность. Общественная эффективность позволяет учесть социально-экономические последствия реализации стратегии развития МТС для общества в целом, оценивая экономические, экологические, социальные и внешнеэкономические эффекты. Народно-хозяйственная и отраслевая эффективность определяют реализуемость и привлекательность инвестиционного проекта для его потенциальных участников [4, 5, 7, 12];

- объем перевозок грузов и пассажиров, характеризующий влияние стратегии изменения облика и мощности МТС на уровень социально-экономического развития страны и ее регионов;

- транспортная мобильность (подвижность) населения, измеряемая числом поездок на одного человека и затраченным временем на передвижение [7];

- провозная способность элементов и МТС в целом [9]. Увеличение значения данного показателя

теля возможно в результате реализации стратегических инициатив, позволяющих увеличивать вес транспортных средств, пропускную способность участков, промежуточных пунктов, объектов в МТУ различных видов транспорта;

- коэффициент готовности элементов МТС к освоению $\Gamma_{\text{потр}}$, оценивающий стратегии развития МТС с позиции надежности и позволяющий определить готовность элементов МТС выполнить $\Gamma_{\text{потр}}$ с учетом надежности их функционирования и реализации мероприятий по изменению их облика и мощности, входящих в рассматриваемую стратегию;

- сокращение времени доставки грузов;
- сокращение времени задержек в работе элементов МТС;

г) целевые значения показателей – численные значения показателей, характеризующие степень достижения цели:

- прогнозные оценки объемов перевозок грузов и пассажиров, грузо- и пассажирооборота в зависимости от указанных в [13];

- задания по улучшению технико-эксплуатационных и экономических показателей работы различных видов транспорта (сокращение времени доставки грузов, времени задержек в работе элементов МТС, эксплуатационных расходов и т. п.);

- значения индикаторов реализации [13, с. 167–210];

д) стратегические инициативы, направленные на достижение целевых значений показателей:

- стратегия изменения облика и мощности мультимодальной транспортной сети;

- программа развития технологий перевозочного процесса;

- программа повышения квалификации работников транспортной отрасли.

Третий этап заключается в разработке карты стратегических задач, представляющей собой способ отображения стратегии развития МТС в виде набора стратегических целей, показателей с причинно-следственными связями между ними в соответствии с целевыми значениями показателей на основе используемых утвержденных стратегических инициатив.

На четвертом этапе происходят поиск и выбор методик расчета целевых показателей, выявление параметров, участвующих в их определении, и установление между ними причинно-следственных связей. Причинно-следственные связи – это отношения между показателями, аналогичные отношениям «если... то», отражающие влияние прогресса в достижении одной цели на успех связанных с ней других целей. Причинно-следственные связи между показателями стратегических целей приведены на рис. 2.

По результатам четвертого этапа выполняется пятый (заключительный) – разрабатывается карта сбалансированных показателей для многокритериальной оценки стратегий развития МТС, направленных на достижение целей её развития и функционирования.

На рис. 3 приведен основной компонент карты, отражающий причинно-следственные связи между параметрами и показателями развития и функционирования МТС. Важно отметить, что основным параметром перевозочного процесса является время выполнения операций с транспортными средствами, от которого зависят все показатели ССП.

Заключение

Впервые предложен инструмент многокритериальной оценки стратегий изменения облика и мощности мультимодальной транспортной сети на основе применения идеи Balanced Scorecard – сбалансированной системы показателей, определяющих направленность стратегий на достижение целей развития и функционирования МТС. Совокупность взаимосвязанных сбалансированных показателей предлагается использовать в методологии проектирования развития мультимодальной транспортной сети при определении эффективности стратегий изменения облика и мощности МТС с учетом возможных социально-экономических последствий их реализации для общества в целом, экономики страны, транспортной отрасли, а также оценить при-



Рис. 2. Причинно-следственные связи между стратегическими целями и показателями развития МТС

влекательность инвестиционного проекта для его потенциальных участников.

Библиографический список

1. Анисимов Вл. А. Сбалансированные показатели для оценки проектных альтернатив раз-

вития / Вл. А. Анисимов, С. М. Гончарук // Мир транспорта. – 2005. – № 1. – С. 94–101.

2. Анисимов Вл. А. Теория и практика проектирования развития региональной сети железных дорог с учетом изменения облика и мощности станций и узлов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.06 / Вл. А. Анисимов. – Хабаровск : ДВГУПС, 2005. – 380 с.

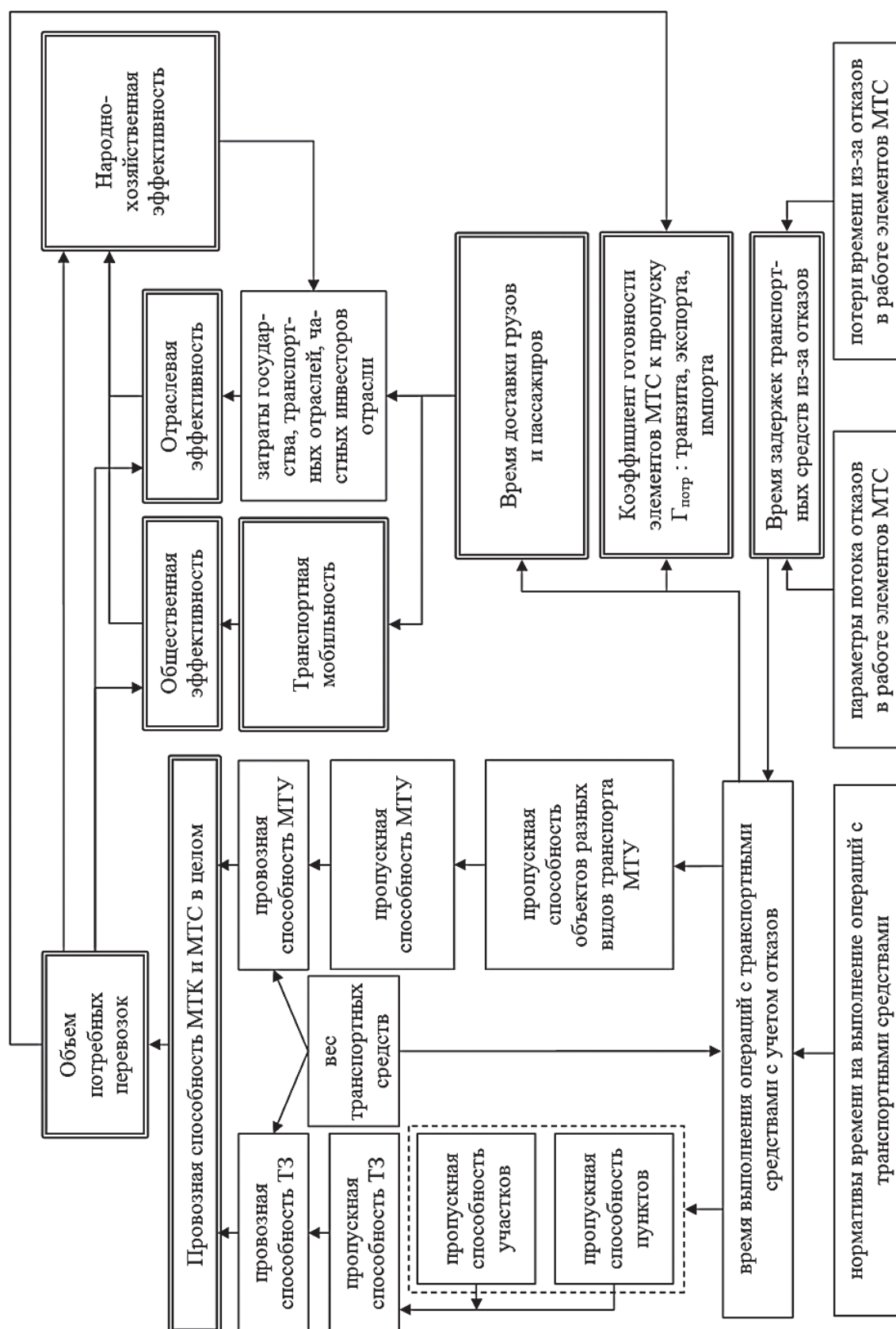


Рис. 3. Причинно-следственные связи между показателями развития МТС

3. Гончарук С. М. Методологические основы проектирования этапного развития облика и мощности мультимодальной транспортной сети : монография / С. М. Гончарук и др. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2012. – 227 с.
4. Ефанов А. Н. Оценка экономической эффективности инвестиций и инноваций на железнодорожном транспорте в современных условиях / А. Н. Ефанов // Изв. ПГУПС. – 2012. – № 2. – С. 147–156.
5. Ефанов А. Н. Оценка эффективности функционирования транспортной системы / А. Н. Ефанов, Н. К. Румянцев // Изв. ПГУПС. – 2012. – № 4. – С. 154–157.
6. Зайцев А. А. Применение механизма государственно-частного партнерства для инфраструктурных транспортных проектов / А. А. Зайцев, Е. В. Христолюбова // Изв. ПГУПС. – 2012. – № 2. – С. 156–161.
7. Липец Ю. Г. География мирового хозяйства : учеб. пособие для студентов / Ю. Г. Липец, В. А. Пуляркин, С. Б. Шлихтер. – М. : ВЛАДОС, 1999. – 400 с.
8. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. – 2-я ред. / М-во экон. РФ, М-во фин. РФ, ГК по строительству, арх. и жил. политике ; рук. авт. кол. : В. В. Коссов, В. Н. Лившиц, А. Г. Шахназаров. – М. : Экономика, 2000. – 421 с.
9. Нестерова Н. С. Мультимодальная транспортная сеть как элемент единой транспортной системы страны и её регионов / Н. С. Нестерова, С. М. Гончарук // Вестн. транспорта Поволжья. – 2016. – № 1. – С. 66–74.
10. Нечипорук М. В. К вопросу использования сбалансированной системы показателей при моделировании взаимодействия железнодорожного и морского транспорта в мультимодальном транспортном узле / М. В. Нечипорук, Вл. А. Анисимов // Транспорт Урала. – 2014. – № 3 (42). – С. 13–17.
11. Сацук Т. П. Система ключевых показателей результативности в экономике организаций железнодорожного транспорта / Т. П. Сацук // Изв. ПГУПС. – 2015. – № 1. – С. 144–148.
12. Свинцов Е. С. Регионально-транспортные исследования в современных условиях : моногр. / Е. С. Свинцов. – М. : Маршрут, 2005. – 301 с.
13. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года (утв. распоряжением правительства РФ от 22 ноября 2008 г. № 1734-р.).
14. Kaplan R. S. The Balanced Scorecard: Measures that Drive Performance / R. S. Kaplan, D. Norton // Harvard Bus. Rev. – 1992. – P. 70, N 1 (January-February). – P. 71–79.
15. Kaplan R. S. Using The Balanced Scorecard as a Strategic Management System / R. S. Kaplan, D. P. Norton // Harvard Bus. Rev. – 1996. – January-February.

References

1. Anisimov V. I. & Goncharuk S. M. *Mir transporta – Transport World*, 2005, no. 1, pp. 94–101.
2. Anisimov V. I. *Teoriya i praktika proyektirovaniya razvitiya regionalnoy seti zheleznykh dorog s uchetom izmeneniya oblika i moshchnosti stantsiy i uzlov* [Theory and Practice of Designing Development of Regional Railway Networks Taking into Account Changes in Layout and Capacity of Stations and Hubs]: Dissertation for the degree of Doctor of Engineering. Khabarovsk, DVGUPS, 2005. 380 p.
3. Goncharuk S. M. et al. *Metodologicheskiye osnovy proyektirovaniya etapnogo razvitiya oblika i moshchnosti multimodalnoy transportnoy seti: monografiya* [Methodological Foundations for Designing Stage-by-Stage Development of Layout and Capacity of Multimodal Transport Network: A Monograph]. Khabarovsk, Izdatelstvo DVGUPS, 2012. 227 p.
4. Yefanov A. N. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transport Univ.*, 2012, no. 2, pp. 147–156.
5. Yefanov A. N. & Румянцев Н. К. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transport Univ.*, 2012, no. 4, pp. 154–157.
6. Zaytsev A. A. & Khristolyubova Ye. V. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transport Univ.*, 2012, no. 2, pp. 156–161.
7. Lipets Yu. G., Pulyarkin V. A. & Shlikhter S. B. *Geografiya mirovogo khozyaystva: uchebnoye posobiye dlya studentov* [World Economy Geography: Course Guide for Students]. Moscow, VLADOS, 1999. 400 p.
8. *Metodicheskiye rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh projektov* [Methodological

Recommendations for Evaluation of Efficiency of Investment Projects]; writing team leaders V. V. Kossov, V. N. Livshits & A. G. Shakhnazarov. Moscow, Ekonomika, 2000. 421 p.

9. Nesterova N. S. & Goncharuk S. M. *Vestnik transporta Povolzhya – Volga Region Transport Herald*, 2016, no. 1, pp. 66-74.

10. Nechiporuk M. V. & Anisimov V. I. *Transport Urala – Transport of the Urals*, 2014, no. 3 (42), pp. 13-17.

11. Satsuk T. P. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transport Univ.*, 2015, no. 1, pp. 144-148.

12. Svintsov Ye. S. *Regionalno-transportnyye issledovaniya v sovremennykh usloviyakh: monografiya*

[Regional Transport Studies in Modern Conditions: A Monograph]. Moscow, Marshrut, 2005. 301 p.

13. *Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda* [Transport Strategy of the Russian Federation for the Period Through to 2030], enacted by Russian Federation government decree No. 1734-r on Nov. 22, 2008.

14. Kaplan R. S. & Norton D. The Balanced Scorecard: Measures that Drive Performance. *Harvard Bus. Rev.*, 1992, P. 70, no. 1 (January-February), pp. 71-79.

15. Kaplan R. S. & Norton D. P. Using The Balanced Scorecard as a Strategic Management System. *Harvard Bus. Rev.*, 1996, January-February.

*НЕСТЕРОВА Наталья Станиславовна – канд. техн. наук, доцент, mer-maid2@yandex.ru; АНИСИМОВ Владимир Александрович – доктор техн. наук, профессор, anisvl@mail.ru (Дальневосточный государственный университет путей сообщения).

УДК 656.259.12

А. Б. Никитин, С. Т. Болтаев**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ НА СТАНЦИОННЫХ ПЕРЕЕЗДАХ
ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ
НА ДЕЙСТВУЮЩИХ ЛИНИЯХ**

Дата поступления: 06.04.2016

Решение о публикации: 14.04.2016

Цель: Выявить способы обеспечения безопасности станционных переездов при высокоскоростном движении (ВСД) на станциях линий высокоскоростных магистралей. **Методы:** Применен метод математического моделирования параметров переездной сигнализации на основе модели движения высокоскоростного поезда (ВСП). **Результаты:** Рассмотрены вопросы особенностей оборудования переездов на станциях при вводе высокоскоростного движения на действующих линиях. Оценено обеспечение длины извещения к переездам при ВСД при регламентном извещении. Приведены характеристики особенностей реализации технологических функций электрической централизации на станциях для ВСД при установке маршрутов в режимах «скоростное движение» и «обычное движение», которые влияют на работу станционных переездов. Выявлено, что для подачи извещения на переезд о приближении ВСП требуется удлинить участок приближения или упреждающего закрытия переезда организационными мероприятиями. **Практическая значимость:** Использование микропроцессорных устройств переездной автоматики, реализующих адаптивные алгоритмы заграждения с учетом динамики и маршрутов движения ВСП по станции, предусматривает взаимную зависимость переездных устройств и систем интервального регулирования движения поездов, что позволит сократить скопление автотранспорта, пешеходов и, следовательно, уменьшит количество нарушений на станционных переездах.

Станционный переезд, длина участка извещения, время извещения, высокоскоростная магистраль, высокоскоростное движение, станция, маршрут, смешанные линии, стрелка, электрическая централизация, скоростное движение, высокоскоростной поезд.

Alexander B. Nikitin, D. Eng., professor, nikitin@crtc.spb.ru; ***Sunnatillo T. Boltaev**, postgraduate student, bstqqa@yandex.ru (Petersburg State Transport University) ENSURING SAFETY AT STATION LEVEL CROSSINGS WHEN ORGANISING HIGH-SPEED TRAFFIC ON EXISTING LINES

Objective: To identify methods for ensuring safety of station level crossings under high-speed traffic at high-speed line stations. **Methods:** Method of mathematical simulation of parameters of level crossing signalling system based on high-speed train movement simulation was applied. **Results:** Issues of specific features of equipping level crossings at stations when introducing high-speed traffic on existing lines were considered. Ensuring length of a notice track at crossings for high-speed traffic, compared to regulation notice length. Characteristics of specific features of realisation of interlocking technological functions at stations for high-speed traffic when settling out routes in “high-speed” and “regular movement” modes which affect the operation of station level crossings. It was established that to provide notice of an approaching high-speed train it is required to increase the length of approach section or of pre-emptive closure of a crossing by administrative measures. **Practical importance:** Use of microprocessor-based automatic level crossing signalling system which realise adaptive algorithms of setting up barriers whilst taking into account dynamics and routes of high-speed train around the station presumes mutual dependency of crossing lights and barriers and train separation systems, which would allow to reduce

build-up of car transport and pedestrians, and thus reduce the number of violations at station level crossings.

Station level crossing, length of the notice track, time of notification, high-speed line, fast traffic, station, route, hybrid lines, switch, interlocking, high-speed traffic, high-speed train.

Проблема железнодорожных переездов актуальна для всех промышленно развитых стран. Пересечения железнодорожных путей и автомобильных дорог на одном уровне – наиболее сложные и опасные элементы транспортной сети. Они влияют на эффективность эксплуатации автомобильного и железнодорожного транспорта в целом [8]: для них характерны непроизводительные простои автотранспорта, но самой большой проблемой остаются дорожно-транспортные происшествия на переездах, в том числе с особо тяжкими последствиями. Например, на железных дорогах Узбекистана имеется около 580 мест, где пересекаются железные и автомобильные дороги, 28% из них – охраняемые переезды. В 2014 г. на переездах Республики Узбекистан погибли 6 человек, произошло 30 столкновений поездов с автомобилями: в Наманганской области 3 (10%), в Ташкентской – 2 (6%), в Самаркандской – 4 (13%), в Ферганской – 2 (7%), в Сурхандарьинской – 6 (20%), в Кашкадарьинской – 5 (17%), в Навоийской – 1 (3%), в Андижанской – 3 (10%), в Хорезмской – 2 (7%), в Республике Каракалпакстан – 2 (7%) [5].

Особенности оборудования переездов на станциях при вводе высокоскоростного движения (ВСД) на действующих линиях

Сегодня на железных дорогах Узбекистана не в полной мере обеспечивается безопасность движения поездов на перегонных и станционных переездах, в частности, на переездах, где обращаются высокоскоростные поезда (ВСП) при смешанном движении. Например, на высокоскоростной линии Ташкент – Самарканд имеется 34 точки пересечений, вклю-

чая устройства сигнализации на пешеходных переходах. В этом случае предусмотрен ряд дополнительных требований к переездам: все неохранные переезды переоборудуются в охраняемые, дополняются автоматическими шлагбаумами, устройствами заграждения переезда (УЗП), средствами технологической связи с дежурным по станции и поездной радиосвязью [5, 7]. Кроме того, дежурный по переезду или работник, выполняющий его обязанности, должен находиться в здании переездного поста, в круг его обязанностей входит контроль и обеспечение безопасности при пропуске скоростных и высокоскоростных поездов, при этом переездный пост должен обеспечивать необходимую видимость подвижного состава. До переустройства пересечения в разных уровнях обязательным требованием является обеспечение принудительного закрытия переезда дежурным работником не менее чем за 10 мин до проследования скоростного поезда, при этом дополнительно вся проезжая часть дороги перекрывается техническими шлагбаумами, запираемыми на замок. В самих системах управления осуществляется дистанционный контроль управления переездными устройствами и открытого/закрытого состояния, включая мониторинг и диагностику переездной автоматики. Также переезд дополняется прожекторами и системой видеонаблюдения, а для оповещения пешеходов о приближении кроме световой сигнализации также включается сирена (рис. 1).

Переезды, расположенные в горловинах станций, как правило, пересекают несколько железнодорожных путей, что усложняет конструкцию дорожного покрытия в зоне переезда. Это, в свою очередь, приводит к снижению скорости автотранспорта при пересечении переезда и, следовательно, к увеличению длины

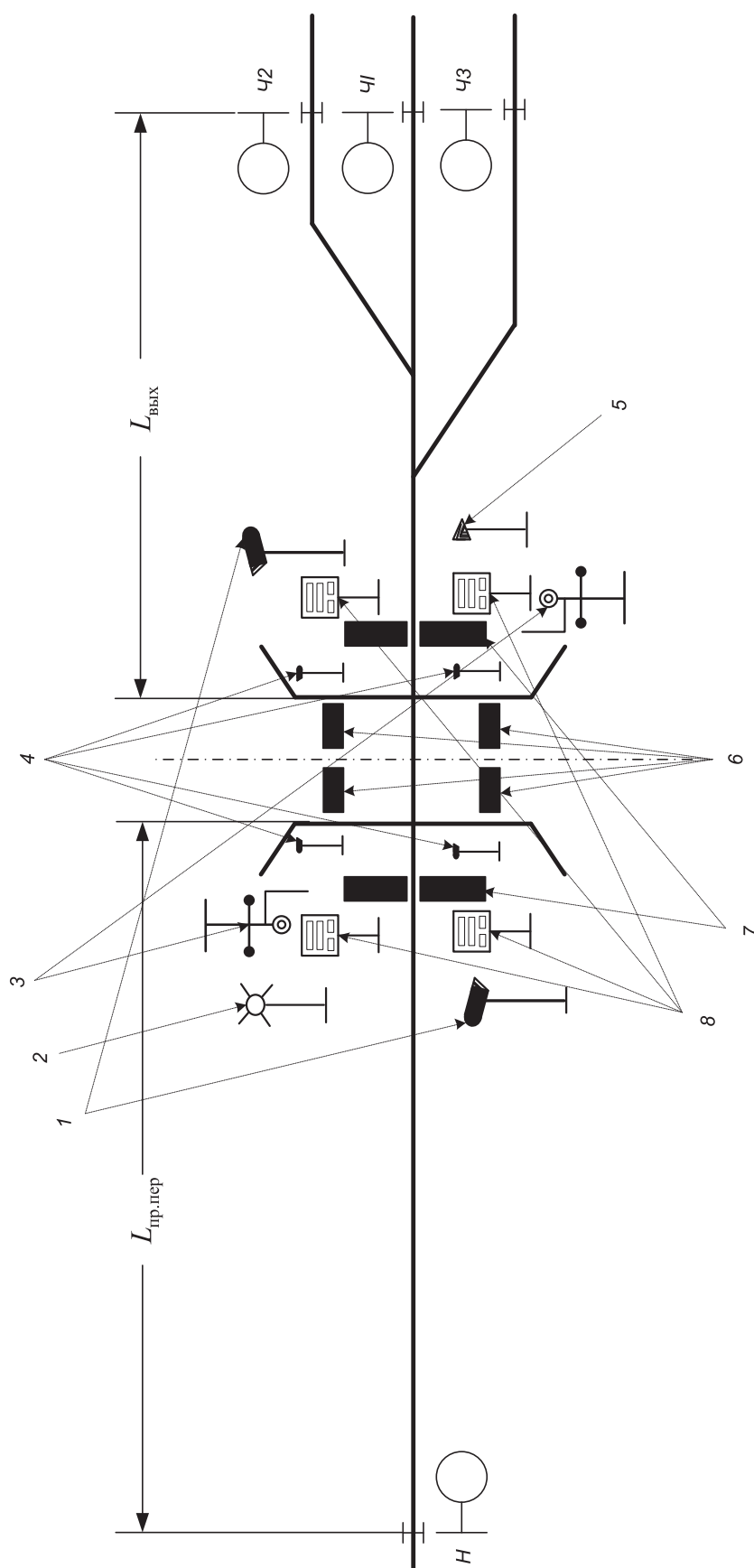


Рис. 1. Оснащение станционного переезда на линиях с ВСД:

1 – видеокамеры для записи передвижения автотранспорта, пешеходов и поездов; 2 – прожектор освещения переезда; 3 – переездные светофоры и автошлагбаумы; 4 – локомотивы, сигнализирующие об отсутствии автотранспорта; 5 – прибор звукового оповещения (сирена); 6 – УЗП; 7 – пешеходные переходы; 8 – электронные информационные табло

участка приближения и времени извещения, а значит, к непроизводительным простоям автомобильного транспорта [10]. Для определения фактической скорости поезда на переезде устанавливается переездное автоматическое контрольное устройство, которое срабатывает при проходе поезда.

На рис. 1 приведен пример оснащения техническими средствами заграждения и контроля станционного переезда.

Станции высокоскоростной магистрали (ВСМ), имеющие переезды, отличаются от обычных линий, имеющих железнодорожные переезды, алгоритмом установки маршрутов. Маршруты на станции, находящейся на линиях ВСМ, устанавливаются следующим образом:

- в режиме электрической централизации (ЭЦ) «обычное движение» занятость участка приближения к станционному переезду не всегда означает, что его необходимо закрыть, например, если приёмо-отправочный путь, являющийся участком приближения к переезду, занят стоящим составом. Поскольку поездные и маневровые передвижения по станциям маршрутизируются, извещение на закрытие переезда должно подаваться с открытием соответствующего светофора, разрешающего движение поезда через переезд. Однако в этом случае начавший движение поезд может оказаться в зоне переезда слишком рано, т.е. до его освобождения автотранспортом. Кроме того, иногда передвижение по станции производится без открытия сигналов, например, при неисправностях устройств сигнализации централизации и блокировки [10]. Участками приближения к переезду могут быть как главные, так и боковые приёмо-отправочные пути, скорости движения по которым неодинаковы, поэтому их длина для разных станционных путей может существенно различаться. Для исключения дополнительного простоя автотранспорта на таких переездах это необходимо учитывать;
- в режиме ЭЦ «скоростное движение» на станциях закрытие переезда не связано с занятостью участка приближения. Организационно предусмотрено его закрытие за 10 мин до

прихода ВСП к переезду, если скорость ВСП не превышает 250 км/ч, и за 15 мин, если скорость ВСП свыше 250 км/ч, чтобы обеспечить безопасность безостановочного пропуска ВСП через станцию (табл. 1, 2, рис. 1).

Обеспечение длины извещения к переездам при ВСД

Обеспечение длины извещения к переездам при смешанном движении зависит от скорости ВСП и времени извещения для переезда. Скорость ВСП, скоростных и других видов поездов при этом берётся по максимальному значению. Максимальные скорости движения поездов на участке в разных направлениях могут быть неодинаковыми, отдельно рассчитывается длина нечётного $L_{\text{пр.пер}}$ и чётного $L_{\text{вых}}$ участков приближения к переезду. На рис. 1 для расчёта длины извещения к переезду чётной стороны следует учитывать марки крестовин стрелочных переводов.

Максимальной скоростью при движении поездов по стрелочным переводам с отклонением принимается 50 км/ч для переводов марки 1/11, 80 км/ч – марки 1/18, 180 км/ч – марки 1/46 [6, 10]. На линиях ВСМ сквозной пропуск ВСП на станциях (разъездах) производится по главным путям без отклонения по стрелкам с предельными скоростями для переводов марки 1/11 – 250 км/ч, марки 1/46 – 400 км/ч. Если при этом в маршруте имеются стрелочные переводы разных типов, по которым происходит движение с отклонением, то для расчётов принимается большее значение скорости.

Исходя из разных скоростей приближения поезда к переезду, расчётная длина участка извещения на переезд рассчитывается следующим образом [3, 9, 12]:

- расчётная длина участка извещения к переезду при движении поезда для равномерного движения определяется по формуле

$$l^p = \frac{v_x \cdot t_c^p}{3,6}, \text{ м,}$$

ТАБЛИЦА 1. Расчётная длина участка извещения при движении со скоростью 160–250 км/ч при времени извещения 600 с

Максимальная скорость ВСП, км/ч	Длина извещения, м
160	26 666,67
170	28 333,33
180	30 000,00
190	31 666,67
200	33 333,33
210	35 000,00
220	36 666,67
230	38 333,33
240	40 000,00
250	41 666,67

ТАБЛИЦА 2. Расчётная длина участка извещения при движении со скоростью 260–400 км/ч при времени извещения 900 с

Максимальная скорость ВСП, км/ч	Длина извещения, м
260	65 000
270	67 500
280	70 000
290	72 500
300	75 000
310	77 500
320	80 000
330	82 500
340	85 000
350	87 500
360	90 000
370	92 500
380	95 000
390	97 500
400	100 000

где t_c^p – расчётное время извещения о приближении поезда к переезду, с; v_x – скорость движения поездов через станцию по главному пути v_r , либо по боковому пути v_o , либо по стрелочному переводу с отклонением $v_{стр}$, либо скорость маневровых передвижений v_m ;

• расчётная длина участка извещения к переезду при движении для равноускоренного движения определяется по формуле

$$l^p = \frac{v_n \cdot t_c^p}{3,6} + \frac{a \cdot t_c^{p^2}}{2}, \text{ м,}$$

где v_n – начальная скорость движения; a – ускорение локомотива.

В методических указаниях по расчёту параметров работы переездной сигнализации И-276-00 [9] приняты следующие допущения для упрощения расчётов по определению длины участков извещения к переезду в тех случаях, когда в пределах этого участка имеются зоны с различными максимальными скоростями движения [3, 12]:

• расчёты выполняются для короткой подвижной единицы (одиночного локомотива), движущейся с максимально допустимой скоростью (до 140 км/ч);

• при переходе подвижной единицы на участок с меньшей допустимой скоростью изменение скорости принимается мгновенным;

• при переходе подвижной единицы на участок с большей допускаемой скоростью набор скорости происходит до её большего значения по условиям равноускоренного движения с ускорением: грузовые поезда – 0,1–0,4 м/с², пассажирские поезда – 0,3–0,6 м/с², электропоезда – 0,5–0,8 м/с², высокоскоростные поезда – 0,8–1,5 м/с²;

• при наличии нескольких вариантов маршрута от светофора до переезда для расчёта длины участка извещения принимается маршрут с наименьшим временем движения до переезда, т.е. допускающим движение с большей скоростью, а при равных скоростях – маршрут меньшей протяжённости;

- при движении по стрелочным участкам с отклонением по стрелочным переводам скорость $V_{стр}$ учитывается начиная от остряка первого в маршруте противошерстного отклоняющего стрелочного перевода или предельного столбика пошерстного перевода до выхода на главный (боковой) путь или их продолжения;

- если при движении по стрелочной горловине между двумя участками со скоростью $V_{стр}$ имеется участок с большей допустимой скоростью длиной не более 200 м, то возможность увеличения скорости движения на этом участке не учитывается.

При вводе ВСД на станции, особенно когда на ней находится АПС, возникает вопрос, как обеспечить безопасное время извещения и длину участка извещения. Для этого необходимо знать скорость движения ВСП по станции. Если скорость ВСП находится в диапазоне 160–250 км/ч, то время извещения для переезда, находящегося на границе станции, составит 10 мин: именно столько времени необходимо для установки маршрута ВСП на станциях. Если же скорость ВСП 260–400 км/ч, то время установки маршрута ВСП составляет 15 мин. Следует также отметить, что при скорости движения свыше 260 км/ч время извещения увеличивается. Длина участ-

ка извещения приближения к переезду представлена на рис. 2.

При этом необходимо обеспечить кодирование рельсовых цепей и работоспособность локомотивной сигнализации во всем диапазоне допустимых скоростей ВСП при движении поезда на станциях. Анализируя кодирование рельсовых цепей, на ВСМ следует предварительно включать кодирование рельсовой цепи, когда частоты сигнального тока и тока кодов автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) не совпадают [4]. На скорости до 400 км/ч в пределах участка ВСД должна применяться система АЛС с использованием радиоканала (АЛСР). Однако оснащение подвижного состава и новое строительство цифровой радиосвязи для перехода на АЛСР требует больших капиталовложений. На действующих линиях при скорости до 250 км/ч рекомендуется использовать систему АЛС-ЕН, резервированную системой АЛСН [2].

Институт «Гипротрансигнализация» разработал типовые материалы для проектирования (ТМП) 4107030 ТМП «Переездная сигнализация с использованием аппаратуры счета осей для всех видов тяги и путевой блокировки». При этом были использованы документы, разработанные совместно специалистами ВНТЦ «Уралжелдоравтоматизация»

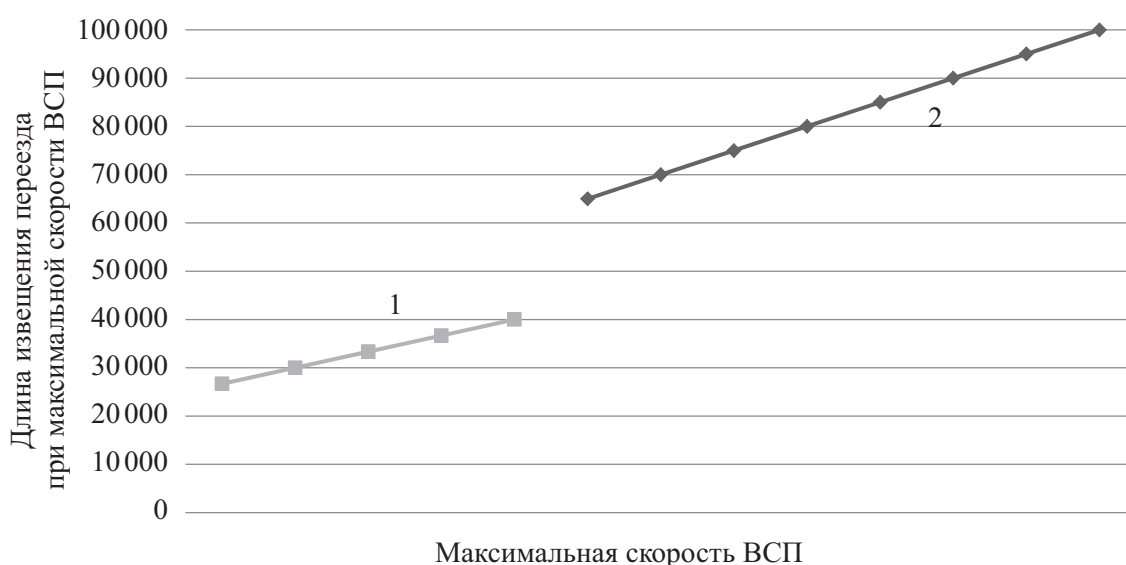


Рис. 2. Длина извещения переезда при времени извещения 600 с (1) и 900 с (2)

и УО ВНИИЖТ. Это технические решения «Система микропроцессорной переездной сигнализации без дежурного работника» (АПС МП-Н) и «Микропроцессорная автоматическая переездная сигнализация с резервированием основных элементов» (АПС–МПР). Применяемая в них сертифицированная аппаратура счета осей подвижного состава СКП «Урал» также разработана этими организациями.

В проекте используются типовые принципиальные и монтажные схемы релейных шкафов. Для всех типов переездов, для которых разработаны ТМП, в том числе для расположенных вблизи станций, где станционные пути одновременно являются и участками приближения. В связи с этим процесс проектирования упрощается и сводится к расчёту длины участков приближения, к размещению оборудования переездной сигнализации, к проектированию кабельной сети, цепей увязки со станционными устройствами, линейными цепями на участках с автоматической блокировкой [11, 13–17].

С целью повышения дисциплины водителей на переездах в настоящее время также вводится аппаратно-программный комплекс автоматической видеофиксации и идентификации государственных регистрационных знаков транспортных средств «АвтоУраган», разработанный компанией «Технологии Распознавания» (см. рис. 1). Комплекс автоматически фиксирует номера всех автомобилей, пересекающих железнодорожные пути на красный свет, и присваивает им статус нарушителей. Для автоматически формируемого постановления о нарушении сохраняется стандартный набор данных: время, дата и место фиксации, направление движения, распознанный номер, фотография автомобиля-нарушителя и отдельно – фотография его регистрационного знака. В постановление так же автоматически вносятся адресные данные владельца автомобиля-нарушителя. Видеофрагмент нарушения сохраняется и может быть предоставлен в качестве доказательства [1].

Заключение

Большинство случаев нарушений безопасности на переездах происходит из-за человеческого фактора. В целях обеспечения безопасности движения на линиях ВСД необходимы дополнительные меры (дооснащение УЗП устройствами видеонаблюдения, противотаранными барьерами и др.).

Подача извещения на переезд о приближении ВСП требует удлинения участка приближения или организационно упреждающего закрытия переезда. При этом регламентированное время заблаговременного ограждения переезда (закрытие за 10 мин до прихода ВСП к переезду, если его скорость не превышает 250 км/ч, и за 15 мин, если его скорость выше 250 км/ч) обеспечивает безопасность движения через переезд, но при этом возрастают простои автотранспорта, прежде всего, при движении ВСП с отклонениями по стрелкам. Целесообразно использовать микропроцессорные устройства переездной автоматики, реализующие адаптивные алгоритмы заграждения с учетом динамики и маршрутов движения ВСП по станции, а также предусматривать взаимную зависимость переездных устройств и систем интервального регулирования движения поездов.

Библиографический список

1. «АвтоУраган» снижает количество ДТП на железнодорожных переездах // Наука и транспорт. – 2013. – № 2 (6). – С. 37.
2. Болтаев С. Т. Особенности кодирования автоматической локомотивной сигнализации при вводе смешанного высокоскоростного движения на станциях / С. Т. Болтаев // V междунар. науч.-практич. конф. «Интеллектуальные системы на транспорте» (ИнтеллектТранс-2015). – СПб., 2015. – С. 373–379.
3. Василенко М. Н. Автоматизация расчета параметров перегонной переездной сигнализации / М. Н. Василенко, Т. А. Тележенко, С. И. Валиев // Изв. ПГУПС. – 2010. – Вып. 3. – С. 53–61.

4. Воронин В. А. И снова о сбоях АЛСН на станционных путях / В. А. Воронин, С. В. Шеметов // Автоматика, связь, информатика. – 2010. – № 3. – С. 20–21.

5. За прошедший год случилось 30 столкновений поездов с автомобилями. – URL : <http://uz24.uz/society/za-proshedshiy-god-sluchilosy-30-stolknoveniy-poezdov-s-avtomobilyami> (дата обращения 02.06.2015).

6. Киселёв И. П. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс : учеб. пособие : В 2 т. / И. П. Киселёв и др. ; под ред. И. П. Киселёва. – М. : УМЦ по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. – Т. 1. – 312 с.

7. Концепция развития скоростного и высокоскоростного движения пассажирских поездов на железных дорогах Узбекистана / ОАО «Боштранслайха». – Ташкент, 2010. – 89 с.

8. Поздняков В. А. Безопасность на железнодорожных переездах / В. А. Поздняков, Ю. А. Тюпкин. – URL : <http://www.css-rzd.ru/zdm/03-2000/00039.htm>.

9. Расчёт параметров работы переездной сигнализации : методические указания по проектированию устройств автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте И-276-00. – М. : ГТСС, 2000. – 36 с.

10. Сапожников Вл. В. Эксплуатационные основы автоматики и телемеханики / Вл. В. Сапожников. – М. : Транспорт, 2006. – 247 с.

11. Соловьев А. Л. Микропроцессорная переездная сигнализация с аппаратурой счета осей / А. Л. Соловьев, В. А. Чеблаков, А. Ф. Петров // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – № 6. – С. 2–5.

12. Тележенко Т. А. Особенности расчета параметров станционных переездов / Т. А. Тележенко // Автоматика, связь, информатика. – 2006. – № 6. – С. 27–29; № 8. – С. 20–23.

13. Технические решения система микропроцессорной автоматической переездной сигнализации для переездов без дежурного работника (АПС МН-Н) УЖДА-04-02 ТР. – Екатеринбург, 2005. – 17 с.

14. Чеблаков В. А. Новые системы переездной сигнализации / В. А. Чеблаков, В. А. Шевцов // Автоматика, связь, информатика. – 2014. – № 14. – С. 6–8.

15. Щиголов С. А. Микропроцессорная система автоматической переездной сигнализации АПС-МП-М / С. А. Щиголов, А. В. Кондакова // РСП-Эксперт. – 2014. – № 2. – С. 22–23.

16. Щиголов С. А. Проблемам транспорта комплексное решение / С. А. Щиголов // Евразия Вести. – 2010. – № 12. – С. 20.

17. Щиголов С. А. Путевые датчики для устройств железнодорожной автоматики / С. А. Щиголов, А. В. Кондакова, Д. Е. Соболев // Автоматика, связь, информатика. – 2013. – № 11. – С. 23–24.

References

1. “Avtouragan” snizhayet kolichestvo DTP na zheleznodorozhnykh pereyezdakh [“Avtourgan” Reduces the Number of Traffic Accidents at Rail Crossings]. *Nauka i transport – Sci. and Transport*, 2013, no. 2 (6), p. 37.

2. Boltayev S. T. Osobennosti kodirovaniya avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii pri vvode smeshannogo vysokoskorostnogo dvizheniya na stantsiyakh [Specific Features of Encoding Automated Locomotive Signalling System when Introducing Hybrid High-Speed Traffic at Stations]. *V mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya “Intellectualnyye sistemy na transporte” – IntellectTrans-2015 (5th Int. Sci. and Practical Conf. “Intellectual Systems in Transport” – IntellectTrans-2015)*. St. Petersburg, 2015. Pp. 373–379.

3. Vasilenko M. N., Telezhenko T. A. & Valiyev S. I. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2010, Is. 3, pp. 53–61.

4. Voronin V. A. & Shemetov S. V. *Avtomatika, svyaz, informatika – Automatics, Communications, Informatics*, 2010, no. 3, pp. 20–21.

5. Za proshedshiy god sluchilov 30 stolknoveniy poyezdov s avtomobilyami [In the Last Year, 30 Train-Car Collisions Occurred], available at: <http://uz24.uz/society/za-proshedshiy-god-sluchilosy-30-stolknoveniy-poezdov-s-avtomobilyami>.

6. Kiselev I. P. et al. *Vysokoskorostnoy zheleznyy transport. Obshchiy kurs. Uchebnoye posobiye* [High-speed Rail Transport. General Course. Study Guide]. Vols. 1–2. Ed. I. P. Kiselev. Moscow, UMTs po obra-

zovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2014. Vol. 1. 312 p.

7. Kontseptsiya razvitiya skorostnogo i vysokoskorostnogo dvizheniya passazhirskikh poyezdov na zheleznykh dorogakh Uzbekistana [Concept for Development of Fast and High-Speed Passenger Train Traffic in Uzbekistan Railways], OAO Boshtransloyiha. Tashkent, 2010. 89 p.

8. Pozdnyakov V.A. & Tyupkin Yu.A. Bezopasnost na zheleznodorozhnykh pereydzakh [Safety at Level Railway Crossings], available at: <http://www.css-rzd.ru/zdm/03-2000/00039.htm>.

9. Raschet parametrov raboty pereydznoy signalizatsii: metodicheskiye ukazaniya po proyektirovaniyu ustroystv avtomatiki, telemekhaniki i svyazi na zheleznodorozhnom transporte I-276-00 [Calculation of Parameters of Level Crossing Signalling System: Best Practice in Designing Automatics, Telemechanics and Communication Devices on Railway Transport I-276-00]. Moscow, GTSS, 2000. 36 p.

10. Sapozhnikov V.I. V. Eksploatatsionnyye osnovy avtomatiki i telemekhaniki [Operational Basics of Automatics and Telemechanics]. Moscow, Transport, 2006. 247 p.

11. Solovyev A.L., Cheblakov V.A. & Petrov A.F. *Avtomatika, svyaz, informatika – Automatics, Communications, Informatics*, 2008, no. 6, pp. 2-5.

12. Telezhenko T.A. *Avtomatika, svyaz, informatika – Automatics, Communications, Informatics*, 2006, no. 6, pp. 27-29; no. 8, pp. 20-23.

13. Tekhnicheskiye resheniya: sistema mikroprocessornoy avtomaticheskoy pereydznoy signalizatsii dlya pereyezdov bez dezhurnogo rabotnika (APS MN-N) UZhDA-04-02 TR [Technical Solutions: Microprocessor-based Automatic Level Crossing System for Level Crossings Without a Duty Worker (APS MN-N) UZhDA-04-02 TR. Yekaterinburg, 2005. 17 p.

14. Cheblakov V.A. & Shevtsov V.A. *Avtomatika, svyaz, informatika – Automatics, Communications, Informatics*, 2014, no. 14, pp. 6-8.

15. Shchigolev S.A. & Kondakova A.V. *RSP-Expert – RSP-Expert*, 2014, no. 2, pp. 22-23.

16. Shchigolev S.A. *Yevraziya Vesti – Eurasian News*, 2010, no. 12, p. 20.

17. Shchigolev S.A., Kondakova A.V. & Sobol D.Ye. *Avtomatika, svyaz, informatika – Automatics, Communications, Informatics*, 2013, no. 11, pp. 23-24.

НИКИТИН Александр Борисович – доктор техн. наук, профессор, nikitin@crtc.spb.ru; *БОЛТАЕВ Суннатилло Туймуродович – аспирант, bstqqa@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 656.259.12

А. Б. Никитин, С. Т. Болтаев, А. М. Глыбовский**ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ
ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОЕЗДОВ НА ЛИНИЯХ
СМЕШАННОГО ДВИЖЕНИЯ**

Дата поступления: 06.04.2016

Решение о публикации: 14.04.2016

Цель: Обосновать параметры реализации функций электрической централизации (ЭЦ) при высокоскоростном движении (ВСД) на станциях линий смешанного движения. **Методы:** Применялось математическое моделирование параметров движения высокоскоростного поезда по инфраструктуре отдельных пунктов. **Результаты:** Рассмотрены вопросы организации движения на высокоскоростной магистрали (ВСМ), в том числе на станциях ВСМ при смешанном движении. Приведён анализ особенностей организации высокоскоростного движения поездов на высокоскоростных линиях, рассмотрен технологический процесс станций на линиях смешанного движения и критические по времени функции ЭЦ: установка и размыкание маршрутов высокоскоростных поездов на станциях ВСД при смешанном движении поездов. Также проанализированы особенности реализации технологических функций и алгоритмов для ВСД при установке и разделке маршрутов, включая искусственное размыкание и отмену маршрутов в режиме «скоростное движение». Установлено, что применение регламентного временного извещения ограничивает движение поездов на станциях и парализует все передвижения на станциях и перегонах до и после прохода высокоскоростного поезда. **Практическая значимость:** Обоснованное увеличение временных параметров технологических функций системы ЭЦ на железнодорожных станциях смешанных линий ВСМ позволит обезопасить высокоскоростное движение на смешанных линиях. При вводе ВСД требуется модернизировать систему автоматики и телемеханики и предусмотреть режим «скоростное движение», который, изменяя временные параметры функций систем ЭЦ, обеспечивает требуемые показатели безопасности и работоспособность алгоритмов, компенсирует рост скоростей движения дополнительными временными задержками в системе управления.

Высокоскоростная магистраль, высокоскоростное движение, станция, маршрут, смешанные линии, стрелка, искусственное размыкание, отмена маршрута, рельсовые цепи, электрическая централизация, дежурный по станции, скоростное движение.

Alexander B. Nikitin, D. Eng., professor, nikitin@crtc.spb.ru; ***Sunnatillo T. Boltayev**, postgraduate student, bstqqa@yandex.ru; **Artem M. Glybovskiy**, student, a.glybovsky@gmail.com (Petersburg State Transport University) SPECIFIC FEATURES OF REALISATION OF INTERLOCKING FUNCTIONS FOR HIGH-SPEED TRAINS ON HYBRID LINES

Objective: To provide rationalisation for parameters of interlocking functions for high-speed traffic on hybrid line stations. **Methods:** Mathematical simulation of parameters of high-speed train movement across interstation infrastructure was applied. **Results:** Issues of organising traffic on high-speed line were considered, including at high-speed line stations in case of hybrid movement. Analysis of specific features of organisation of high-speed train traffic on high-speed lines is provided, technological process of stations on hybrid traffic is considered, as are time-critical interlocking functions: setting and locking out of high-speed train routes at high-speed traffic stations under hybrid train traffic. Also analysed were specific features of realisation of technological functions and algorithms for high-speed traffic during setting and

point setting of routes, including emergency route realisation and route cancellation in “high-speed” mode. It was established that use of regulation notification time limits train movement at stations and paralyses any movement at stations and running lines before and after a high-speed train passes. **Practical importance:** Justified increasing of temporal parameters of technological functions of interlocking system at hybrid-line railway stations of high-speed lines would allow to secure high-speed traffic on hybrid lines. When introducing high-speed traffic, it is required to modernise the automatics and telemechanics system, and to envisage “high-speed” mode, which, whilst altering temporal parameters of interlocking systems’ functions, ensures required safety parameters and working efficiency of algorithms, and compensates for an increase in movement speed with additional temporary delays in the control system.

High-speed line, high-speed traffic, station, route, hybrid lines, switch, emergency route realise, route cancel, track circuits, interlocking, station duty officer, high-speed traffic.

Высокоскоростное движение (ВСД) железных дорог мира основывается на самых передовых технологиях различных отраслей: транспортного строительства, машиностроения, силовой электроники, компьютерных технологий, связи. Практический опыт реализации ВСД определяет технический прогресс и направления перевооружения железных дорог. Реализация ВСД требует значительных капитальных вложений, поэтому начало таким проектам было положено в технически и технологически развитых странах. Однако потребность в скоростных и высокоскоростных перевозках предопределила актуальность исследований в части возможности использования для этого действующей инфраструктуры железных дорог других стран [2, 8]. Ее модернизация позволяет минимизировать затраты в проекты ВСД, но при этом требуется обоснование новых технических решений. В задачах систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) подлежат изменению алгоритмы функционирования, которые вследствие роста скоростей могут вызвать нарушения корректной работы устройств СЖАТ, а в ряде случаев – и условий безопасного движения поездов.

Особенности организации перевозок на линиях высокоскоростного движения

Для ВСД требуется обеспечить соответствие более высоким требованиям к подвижному составу и инфраструктуре железных дорог, связанных с влиянием роста скоростей. Кроме

того, эффективность, безопасность и качество эксплуатации высокоскоростных магистралей (ВСМ), а также затраты на эксплуатацию зависят от совместимости подвижного состава и инфраструктуры, поэтому данному параметру уделяется особое внимание на железных дорогах Японии, Китая, Франции, Германии, Италии и Испании.

Международный союз железных дорог выделяет четыре типа систем высокоскоростного сообщения [10, 16] (рис. 1):

- **первый тип** – классическая система высокоскоростного сообщения, к которой относятся только высокоскоростные поезда (ВСП) и соответствующие им выделенные линии. Именно так устроена японская система «Синкансэн». Японская высокоскоростная железная дорога полностью изолирована от обычной сети железных дорог. Протяженность ВСМ Японии составляет 2664 км;

- **второй тип** – сеть высокоскоростных линий, ВСП которых могут эксплуатироваться и на обычных линиях. В качестве примера можно привести Францию, где ВСП эксплуатируются также на обычной сети железных дорог. Особенности сети ВСМ Франции:

- доля ВСМ в общей сети железных дорог составляет около 6 % (1881 км);

- ВСД организовано на специальных высокоскоростных линиях, максимальная скорость до 320 км/ч;

- сеть ВСМ строго моноцентрична и отделена от обычной железнодорожной сети;

- ВСМ соединена с сетями ВСМ шести стран;

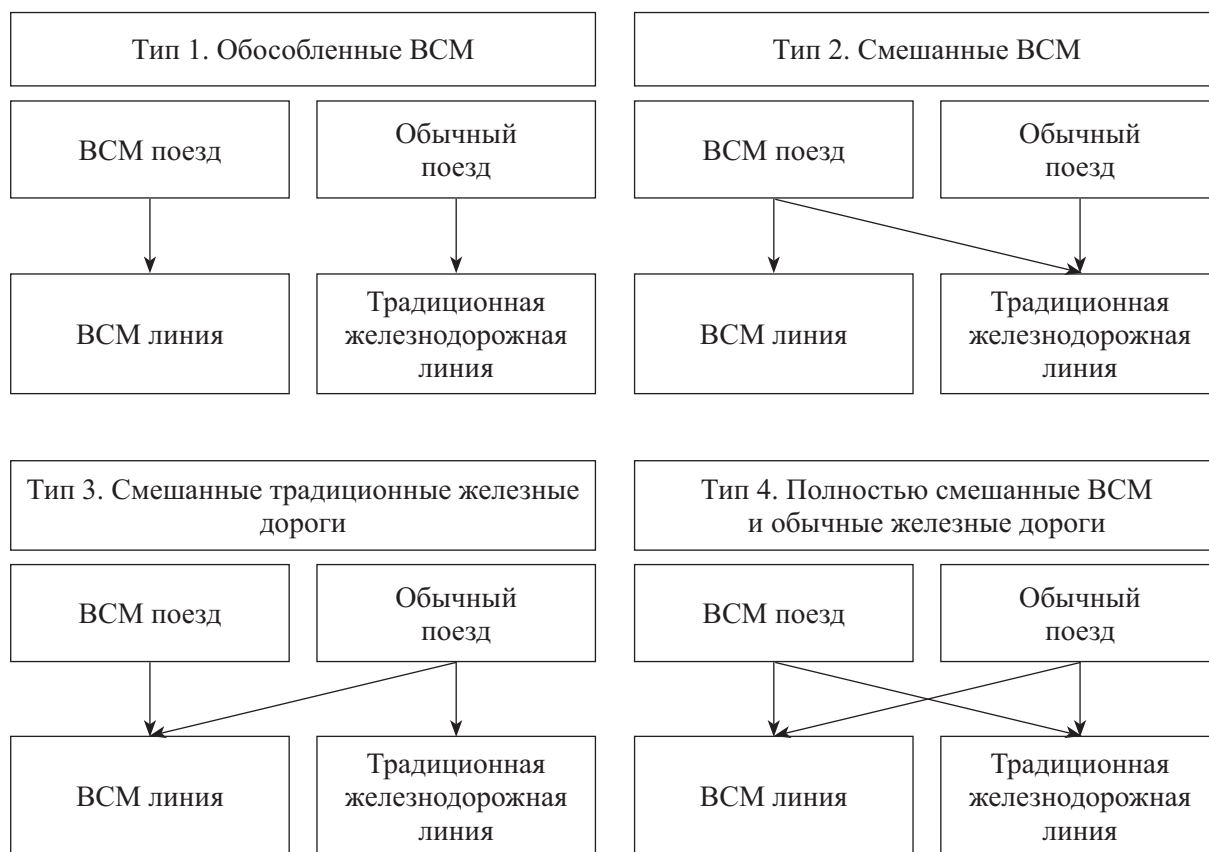


Рис. 1. Классификация линий высокоскоростного движения

– на некоторых участках обычной сети (160 км/ч) ВСП TGV разрешается ехать с максимальной скоростью 220 км/ч;

• **третий тип** – на высокоскоростных линиях эксплуатируются не только ВСП, скорость которых более 250 км/ч, но и обычные поезда, оборудованные системой перехода с одной ширины колеи на другую. Из-за более низких скоростей движения обычных поездов пропускная способность высокоскоростных линий снижается. С другой стороны, ВСП не эксплуатируются на обычных линиях. По такой технологии эксплуатируется система высокоскоростного сообщения Испании – AVE. Особенности сети ВСП Испании:

- максимальная скорость поездов 310 км/ч;
- рельсовая система ВСП нормальной колеи 1435 мм отделена от общей сети ж. д. с колеи 1668 мм;
- обычные поезда могут ходить по высокоскоростным линиям;

– испанская сеть ВСП соединена с ВСП-сетью Франции, Португалии и Германии.

• **четвертый тип** – на высокоскоростных линиях могут эксплуатироваться в том числе и обычные поезда, а на обычных линиях – ВСП. Примеры: железнодорожные системы Италии, Китая и Германии. ВСП Германии многоцентрично и хорошо интегрировано в существующую сеть (смешанный трафик). Ее особенности:

- сеть ВСП составляет 2500 км;
- доля в общем объеме перевозок германской железной дороги около 7,5 %;
- 3850 км железных дорог сети эксплуатируются как смешанные транспортные магистрали (включая грузовые перевозки);
- ВСП соединена с сетями ВСП шести других стран;
- поезда ICE курсируют на линиях ВСП со скоростью 250–300 км/ч, на модернизированных линиях 200–230 км/ч, на обычных линиях – со скоростью до 160 км/ч.

Технологический процесс станций на линиях смешанного высокоскоростного движения

Основой графика движения поездов являются станционные и межпоездные интервалы [15]. Они должны устанавливаться исходя из обеспечения требований безопасности движения, недопущения остановок поездов у входных светофоров раздельных пунктов или замедления хода, полного и рационального использования технических средств, применения прогрессивной технологии и передового опыта работы.

Величина станционных и межпоездных интервалов зависит от целого ряда факторов: технического оснащения прилегающих участков; плана и профиля подходов, главных путей, приемо-отправочных путей и парков раздельных пунктов; серии поездных локомотивов, обслуживающих пассажирские и грузовые поезда, категории поездов, их веса, длины и скорости движения, ограничения скоростей движения поездов по станциям и перегонам; типов стрелочных переводов; взаимного расположения приемо-отправочных путей и парков, размещения светофоров; длины станционных путей и порядка пропуска поездов через раздельные пункты (с остановкой или безостановочно).

На двухпутных железнодорожных линиях при организации движения высокоскоростных пассажирских поездов необходимо рассчитывать следующие станционные и межпоездные интервалы: попутного отправления (проследования) поездов; попутного прибытия (проследования) поездов; между поездами на перегонах; одновременного отправления и встречного прибытия поездов при враждебных маршрутах; одновременного прибытия и встречного отправления поездов при враждебных маршрутах; одновременного отправления и попутного прибытия поездов.

При сквозном пропуске по станции скоростные пассажирские поезда должны следовать по главным путям двухпутных линий. Действующим регламентом линии ВСД

Санкт-Петербург – Москва предписано, что все операции, связанные с приготовлением маршрута для пропуска скоростного пассажирского поезда, должны быть закончены не менее чем за 10 мин до его проследования.

Большая скорость движения пассажирских поездов наряду с модернизацией пути, контактной сети и устройств сигнализации централизации и блокировки (СЦБ) обуславливают новые требования к подвижному составу, в том числе к типам тормозов.

При увеличении скорости движения поездов значительно изменяются условия и характер деятельности персонала, непосредственно связанного с движением поездов. Так, при скорости движения поезда 100 км/ч (а эта скорость в начале XX в. вполне соответствовала высокой) поезд за одну секунду проходит 27 м. Машинист, увидевший на пути человека или препятствие на расстоянии около 1000 м при длине тормозного пути 800–1000 м, уже в те годы имел в распоряжении не более 2–3 секунд на принятие решения об экстренном торможении. При скорости 250 км/ч поезд проходит в секунду 69,5 м, а при 300 км/ч – 83 м. Зависимость тормозного пути высокоскоростного поезда ICE от его скорости приведена в таблице. Например, на скорости 300 км/ч длина тормозного пути при экстренном торможении составляет около 4000 м [6, 17].

Длина тормозного пути
высокоскоростного поезда

Скорость, км/ч	Длина тормозного пути при служебном торможении, м
200	1900
250	3100
300	4700
330	5800
350	6700

Для сокращения времени проследования ВСП станций при сквозном пропуске по глав-

ным путям необходимо обеспечить возможность движения по стрелочным переводам без снижения скорости. Для этого применяют специальные стрелочные переводы с марками крестовины 1/11, которые обеспечивают возможность движения по прямому пути со скоростью 250 км/ч, в то время как эксплуатируемые стрелочные переводы – всего 200 км/ч. Помимо этого применяют стрелочные электроприводы ВСП-220Н с внешним замыкателем ВЗ-7. Для перевода устанавливают несколько приводов, распределенных по длине, для надежной фиксации пары острья – рамный рельс, а также для равномерного распределения переводных усилий.

Таким образом, станции должны обеспечивать: пропуск поездов по главным путям со скоростями не ниже установленных на прилегающих перегонах; возможность приёма (в случае технической необходимости) ВСП со снижением скорости движения на приёмоотправочные пути; возможность перехода ВСП со снижением скорости движения на другой главный путь для обеспечения путевых работ («диспетчерские съезды»); временный отстой железнодорожной техники, обслуживающей путь, контактную сеть и другие сооружения и устройства участка ВСД; звуковое и световое оповещение работающих на путях и пассажиров на станциях и остановочных пунктах о подходе ВСП за 5 мин до его проследования; прием, отправление и другие операции с обычными пассажирскими и грузовыми поездами в соответствии с установленной технологией работы станции.

Схемы путевого развития отдельных пунктов должны исключать возможность самопроизвольного выхода подвижного состава на главные пути, для чего следует обеспечить наличие охранных стрелок и предохранительных тупиков. В исключительных случаях по согласованию с администрацией железной дороги допускается использование сбрасывающих башмаков или стрелок [2].

В связи с организацией ВСД на станциях, которые обеспечивали движение обычных поездов различных категорий, потребуется

реконструкция устройств СЦБ по следующим направлениям:

- замена имеющихся рельсовых цепей (РЦ) на РЦ повышенной помехозащищенности (в качестве помехозащищенных РЦ предлагается использовать автоблокировку с тональными РЦ и централизованным размещением аппаратуры тональной частоты 420, 480, 520, 720 и 780 Гц с модуляцией частотами 8 или 12 Гц);
- изменение схем увязки с автоблокировкой в связи с организацией двусторонней автоблокировки;
- изменение путевого развития и длины приемо-отправочных путей, вызывающее, как правило, изменение числа маршрутов, стрелок и РЦ; сигнализации, а также выполнение иных работ по приведению инфраструктуры участка в состояние, позволяющее организовать скоростное движение поездов по участку;
- оборудование стрелок, примыкающих к главным путям, стрелочными переводами с непрерывной поверхностью катания и как следствие – изменение схем управления этими стрелками (распаривание съездов) и добавление путевых элементов РЦ на ответвления;
- увязка с устройствами диспетчерского контроля;
- усиление замыкания стрелок;
- удлинение участков приближения для обеспечения безопасной работы алгоритмов СЖАТ на переездах, подходах к станции и на самой станции;
- переустройство длины РЦ для обеспечения устойчивого кодирования;
- оборудование станций системой оповещения монтеров пути о приближении поезда и информирования пассажиров;
- изменение норм времени отмены и искусственного размыкания (ИР) маршрутов или включение дополнительных блокировок.

Установка маршрутов высокоскоростным поездам на станциях линий смешанного движения

При вводе ВСД необходимо расширить зону контроля за проследованием ВСП по станциям и перегонам:

- дежурный по станции (ДСП) контролирует освобождение станции и перегона [1, 3–5, 7, 9, 11–14] высокоскоростным поездом визуально при помощи индикации на пульте управления (свободность или занятость секций горловин станции и участков приближения/удаления);

- поездной диспетчер (ДНЦ) контролирует движение ВСП визуально при помощи изображения на мониторе автоматизированного рабочего места ДНЦ (свободность или занятость путей, участков пути, стрелочно-путевых секций горловин станции, а также участков приближения/удаления).

Как показано ранее, совмещение на действующей линии движения ВСП требует применения новых алгоритмов и увеличения временных параметров реализации функций СЖАТ. Последнее неизбежно скажется на пропускной и перерабатывающей способности участка при движении обычных поездов, поэтому для организации специальных условий работы устройств при движении ВСП необходимо предусматривать режим «скоростное движение» (СД). Для этого аппарат управления электрической централизации необходимо дополнить:

- установить кнопки «скоростное движение» и «отмена скоростного движения» по каждому из главных путей;

- предусмотреть индикацию на табло задания режима СД для соответствующих главных путей;

- исключить перевод стрелок, входящих в маршрут сквозного пропуска скоростного поезда (ходовых и охранных), до проследования поездом станции;

- осуществить окончательное замыкание маршрутов следования скоростного поезда не менее чем за два блок-участка;

- исключить возможности отмены маршрутов скоростного поезда или его искусственной разделки (ИР) без предварительной отмены режима СД.

Режим СД должен задаваться только при установке маршрута сквозного пропуска по соответствующему главному пути, причем

осигнализация маршрутов по главным путям не изменяется с введением режима СД. Приведен алгоритм задания режима высокоскоростного движения (рис. 2).

Схемы увязки должны исключать состязания и обеспечивать работоспособность станционных и перегонных устройств при скоростях свыше 160 км/ч, а именно:

- для маршрута приема – кодирование участка приближения в зависимости от сигнальных показаний входного светофора; предварительное и окончательное замыкание маршрута приема; индикация на табло о приближении поездов к станции посредством контроля свободности и занятости первого и второго участков приближения (при высоких скоростях РЦ этих участков объединяются для исключения сбоев кодирования автоматической локомотивной сигнализации (АЛС)); управление сигнальными показаниями предвходного светофора;

- для маршрута отправления – управление сигнальными показаниями выходных светофоров в зависимости от свободности первого и второго участков удаления, при высоких скоростях РЦ этих участков объединяются для исключения сбоев кодирования АЛС; индикация на табло участков удаления поездов; контроль свободности и занятости первого и второго участков удаления; усиление алгоритма размыкания секций маршрутов.

При вводе ВСД также изменяется схема управления стрелками. Она должна иметь возможности управления несколькими приводами с обеспечением контроля прижатого и отжатого положений острых и сердечников крестовин с непрерывной поверхностью катания, контроля наличия фаз и токов нагрузки, контроля времени перевода острых и сердечников крестовин с непрерывной поверхностью катания.

Размыкание маршрутов на станциях ВСД при смешанном движении поездов

Отмена маршрутов

ДСП отменяет установленный маршрут двумя действиями [1, 3–5, 7, 9, 11–14]:

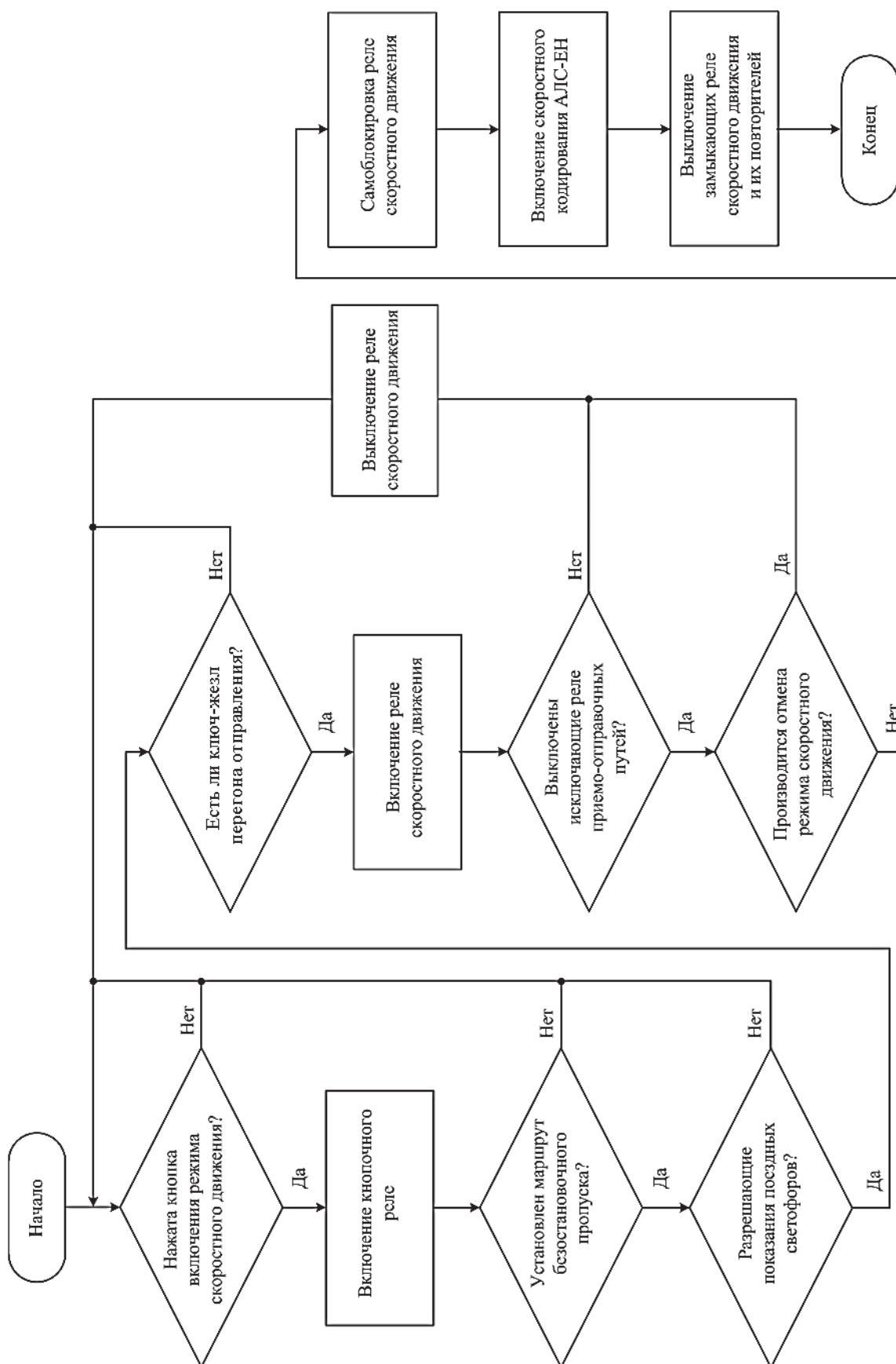


Рис. 2. Алгоритм задания режима высокоскоростного движения

1) нажатием групповой кнопки «отмена маршрута» (ОТ);

2) нажатием кнопки сигнала, ограждающего отменяемый маршрут.

После этого перекрывается светофор и отменяется маршрут с выдержкой времени:

- 6 с при свободном участке приближения;
- 6 мин при занятом участке приближения.

Для исключения случайной отмены маршрута на станциях ВСМ дополнительно кнопкой на пульте ДСП необходимо отменить режим СД.

Реле разделки (Р) совместно со схемами реле ОТ после выдержки времени обеспечивают автоматическую отмену маршрутов.

Для маршрутов ВСМ режим СД изменяет продолжительность выдержки времени при занятом участке приближения. Например, при отмене Р стрелочно-путевых секций Р всех секций, входящих в маршрут, соединяются последовательно, через 6 мин после выдержки времени в цепь Р подается импульс тока, что приводит к включению реле Р, а затем замыкающих реле З в стрелочных и бесстрелочных секциях маршрута ВСМ.

Искусственная разделка

Автоматическое размыкание маршрута поездом или его отмена происходят только при исправном состоянии устройств системы электрической централизации (ЭЦ) [1, 3–5, 7, 9, 11–14]. В случае отказа (например, рельсовой цепи, системы счета осей, при неисправностях в контрольной цепи схемы управления стрелкой) размыкание маршрута или его части выполняется с помощью ИР. Этот вид размыкания относится к вспомогательным режимам управления, ДСП выполняет его под личную ответственность. Режим ИР на станциях ВСД производится следующим путём:

- ДСП последовательно нажимает кнопки ИР всех неразомкнувшихся секций маршрутов ВСМ;
- ДСП нажимает групповую кнопку ИР;

- через 6 мин выдержки размыкаются все неразомкнувшиеся секции маршрута ВСП.

Автоматическое размыкание маршрутов поездом в режиме «скоростное движение»

Работу данного режима рассмотрим на примере системы ЭЦ-И одной из станций линии Санкт-Петербург – Москва.

Вначале задаются поездные маршруты по главным путям сквозного пропуска. Режим СД включается нажатием четной/нечетной кнопки на пульте по направлению движения соответствующего поезда, например, четного по главному пути ИПП. Нажатие кнопки СД включает кнопочное реле ЗЧССК, после чего начинает мигать зеленая лампа на пульте-табло (рис. 3), сигнализирующая об активном режиме.

Замыкание фронтальных контактов реле ЗЧССК приводит к включению реле ЗЧСС и его повторителя (рис. 4) с проверкой следующих условий:

- установка маршрутов сквозного пропуска без отклонения по главным путям;
- открытие всех светофоров на разрешающее поездное показание и отсутствие для них режима автодействия по маршрутам сквозного пропуска;
- наличие ключа-железа для перегона отправления;
- отсутствие отмены маршрута.

Данное реле становится на самоблокировку при выключении З и в отсутствие команды отмены режима СД. После задания РСД включается скоростное кодирование АЛС-ЕН.

Размыкание тылового контакта реле ЗЧСС разрывает цепь питания замыкающего реле ЗЧССЗ, вследствие чего выключается реле ЗССЗ и его повторитель ЗССЗ1 (рис. 5).

Маршрут СД при проследовании поезда должен размыкаться после освобождения всего маршрута и выхода поезда на перегон. При проследовании поезда по маршрутам СД в освободившиеся за «хвостом» поезда секции должны фиксироваться первые фазы размыка-

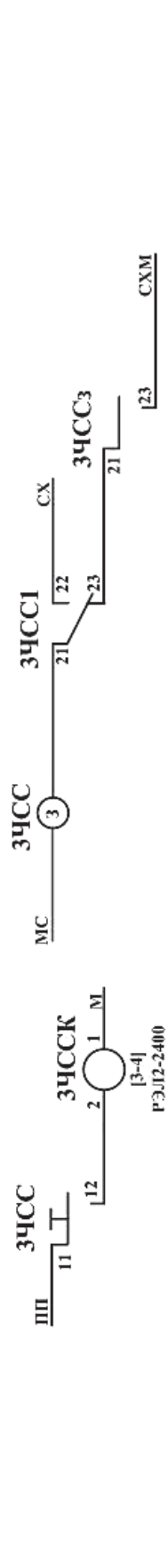


Рис. 3. Схема включения кнопочного реле и индикации режима скоростного движения

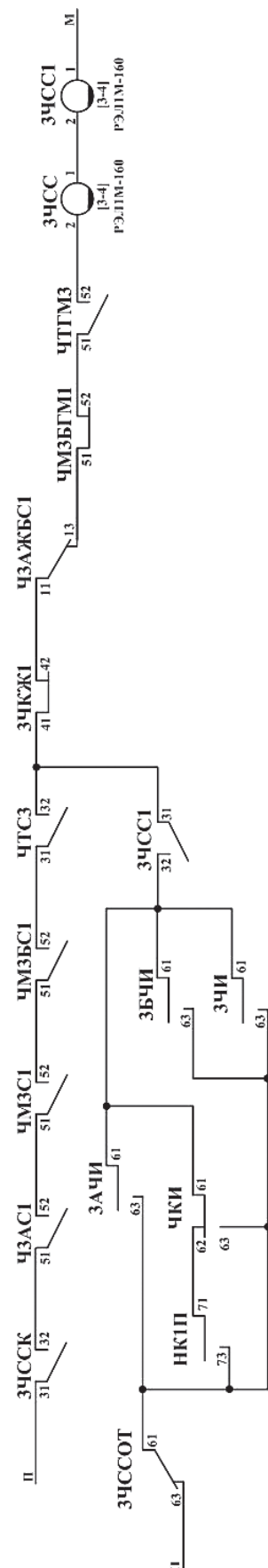


Рис. 4. Схема включения реле 3ЧСС для третьего главного пути

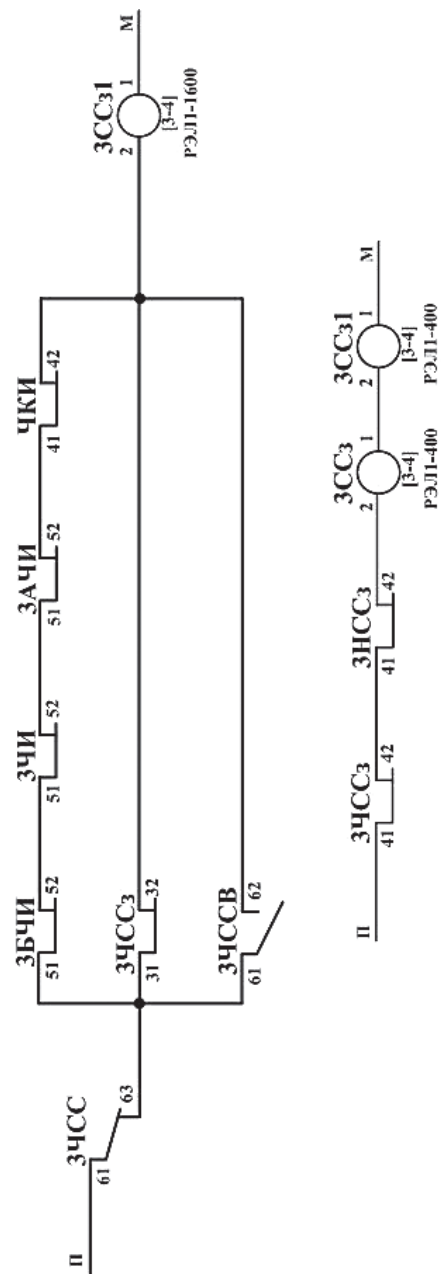


Рис. 5. Схема замыкающих реле и их повторителей

ния (включение 1-х маршрутных реле секций маршрута). При фиксации освобождения последней секции в последнем маршруте СД, занятия первой РЦ первого участка удаления с проверкой свободности всех секций в маршрутах СД и наличия в них 1-х фаз размыкания должны размыкаться все маршруты СД, т. е. все секции маршрутов СД. При этом с переездов, пересекающих маршруты СД, должно сниматься извещение после внесения первой фазы размыкания в секции, которую пересекает переезд при условии свободности участков приближения переездов. Данная функция реализована размыканием фронтовых контактов реле ЧСС и ССЗ в управляющей цепи блока управления стрелками.

Допускается повторное открытие светофоров на поездное показание по трассе СД вслед проходящему по станции поезду, реализующему маршрут СД, а также в случае перекрытия светофоров из-за кратковременной неисправности. При этом сохраняется режим СД: остаются дополнительное замыкание стрелок по маршрутам СД и включение скоростного кодирования на станции.

В установленных маршрутах СД при изъятии ключа-жезла перегона отправления скоростное кодирование должно выключаться, реле ЧСС – обесточиваться (АЛС-ЕН коды ограничивают максимальную скорость движения до 160 км/ч).

Повторное включение скоростного кодирования возможно после установки ключа-жезла и повторного задания режима СД.

Отмена неиспользованного маршрута ВСП или ИР его секций возможна только после отмены режима СД. Режим СД должен отменяться одновременно для всех маршрутов СД заданного направления с выдержкой времени 180 с независимо от состояния участка приближения. Производится нажатием кнопки, фронтовые контакты которой замыкают цепь включения реле ЧССОТ. Размыкание тыловых контактов этого реле обрывает цепь самоблокировки ЧСС, а также подключает блок выдержки времени к реле ЧССВ (рис. 6). Данное реле включается через 3 мин и своими фронтовыми контактами включает 3. Поездные светофоры могут перекрыть маршруты СД в любой момент. При этом отмена режима

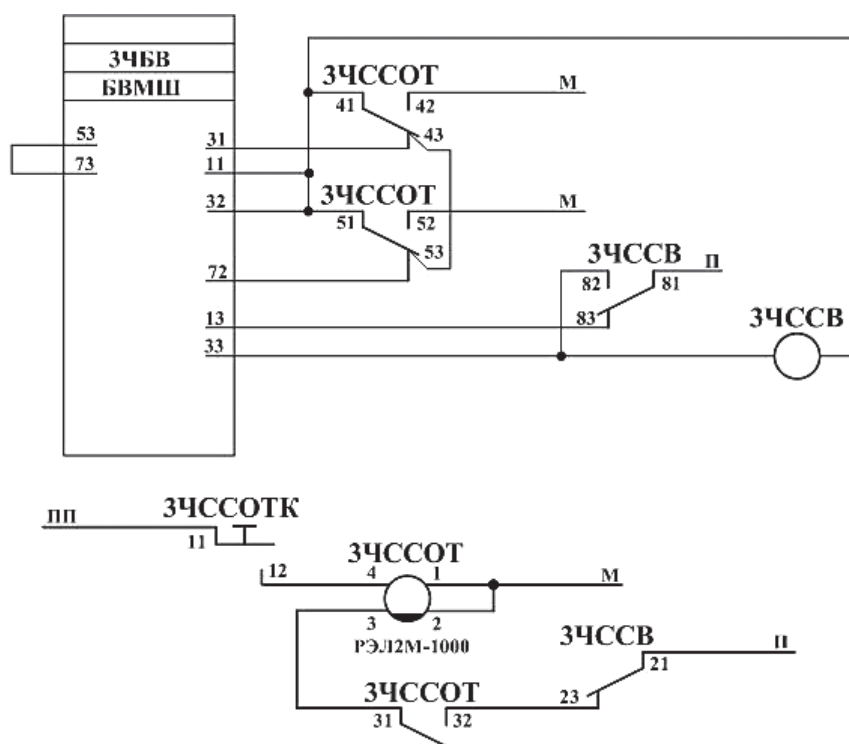


Рис. 6. Схема отмены режима скоростного движения

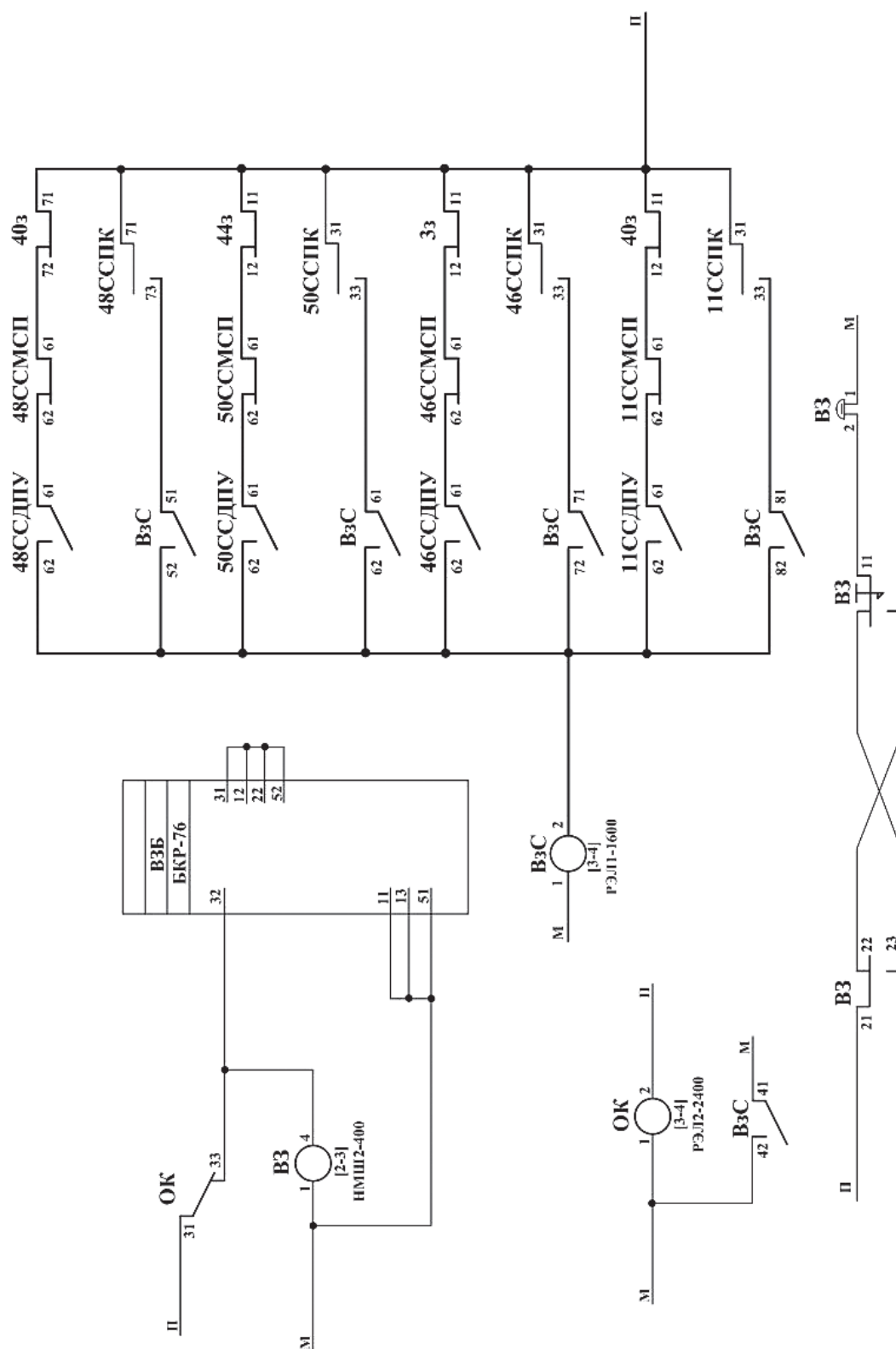


Рис. 7. Схема включения реле взреза

СД не запускается и скоростное кодирование не выключается.

Также в схему комплекта выдержки времени введены контакты З ЧССЗ, соответствующие полюса ЧСИВ и ЧСВВ для обеспечения отмены и ИР маршрутов в скоростном режиме.

В цепи включения сигнальных реле исключается перекрытие сигнала при срабатывании УКСПС, данные контакты шунтируются фронтными контактами реле ЧСС.

Дополнительно строится схема реле контроля взреза ВЗС для стрелок, участвующих в маршрутах скоростного движения (рис. 7). В цепи включения данного реле проверяются дополнительные условия безопасности, например, положения сбрасывающих стрелок. При нарушении любого из условий включается реле ВЗС, которое включает реле отсутствия контроля ОК. Данное реле отключает полюс питания в цепи включения реле ВЗ, в результате чего, спустя время замедления блока БКР-76, выключается реле ВЗ и звенит звонок взреза.

Помимо этого, кодирование АЛСН дополняется кодами АЛС-ЕН, которые применяются при скоростях движения свыше 140 км/ч и включенном скоростном режиме. Устанавливаются блоки ФС-ЕН, при этом если ранее эксплуатировались блоки ФСС, то они также заменяются на ФС-ЕН. Система АЛС-ЕН предназначена для передачи с пути на локомотив следующей информации:

- числа свободных блок-участков (до шести) впереди поезда;
- скорости проследования очередного светофора (16 градаций от 0 до 200 км/ч);
- длины лежащего впереди блок-участка (два значения – больше или меньше тормозного пути нормативного поезда);
- о пути, по которому движется поезд по перегону (главный путь станции или отклонение на боковой);
- о приближении поезда к закрытому светофору;
- о движении поезда по пригласительному сигналу;

- номера пути (четный или нечетный);
- четный или нечетный блок-участок данного пути.

Заключение

Строительство линии ВСМ приводит к повышению социально-экономической эффективности государства, повышению престижа страны. Мировая практика показала два основных пути решения проблемы повышения скоростей: организация скоростного движения на существующих линиях или строительство специализированных ВСМ.

Реконструкция существующих железнодорожных линий со смешанным движением позволяет поднять скорости движения поездов до 250 км/ч путем модернизации инфраструктуры, прежде всего, СЖАТ. Для этого следует предусмотреть режим «скоростное движение», который, изменяя временные параметры функций систем ЭЦ, обеспечивает требуемые показатели безопасности и работоспособности алгоритмов, компенсирует рост скоростей движения дополнительными временными задержками в системе управления.

Библиографический список

1. Белязо И. А. Маршрутно-релейная централизация / И. А. Белязо, В. Р. Дмитриев, Е. В. Никитина и др. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1974. – 320 с.
2. ВСН 448-Н Инфраструктура высокоскоростной железнодорожной линии Ташкент – Самарканд. Общие технические требования. – Ташкент: ГАЖК «УТЙ», 2010. – 58 с.
3. Казаков А. А. Релейная централизация стрелок и сигналов : учеб. для техникумов ж.-д. трансп. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1984. – 312 с.
4. Казаков А. А. Системы автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте : пособие по дипломному проектированию для техникумов

ж.-д. трансп. / А. А. Казаков, В. Д. Бубнов, Е. А. Казаков, В. И. Белов. – М. : Транспорт, 1988. – 230 с.

5. Казаков А. А. Станционные устройства автоматики и телемеханики : учеб. для техникумов ж.-д. трансп. / А. А. Казаков, В. Д. Бубнов, Е. А. Казаков. – М. : Транспорт, 1990. – 431 с.

6. Киселёв И. П. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс. В 2 т. / И. П. Киселёв и др. ; под ред. И. П. Киселёва. – М. : УМЦ по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. – Т. 1. – 308 с. ; т. 2. – 372 с.

7. Кононов В. А. Основы проектирования электрической централизации промежуточных станций : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / В. А. Кононов, А. А. Лыков, А. Б. Никитин ; под ред. В. А. Кононова. – М. : УМК МПС России, 2003. – 316 с.

8. Концепция организации высокоскоростного движения пассажирских поездов в Узбекистане Участок Ташкент – Самарканд / Головной проектно-изыскательский ин-т по транспорту ОАО «Boshtransloyiha». – Ташкент : ГАЖК «УТЙ», 2010. – 89 с.

9. Кравцов Ю. А. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. для вузов / Ю. А. Кравцов, В. Л. Нестерев, Г. Ф. Лекута ; под ред. Ю. А. Кравцова. – М. : Транспорт, 1996. – 400 с.

10. Мёллер Д. Лекция № 8 «Примеры проектов высокоскоростных магистралей, социально-экономические аспекты» / Д. Мёллер. – М. : МИИТ. – 91 с.

11. Переборов А. С. Телеуправление стрелками и сигналами : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / А. С. Переборов, А. М. Брылеев, В. Ю. Ефимов и др. ; под ред. А. С. Переборова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1981. – 390 с.

12. Петров А. Ф. Схемы электрической централизации промежуточных станций / А. Ф. Петров, Л. П. Цейко, И. М. Ивенский. – М. : Транспорт, 1987. – 297 с.

13. Сапожников Вл. В. Микропроцессорные системы централизации : учеб. для техникумов и колледжей ж.-д. трансп. / Вл. В. Сапожников и др. ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2008. – 398 с.

14. Сапожников Вл. В. Станционные системы автоматики и телемеханики : учеб. для вузов ж.-д.

трансп. / Вл. В. Сапожников, Б. Н. Елкин, И. М. Кокурин и др. ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : Транспорт, 1997. – 432 с.

15. Сапожников Вл. В. Эксплуатационные основы автоматики и телемеханики / Вл. В. Сапожников. – М. : Транспорт, 2006. – 247 с.

16. Якунин В. И. В будущее России – с высокой скоростью : моногр. / В. И. Якунин. – М. : Научный эксперт, 2012. – 216 с.

17. Research & Development // High speed rail. Fast track to sustainable mobility. – Paris, 2010. – P. 28–29.

References

1. Belyazo I. A., Dmitriyev V. R., Nikitina Ye. V., Oshurkov I. S. & Pestrikov A. N. Marshrutno-releynaya tsentralizatsiya [Route Control Interlocking System]. Moscow, Transport, 1974. 320 p.

2. VSN 448-N Infrastruktura vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy linii Tashkent – Samarkand. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya [VSN 448-N Infrastructure of Tashkent – Samarkand High-speed Railway Line. General Technical Requirements]. Tashkent, GAZhK UTU, 2010. 58 p.

3. Kazakov A. A. Releynaya tsentralizatsiya strelki i signalov: uchebnyy dlya tekhnikumov zheleznodorozhnogo transporta [Relay Interlocking of Switches and Signals: A Course Guide for Railway Technical Schools]. Moscow, Transport, 1984. 312 p.

4. Kazakov A. A., Bubnov V. D., Kazakov Ye. A. & Belov V. I. Sistemy avtomatiki i telemekhaniki na zheleznodorozhnom transporte: posobiye po diplomnomu proyektirovaniyu dlya tekhnikumov zheleznodorozhnogo transporta [Automatics and Telemechanics Systems in Railway Transport: A Manual for Graduation Projects for Railway Technical Schools]. Moscow, Transport, 1988. 230 p.

5. Kazakov A. A., Bubnov V. D. & Kazakov Ye. A. Stantsionnyye ustroystva avtomatiki i telemekhaniki: uchebnyy dlya tekhnikumov zheleznodorozhnogo transporta [Automatics and Telemechanics Station Devices: Study Book for Railway Technical Schools]. Moscow, Transport, 1990. 431 p.

6. Kiselev I. P. et al. Vysokoskorostnoy zheleznyy transport. Obshchiy kurs. Uchebnoye posobiye [High-speed Rail Transport. General Course. Study Guide].

Vols. 1–2. Ed. I. P. Kiselev. Moscow, UMTs po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2014. Vol. 1. 312 p., Vol. 2. 372 p.

7. Kononov V.A., Lykov A.A. & Nikitin A.B. Osnovy proyektirovaniya elektricheskoy tsentralizatsii promezhutochnykh stantsiy: uchebnoye posobiye po diplomnomu proyektirovaniyu dlya tekhnikumov zheleznodorozhnogo transporta [Basics of Designing Interlocking at Through Stations: A Manual for Graduation Projects for Railway Technical Schools]; ed. V.A. Kononov. Moscow, UMK MPS Rossii, 2003. 316 p.

8. Kontseptiya organizatsii vysokoskorostnogo dvizheniya passazhirskikh poyezdov v Uzbekistane. Uchastok Tashkent – Samarkand [Concept for Development of High-speed Passenger Train Traffic in Uzbekistan Railways. Tashkent – Samarkand Section], OAO Boshtransloyiha. Tashkent, GAZhK UTY, 2010. 89 p.

9. Kravtsov Yu. A., Nesterev V. L. & Lektura G. F. Sistemy zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: uchebnik dlya vuzov [Railway Automatics and Telematics Systems: Univ. Course Book]; ed. Yu. A. Kravtsov. Moscow, Transport, 1996. 400 p.

10. Meller D. Lektsiya No. 8: Primery proyektov vysokoskorostnykh magistralei, sotsialno-ekonomicheskkiye aspekty [Lecture No. 8: Examples of High-speed Line Projects, Socioeconomic Aspects]. Moscow, MIIT. 91 p.

11. Pereborov A. S., Bryleyev A. M., Yefimov V. Yu., Kokurin I. M. & Kondratenko L. F. Teleuprav-

leniye strelkami i signalami: uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta [Remote Control of Switches and Signals: Railway Univ. Course Book]; ed. A. S. Pereborov. Moscow, Transport, 1981. 390 p.

12. Petrov A. F., Tseyko L. P. & Ivenskiy I. M. Skhemy elektricheskoy tsentralizatsii promezhutochnykh stantsiy [Electric Interlocking Schemes for Through Stations]. Moscow, Transport, 1987. 297 p.

13. Sapozhnikov V. I. et al. Mikroprotsessornyye sistemy tsentralizatsii: uchebnik dlya tekhnikumov i kolledzhey zheleznodorozhnogo transporta [Microprocessor-based Interlocking Systems: Course Guide for Railway Technical Schools and Colleges]; ed. V. I. Sapozhnikov. Moscow, UMTs po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2008. 398 p.

14. Sapozhnikov V. I., Yelkin B. N., Kokurin I. M. et al. Stantsionnyye sistemy avtomatiki i telemekhaniki: uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta [Station Automatics and Telematics Systems: Univ. Course Book]; ed. V. I. Sapozhnikov. Moscow, Transport, 1997. 432 p.

15. Sapozhnikov V. I. Ekspuatatsionnyye osnovy avtomatiki i telemekhaniki [Automatics and Telematics Operational Basics]. Moscow, Transport, 2006. 247 p.

16. Yakunin V. I. V budushcheye Rossii – s vysokoy skorostyu: monografiya [At High Speed into Russia's Future: monogr.]. Moscow, Nauchnyy ekspert, 2012. 216 p.

17. Research & Development. *High speed rail. Fast track to sustainable mobility*. Paris, 2010. Pp. 28-29.

НИКИТИН Александр Борисович – доктор техн. наук, профессор, nikitin@crtc.spb.ru; *БОЛТАЕВ Суннатилло Туймуродович – аспирант, bstqqa@yandex.ru; ГЛЫБОВСКИЙ Артём Михайлович – студент, a.glybovsky@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 004; 656.21; 65.011.56

А. Б. Никитин, В. А. Грошев**АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ХОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
СТАНЦИИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

Дата поступления: 18.03.2016

Решение о публикации: 31.03.2016

Цель: Обосновать целесообразность применения подхода контроля и анализа технологического процесса станции в реальном масштабе времени. **Методы:** Рассмотрен наиболее популярный в настоящее время подход к анализу технологического процесса станции на основе имитационного моделирования. Представлены варианты данного подхода на отечественных и зарубежных железных дорогах. **Результаты:** Проанализировано влияние технологического сбоя на процесс принятия решения оператором при временных ограничениях. Представлен пример реализации функций автоматизации контроля технологических операций в реальном масштабе времени. Сформулированы достоинства и недостатки применяемых решений. Определена последовательность действий оператора при сбое технологического процесса. Обоснована необходимость разработки систем, реализующих возможности анализа технологического процесса станции и поддержки принимаемых решений в режиме реального времени. Определены направления дальнейших исследований. Даны рекомендации по структуре и технической реализации предлагаемого подхода. Сформулированы ограничения для систем анализа и планирования технологического процесса. **Практическая значимость:** Реализация представленного в работе подхода позволит повысить точность моделирования за счет применения фактических данных, поможет оценить возможные последствия решений, что снизит нагрузку на оперативный персонал.

Автоматизация технологического процесса, имитационное моделирование, системы автоматизированного управления, оперативное управление, план-график работы.

Alexander B. Nikitin, D. Eng., professor, nikitin@crtc.spb.ru; ***Vasiliy A. Groshev**, postgraduate student, was.groshev@yandex.ru (Petersburg State Transport University) AUTOMATISATION OF CONTROL OF STATION TECHNOLOGICAL PROCESS OPERATION IN REAL TIME

Objective: To justify usefulness of application of approach to control and analysis of station technological process in real time. **Methods:** Most popular current approach to analysis of station technological process was considered on the basis of simulation modelling. Variants of this approach on Russian and foreign railways were presented. **Results:** The influence of technological failure on operator's decision-making process under temporal constraints is analysed. An example of realisation of functions of control automation for technological operations in real time is provided. Positive and negative sides of applied solutions are formulated. Operator's response sequence in the event of a technological process failure is outlined. The need for development of systems which realise the possibilities of analysis of a station technological process and support for the decisions taken in real time is justified. Directions for further research are set out. Recommendations for structure and technical implementation of the proposed approach are provided. Limitations for technological process analysis and planning systems are outlined. **Practical importance:** Realisation of the approach set out in the paper will allow to increase accuracy of simulation due to use of actual data, will allow to evaluate possible consequences of decisions, which would decrease pressure on operating staff.

Automation of technological process, simulation modelling, automated control systems, operative control, work schedule.

Стабильная и бесперебойная работа железных дорог – одно из условий устойчивого развития отечественной экономики. Особое внимание при этом необходимо уделять станциям, так как на них производится основной объем работы. Сбои технологического процесса могут привести к потерям 10–15% производительности станции [14]. Это, в свою очередь, ведет к снижению объемов работы, к задержкам и в конечном итоге – к экономическим потерям.

Имеющиеся решения

В настоящее время наибольшее распространение на сети отечественных и зарубежных железных дорог получил метод имитационного моделирования виртуального технологического процесса для оценки влияния сбоев на работу станции, анализа возможных вариантов развития событий и выработки предложений по принимаемым решениям. Суть подхода заключается в оценке взаимного влияния элементов технологического процесса на основе нескольких проходов, каждый из которых базируется на случайных величинах.

Это нашло отражение в таких программных продуктах, как имитационная система транспорта «ИСТРА» (ООО «Транспортный алгоритм») (рис. 1), система «Аврора» (ПАО «Ленгипротранс»), OpenTrack (Швейцарская высшая техническая школа Цюриха), Rail Traffic Controller (RTC) (BerkleySimulation, Беркли, США) [6, 11, 15].

Упомянутые системы в качестве исходных данных требуют характеристики подвижного состава, инфраструктуры, графика движения поездов. Основные функции программ практически идентичны друг другу и заключаются:

- в расчете характеристик станций, перегонов, узлов и участков;
- моделировании технологического процесса в отсутствие нарушений (отклонений от графика, неисправности устройств и др.);
- моделировании сбоев технологического процесса и анализа их последствий;
- представлении полученных данных в графической форме (рис. 2).

Стоит отметить способность ряда разработок учитывать специфику применяемого в моделируемой зоне оборудования. Например, система OpenTrack строит модель с учетом типа системы управления движением поездов (система интервального регулирования –

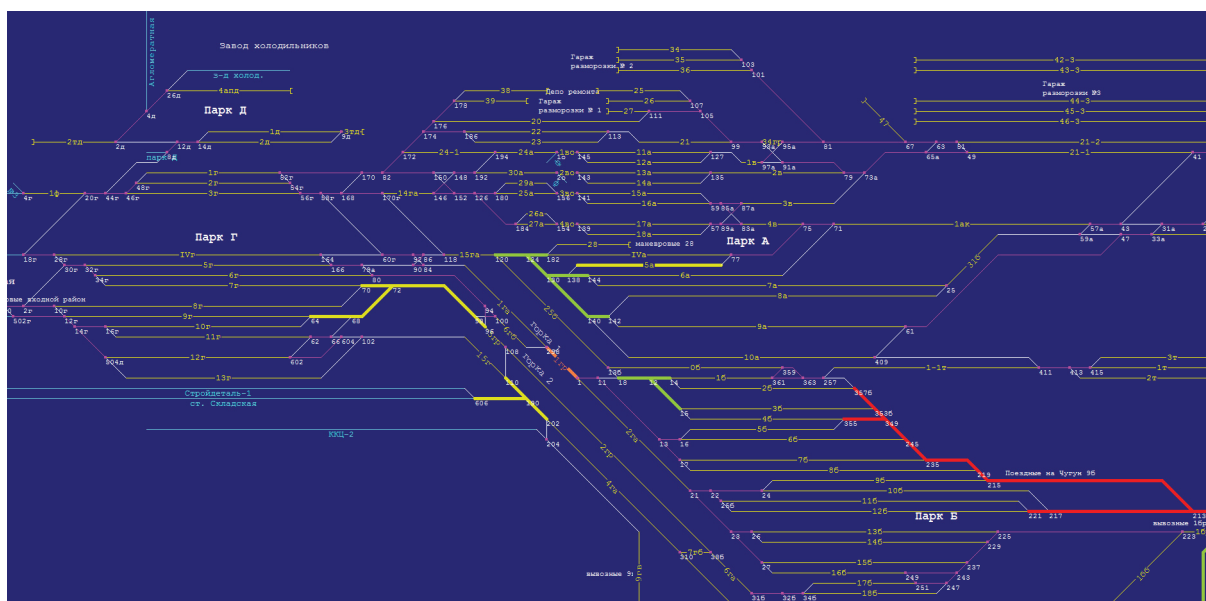


Рис. 1. Представление станции в системе ИСТРА

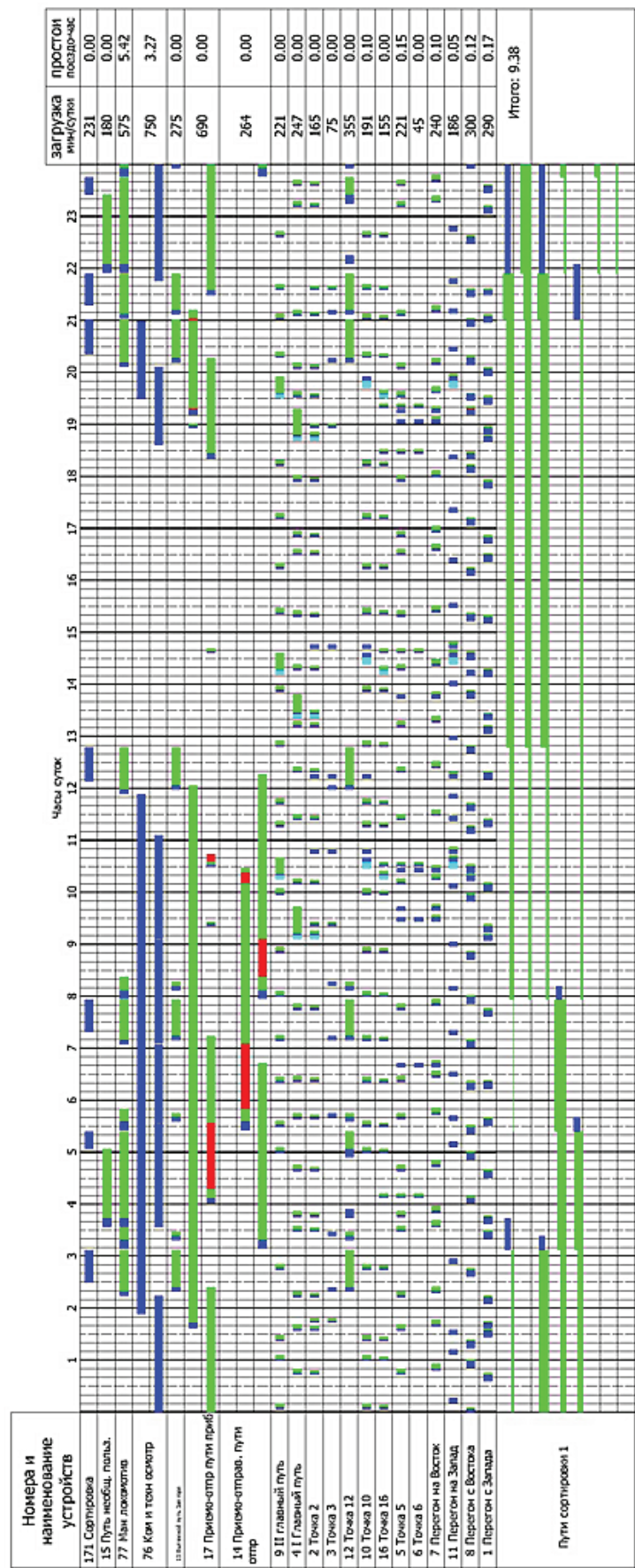


Рис. 2. Отображение суточного плана-графика работы станции в системе «Аврора»

Automatic Train Protection (ATP), система автоведения – Automatic Train Operation (ATO), единая европейская система управления движением поездов – European Train Control System (ETCS) и пр.). Результаты могут выводиться в разных формах, основными, как правило, являются:

- график движения поездов для моделируемой инфраструктуры;
- график движения выбранного поезда;
- построение плана-графика работы станции (рис. 2);
- диаграмма минимального межпоездного интервала (рис. 3);
- статистика загрузки элементов станционной инфраструктуры (занятость секций, путей и участков пути, количество переводов стрелок, работа грузовых фронтов и пр.);
- статистика по задержкам при выполнении операций и др.

Имитационное моделирование обладает рядом достоинств, среди которых:

- отсутствие необходимости тратить средства на натурные исследования;

- возможность предварительно оценить последствия сбоев;

- высокая степень достоверности результатов;

- экономия времени;

- наглядность представления данных.

С другой стороны, описанный подход имеет ряд существенных недостатков:

- трудоемкость построения модели;

- потребность в исследователях высокой квалификации [14];

- абстрагированность модели;

- неформализованность процесса верификации степени адекватности модели.

Технологический процесс станции в реальности может проходить иначе, чем при его моделировании. Причиной такого различия может оказаться просто неполнота или неточность учета факторов окружающей среды, отсутствие стандартизированного алгоритма описания технологического процесса станции и построения имитационной модели, отсутствие методов и алгоритмов проверки адекватности результатов моделирования до их внедрения.

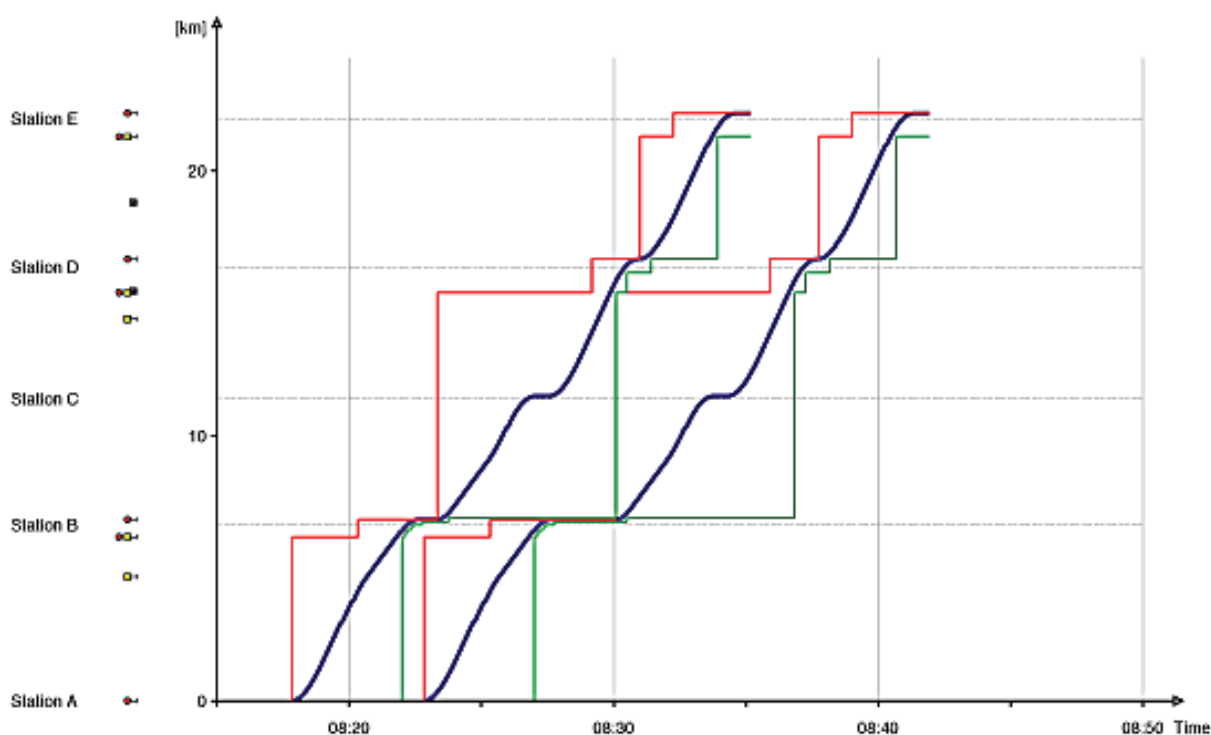


Рис. 3. Диаграмма минимального межпоездного интервала в системе OpenTrack

Контроль технологического процесса в реальном времени

Другим подходом является контроль технологического процесса и его анализ в режиме реального времени.

Процесс управления реализует четыре функции [10]. Как отмечалось выше, имитационное моделирование не помогает в случае возникновения сбоя в оперативном управлении станцией, когда необходимо действовать в условиях непредвиденной динамично изменяющейся обстановки. Оператору в этой ситуации необходимо собрать информацию от участников технологического процесса, проанализировать, сравнить с планом работы, продумать возможные решения, оценить их последствия, выбрать одно и выдать управляющее воздействие (рис. 4) [3].

В ходе получения информации о сбое лицо, принимающее решение (ЛПР), долж-

но обратиться ко множеству источников информации (рис. 5). Согласно исследованиям, только на сбор информации о выполнении графика движения поездов уходит 80–90 % рабочего времени управленческого персонала [8, 12].

Характер зависимости экономических потерь от длительности единичной временной задержки близок к линейному [5], но одна задержка может повлечь за собой другие, что увеличит потерю производительности. Это обусловлено представлением станции как системы и, как следствие, таким взаимодействием различных элементов, при котором свойства одного в общем случае зависят от условий, определяемых поведением другого [2]. Соответственно, для минимизации издержек сумма временных затрат на каждое звено процесса принятия решения ЛПР в случае сбоя ($t_{\text{реш}}$) должна стремиться к величине, заложенной в график бесперебойной работы ($t_{\text{план}}$):

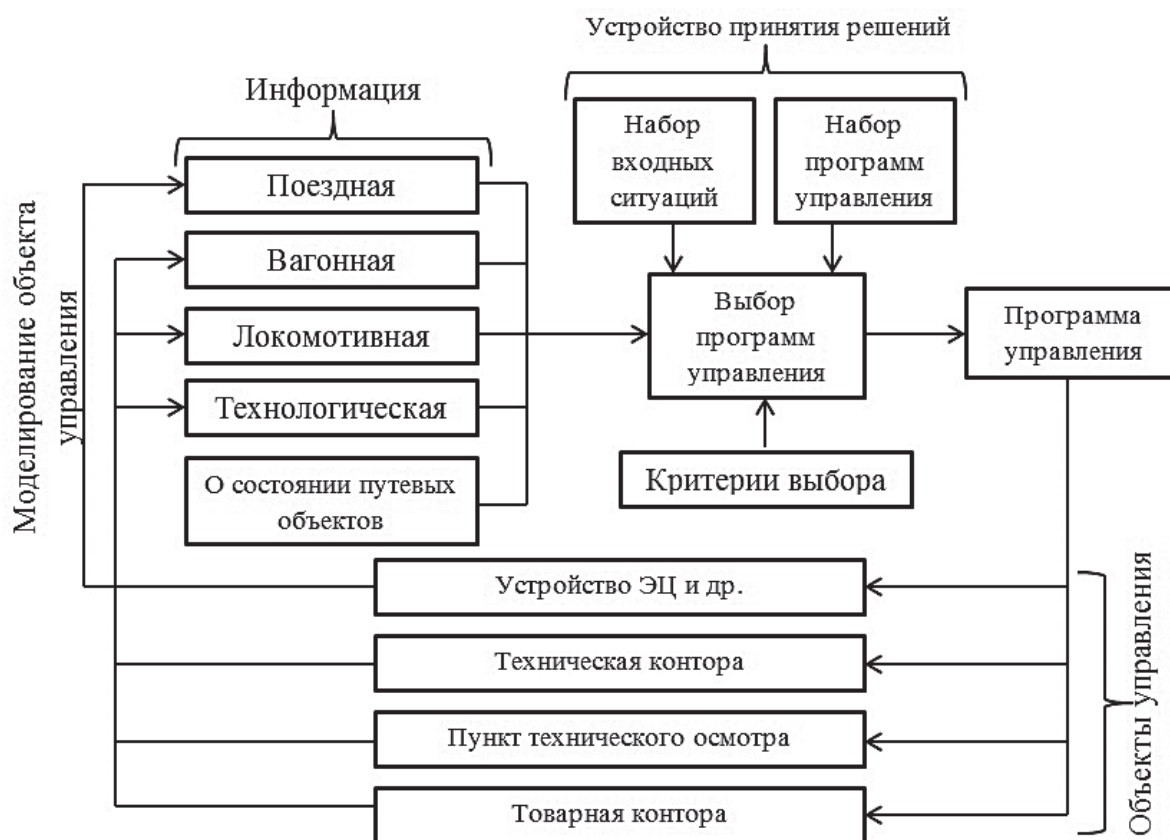


Рис. 4. Схема информационных моделей системы управления станцией

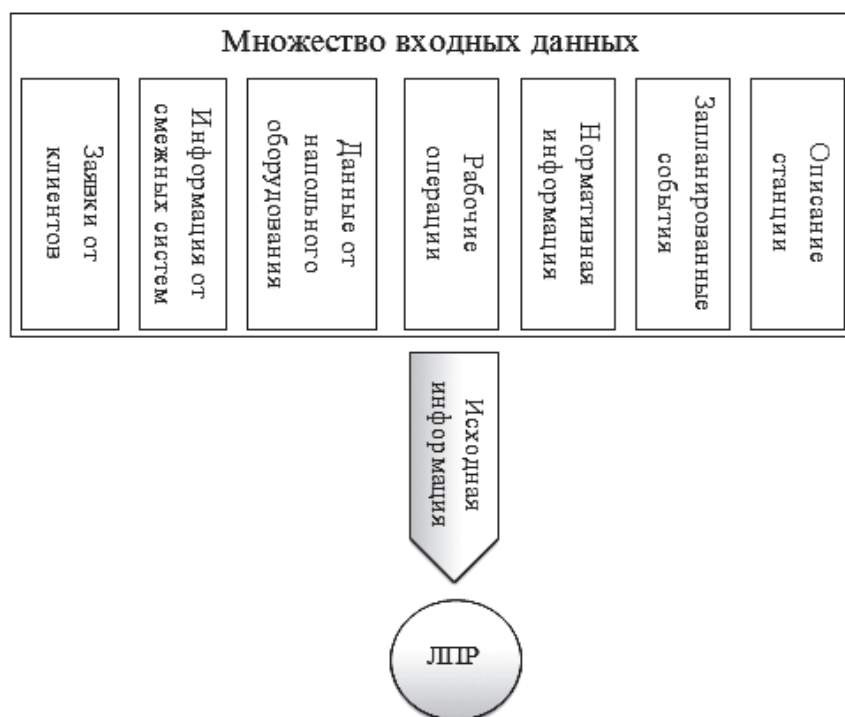


Рис. 5. Множество входных данных для ЛПР

$$t_{\text{реш}} = \sum_{i=1}^n t_i,$$

где t_i – временные затраты на i -е звено процесса принятия решения

$$t_{\text{реш}} \rightarrow t_{\text{план}}.$$

Естественно, в реальности это не всегда ведет к лучшим решениям, даже если имитационная модель станции была достаточно точна. Это подтверждается исследованиями [7, 13].

При контроле и анализе технологического процесса в реальном времени средствами вычислительной техники входные данные постоянно актуализируются программно-аппаратным комплексом автоматически (рис. 6).

На их основе строят график состояний технологического процесса, рассчитывают план дальнейшей работы, актуализируют состояние вагонной модели. В случае технологических сбоев программно-аппаратный комплекс способен предложить возможные решения, выступив в качестве «советчика».

Реализация систем, основанных на описанном подходе, требует решения не только алгоритмических и математических, но и аппаратных задач. Наиболее простым и явным выходом представляется построение отдельной АСУ. Примером такой системы можно назвать АСУ ГИР (график исполненной работы) [4]. Недостатками указанного пути являются увеличение количества оборудования на станции, временные и денежные затраты на обучение персонала. При этом не раз отмечалось, что потенциальные возможности автоматизированных систем управления гораздо шире, чем используемые в настоящее время [1, 9, 12]. С учетом сказанного реализация контроля и анализа технологического процесса видится не в разработке принципиально новых систем, а в качественном развитии существующих. Но такой выбор упирается в недостаточную проработанность вопросов построения, функционирования таких решений, их взаимодействие с другими устройствами и системами и как следствие – в отсутствие нормативных актов, регламентирующих указанные сферы.

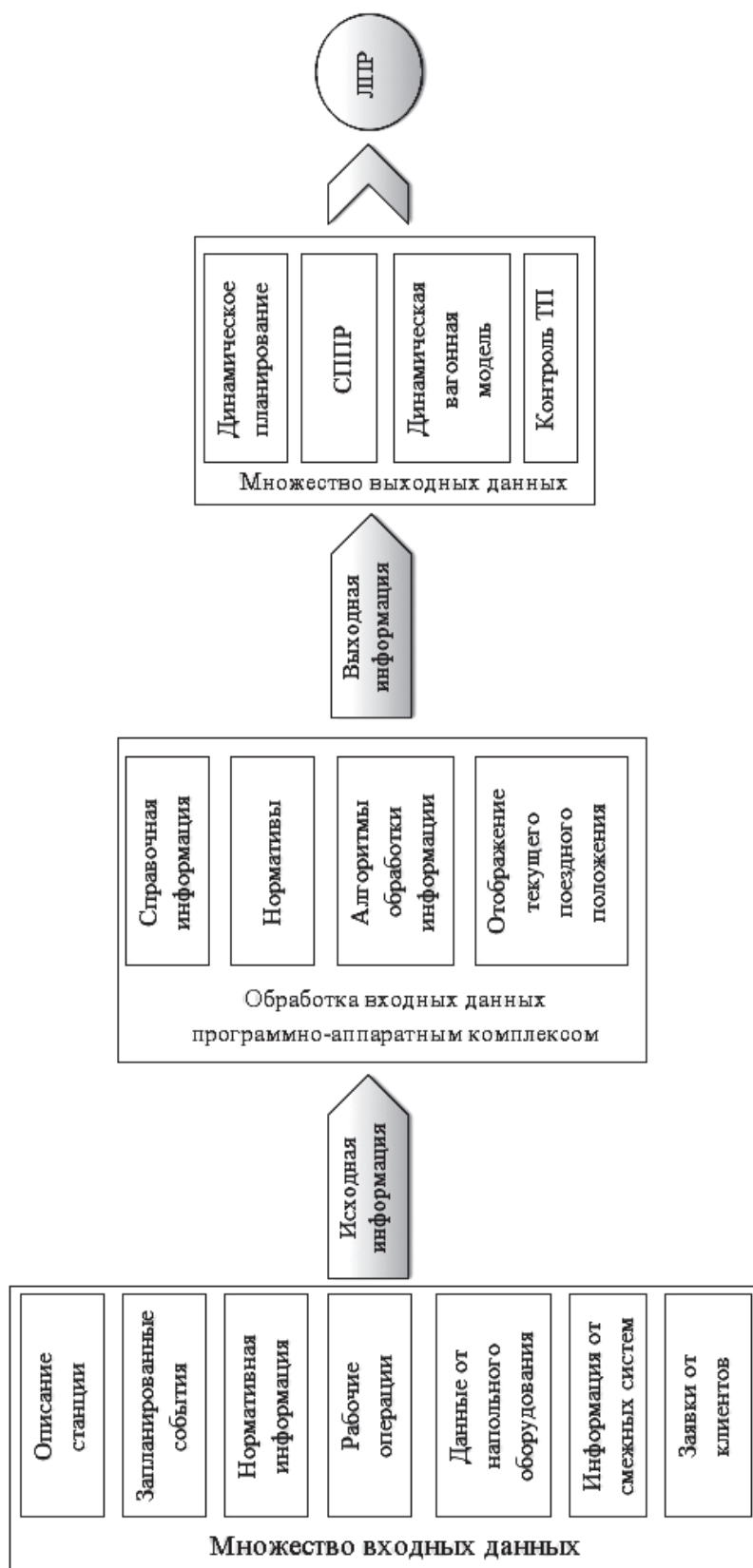


Рис. 6. Обработка данных программно-аппаратным комплексом и передача оператору

Пример реализации

Примером реализации обозначенного подхода может являться программный комплекс Центра компьютерных железнодорожных технологий (ЦКЖТ) ПГУПС – Автоматизированное построение графика работы станции.

В настоящее время указанная система способна в автоматическом режиме строить график исполненного движения по станции, определять операции погрузки и выгрузки (рис. 7). В качестве входной информации используются данные о передвижениях, получаемые от системы электрической централизации. У пользователя есть возможность редактировать график. При необходимости оператор может изменять тип операций, добавлять или удалять маршрут, корректировать его номер и трассу и др.

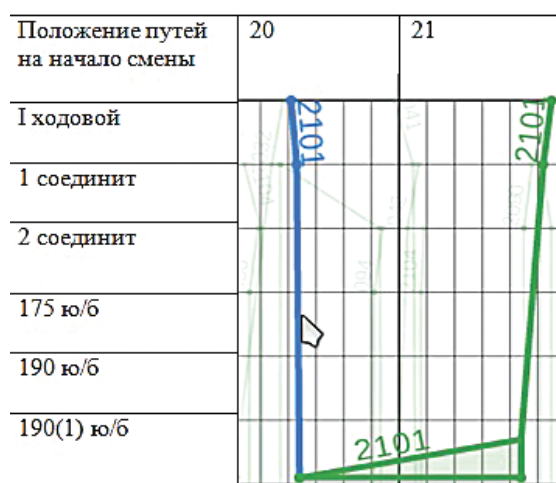


Рис. 7. Отображение исполненной операции погрузки на предприятии промышленного транспорта вагонов группы 2101

Начало применению системы положено на станциях промышленного транспорта. Дальнейшее развитие идет в направлении адаптации к требованиям магистральных дорог.

Заключение

Обеспечение бесперебойности технологического процесса – одна из основных за-

дач работников железных дорог. В настоящее время для анализа причин сбоев, оценки их последствий и формирования рекомендаций оперативному персоналу все активнее применяется имитационное моделирование станций.

В то же время ограничения этого подхода свидетельствуют о необходимости развития программно-аппаратных комплексов в направлении получения оперативных достоверных данных в режиме реального времени в увязке с системами управления. Реализация представленного в работе подхода позволит повысить точность моделирования за счет применения фактических данных, поможет оценить возможные последствия решений, что снизит нагрузку на оперативный персонал.

С другой стороны, разработка и применение указанных систем в настоящее время усложняется рядом нерешенных теоретических и практических вопросов. Этот факт обуславливает ведение дальнейших исследований в направлениях решения:

- математических и алгоритмических задач, связанных с анализом и планированием технологического процесса;
- технических задач, связанных с аппаратной реализацией программно-аппаратных комплексов, описанных в статье;
- организационных и нормативных вопросов, связанных с разработкой, функционированием и применением указанных систем.

Библиографический список

1. Балуев Н. Н. Автоматизация оперативного управления перевозочным процессом на станциях в компьютерных системах электрической централизации / Н. Н. Балуев, Г. Ф. Насонов, А. Б. Никитин и др. // Интеллектуальные системы на транспорте: материалы Третьей междунар. науч.-практич. конф. «ИнтеллектТранс – 2013». – М. : Перо, 2013. – С. 8–12.
2. Бусленко В. Н. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем / В. Н. Бусленко. – М. : Наука. Физматлит, 1977. – 240 с.

3. Гавзов Д. В. Системы диспетчерской централизации : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / Д. В. Гавзов, О. К. Дрейман, В. А. Кононов, А. Б. Никитин ; под общ. ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : Маршрут, 2002. – 407 с.

4. График исполненной работы (ГИР) ТрансСистемоТехника в базовой версии АСУ СТ 2013. – URL : <http://www.transsys.ru/content/products/products/gir.php> (дата обращения 04.02.2016).

5. Грошев В. А. Расширение функциональности СЖАТ / В. А. Грошев // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы : сб. трудов LXXIV Всерос. науч.-технич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 21–25 апр. 2014 г., Санкт-Петербург. – СПб. : ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2014. – С. 318–322.

6. ИСТРА-САПР. – URL : <http://trans-expert.net/IstraSapr/index.html> (дата обращения 04.02.2016).

7. Каталевский Д. Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении: учеб. пособие / Д. Ю. Каталевский. – М. : Дело, 2015. – 496 с.

8. Ковалев К. Е. Метод распределения функций и зон управления между оперативным персоналом крупных участковых станций : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / К. Е. Ковалев. – СПб., 2015. – 16 с.

9. Корниенко А. А. Интеллектуальные компьютерные системы оперативного управления движением поездов на станциях / А. А. Корниенко, А. Б. Никитин, А. Д. Хомоненко // Изв. ПГУПС. – 2012. – № 2 (31). – С. 116–119.

10. Микони С. В. Теория принятия управленческих решений : учеб. пособие / С. В. Микони. – СПб. : Лань, 2015. – 448 с.

11. Моделирование транспортных систем. – URL : <http://oder-lgt.ru/modest1.html> (дата обращения 04.02.2016).

12. Никитин А. Б. Методы и технические средства концентрации и централизации оперативного управления движением поездов (развитие теории и практические приложения) : автореф. дисс. ... д-ра техн. наук : 05.22.08 / А. Б. Никитин. – СПб., 2005. – 50 с.

13. Осокин О. В. Интеллектуальное сопровождение производственных процессов на железнодорожном транспорте : автореф. дисс. ... д-ра техн. наук : 05.22.08 / О. В. Осокин. – М., 2014. – 46 с.

14. Тимухина Е. Н. Методология исследования работоспособности станций при технологических сбоях / Е. Н. Тимухина // Транспорт Урала. – 2011. – № 4. – С. 58–62.

15. OpenTrack Railway Technology. – URL : http://www.opentrack.ch/opentrack/opentrack_e/opentrack_e.html (дата обращения 04.02.2016).

References

1. Baluyev N. N., Nasonov G. F., Nikitin A. B., Moiseyev V. V. & Groshev V. A. Avtomatizatsiya operativnogo upravleniya perevozhnym protsessom na stantsiyakh v kompyuternykh sistemakh elektricheskoy tsentralizatsii [Automatisation of Operating Control of Transportation Process at Stations by Microprocessor-based Interlocking]. *III mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Intellectualnyye sistemy na transporte"* – *IntellectTrans* – 2013. (3rd Int. Sci. and Practical Conf. "Intellectual Systems in Transport" – *IntellectTrans* – 2013). Moscow, Pero, 2013. Pp. 8-12.

2. Buslenko V. N. Avtomatizatsiya imitatsionnogo modelirovaniya slozhnykh sistem [Automation of Imitating Modelling of Complex Systems]. Moscow, Nauka, Phizmatlit, 1977. 240 p.

3. Gavzov D. V., Dreyman O. K., Kononov V. A. & Nikitin A. B. Sistemy dispetcherskoy tsentralizatsii: uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta [Centralized Traffic Control Systems: Course Guide for Railway Universities]; ed. Vl. V. Sapozhnikov. Moscow, Marshrut, 2002. 407 p.

4. Grafik ispolnennoy raboty (GIR) TransSistemoTehnika v bazovoy versii ASU ST 2013 [Schedule of Executed Work TransSystemTechnic in Basic Version ASU ST 2013], available at: <http://www.transsys.ru/content/products/products/gir.php>.

5. Groshev V. A. Rashirenije funktsionalnosti SZhAT [Extending of Railway Control System Functionality]. *Transport: problemy, idei, perspektivy: sbornik trudov LXXIV Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (Transport: Problems, Ideas, Perspectives: Coll. Papers of 74th All-Russian Conf. for Students, Postgraduate Students and Young Sci.)*, April 21–25, 2014, St. Petersburg. St. Petersburg, FGBOU VPO PGUPS, 2014. Pp. 318-322.

6. ISTRА-SAPR, available at: <http://trans-expert.net/IstraSapr/index.html>.
7. Katalevskiy D.Yu. Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya i sistemnogo analiza v upravlenii [Basic Imitation Modelling and System Analysis in Management]. Moscow, Delo, 2015. 496 p.
8. Kovalev K.Ye. Metod raspredeleniya funktsiy i zon upravleniya mezhdru operativnym personalom krupnykh uchastkovykh stantsiy [Method of Distribution of Functions and Zones of Management between Operational Personnel of Large Local Stations]. St. Petersburg, 2015. 16 p.
9. Korniyenko A.A., Nikitin A.B. & Khomonenko A.D. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2012, Is. 2 (31), pp. 116-119.
10. Mikoni S.V. Teoriya prinyatiya upravlecheskikh resheniy: uchebnoye posobiye [Theory of Making Administrative Decisions: Course Book]. St. Petersburg, Lan, 2015. 448 p.
11. Modelirovaniye transportnykh sistem [Simulation of Transport Systems], available at: <http://oder-lgt.ru/modest1.html>
12. Nikitin A.B. Metody i tekhnicheskiye sredstva kontsentratsii i tsentralizatsii operativnogo upravleniya dvizheniyem poyezdov (razvitiye teorii i prakticheskoye prilozheniya) [Methods and Technical Means for Concentration and Centralisation of Railway Operating Control (Theoretical Developments and Practical Applications)]. St. Petersburg, 2005. 50 p.
13. Osokin O.V. Intellektualnoye soprovozhdeniye proizvodstvennykh protsessov na zheleznodorozhnom transporte [Intellectual Support for Production Processes on Railway Transport]. Moscow, 2014. 46 p.
14. Timukhina Ye.N. *Transport Urala – Urals Transport*, 2011, no. 4, pp. 58-62.
15. OpenTrack Railway Technology, available at: http://www.opentrack.ch/opentrack/opentrack_e/opentrack_e.html.

НИКИТИН Александр Борисович – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой;
*ГРОШЕВ Василий Александрович – аспирант, was.groshev@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 624.21.093.004

С. В. Чижов, В. С. Прокопович, Э. Т. Яхшиев**ОБОСНОВАНИЕ НАДЁЖНОСТИ КОНСТРУКЦИИ
ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННОГО ПРОЛЁТНОГО СТРОЕНИЯ
ПОД ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЕ МАГИСТРАЛИ
В УСЛОВИЯХ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

Дата поступления: 01.04.2016

Решение о публикации: 10.05.2016

Цель: Обосновать возможность применения дисперсно-армированных конструкций пролётных строений на высокоскоростных железнодорожных магистралях. **Методы:** Для решения научно-прикладной задачи применяли методы натурного обследования и лабораторных испытаний, а также методы математического моделирования работы конструкции пролётного строения. Использование сравнительного анализа данных, полученных методом математического моделирования, с реальными параметрами эксплуатируемых пролётных строений, характеризующим их фактическое состояние, обеспечивает достоверность результатов исследования. Моделирование статической и динамической работы пролётного строения выполнено для различных сочетаний временных нагрузок от подвижного состава. Схемы нагрузок приняты на основе фактического подвижного состава высокоскоростных поездов, эксплуатируемых в Республике Узбекистан. **Результаты:** Обоснована возможность использования дисперсно-армированных пролётных строений в сети высокоскоростных железнодорожных магистралей. Рассчитана оптимальная конструкция пролётного строения под региональные особенности Республики Узбекистан. **Практическая значимость:** Использование результатов исследования при проектировании и строительстве пролётных строений позволяет оптимизировать их характеристики под региональные особенности, повысить показатели надёжности мостовых переходов на высокоскоростных магистралях по безотказности и долговечности. Разработанная методическая основа для назначения конструктивных и технологических решений, связанных с проектированием и строительством дисперсно-армированных пролётных строений на высокоскоростных магистралях, позволяет принимать оптимальные решения, повышающие надёжность таких конструкций.

Дисперсно-армированное пролётное строение, фибра, высокоскоростная магистраль, надёжность, долговечность, безотказность, трещиностойкость, динамика, подвижной состав, технология бетонирования.

Sergei V. Chizhov, Cand. Eng., assistant professor, **Vladimir S. Prokopovich**, assistant professor, ***Elbek T. Yakhshiyev**, postgraduate student, elbek-8420@mail.ru (Petersburg State Transport University)
JUSTIFICATION OF DESIGN RELIABILITY OF PARTICULATE-REINFORCED SUPERSTRUCTURES
FOR HIGH-SPEED RAILWAY LINE IN THE CONDITIONS OF REPUBLIC OF UZBEKISTAN

Objective: To justify possibility of using dispersion-reinforced concrete in construction of superstructures on high-speed railways. **Methods:** To solve scientific and applied problems, methods of field survey and laboratory tests were used, as well as methods of mathematical simulation of superstructure operation. The use of comparative analysis of data obtained by mathematical simulation with real parameters of superstructures being operated, characterising their actual state, ensures validity of research results. Simulation of static and dynamic work of superstructures is performed for various combinations of

temporary loads from rolling stock. Load schemes were adopted on the basis of the actual rolling stock of high-speed trains operated in the Republic of Uzbekistan. **Results:** The study justifies using particulate-reinforced superstructures on high-speed lines. Optimum design of bridge superstructure for regional peculiarities of the Republic of Uzbekistan is calculated. **Practical importance:** Research results can be used in the design and construction of superstructures, allowing to optimise their characteristics to conform to regional peculiarities, to enhance the reliability of bridges on high-speed railways for reliability and durability. Development of methodical basis for setting out constructive and technological solutions related to the design and construction of dispersion-reinforced superstructures on high-speed railways allows to make optimal decisions that improve reliability of such designs.

Particulate-reinforced superstructure, fiber, high-speed railway, safety, durability, reliability, fracture resistance, dynamics, rolling stock, technology of concreting.

Чтобы определить функциональные требования к мостам на высокоскоростных железнодорожных магистралях (ВСЖДМ), выбрать параметры мостового перехода, обосновать характеристики конструкции моста, необходимо учитывать факторы, влияющие на состояние конструктивных элементов в период эксплуатации, включая временную нагрузку, климатические, сейсмические и другие виды воздействий, характерных для региональных особенностей Узбекистана. Обоснованное определение и назначение таких характеристик на этапах инженерных изысканий, проектирования и строительства обеспечивают безопасную эксплуатацию и надёжность моста в процессе установленного срока службы.

Анализ строительства мостов на ВСЖДМ в мире убедительно доказывает, что приоритетным направлением в строительстве мостовых сооружений в условиях высоких скоростей подвижного состава является использование железобетонных конструкций пролётных строений. Это объясняется тем, что железобетонные конструкции обеспечивают весь комплекс прочностных требований при улучшении ресурсных характеристик, благодаря чему повышается срок службы, продлеваются межремонтные сроки, уменьшается стоимость эксплуатации, сокращается срок окупаемости проекта.

Для применения железобетонных пролётных строений мостов на ВСЖДМ необходимо выполнить ряд условий:

- устранить недостатки, возникающие в пролётных строениях, связанные со свойствами железобетона как строительного материала;
- повысить качество их изготовления и усовершенствовать технологию производства;
- назначить объективные характеристики материала и конструкции по данным инженерных изысканий и реальных условий эксплуатации;
- использовать современные материалы и технологии, позволяющие улучшить свойства и условия содержания пролётного строения с учётом статической и динамической работы всей конструкции и её отдельных узлов в заданных условиях эксплуатации.

Использование фибробетона как строительного материала в гражданском строительстве изучали разные исследователи, однако его использование в конструкциях транспортных сооружений, в том числе в железобетонных мостах, до настоящего времени обосновано недостаточно. Особо актуально применение фибробетона для дисперсно-армированных конструкций пролётных строений, в которых благодаря разным способам армирования можно улучшить работу конструкции и адаптировать её характеристики к конкретным условиям эксплуатации. Такие исследования до сих пор не проведены, что обуславливает актуальность работы для решения прикладной задачи применения дисперсно-армированных пролётных строений на ВСЖДМ Узбекистана.

Нормирование показателей надёжности моста – сложная инженерная задача для решения даже в рамках одного типа сооружений. Главным образом, это обусловлено сложностью определения критерия отказа из-за многообразия факторов, определяющих надёжность моста, и вариабельностью признаков, характеризующих систему и определяющих возникновение случайных событий. По этой причине многие исследователи устанавливают критерии отказов и нормируют показатели надёжности определённых типов мостов по факторам ресурсной надёжности конструкций и материалов, связанной с отдельными этапами жизненного цикла, а также с условиями эксплуатации [10, 11].

Исследования в области надёжности железобетонных конструкций существенно расширили границы возможного применения железобетонных мостов в сети железных дорог. Большой статистический материал позволяет проанализировать причины появления и развития таких дефектов, определяет возможности совершенствования свойств железобетонных мостовых конструкций и продления сроков их службы в различных условиях эксплуатации.

С марта 2013 г. по октябрь 2015 г. в сети железных дорог с обычным и высокоскоростным режимом эксплуатации в Республике Узбекистан проведено обследование и проанализированы причины возникновения дефектов железобетонных мостов. Установлено, что наиболее частотным типичным дефектом, связанным с условиями работы пролётных строений (85 % случаев), являются трещины. В зависимости от расположения и степени развития в конструкции они снижают грузоподъёмность пролётных строений, их долговечность, приводят конструкцию в неработоспособное состояние. Эти обстоятельства осложняют эксплуатационные характеристики железных дорог, определяя необходимость снижения скорости движения поездов на отдельных участках до 25 км/ч. В сети высокоскоростных дорог развитие трещин носит прогрессирующий характер, что усугубляется

климатическими, сейсмическими воздействиями, характерными для данного региона.

В связи с переходом на высокоскоростное движение вопрос о надёжности железобетонных пролётных строений приобретает чрезвычайную актуальность. Необходимо разработать требования к мостам, обеспечивающие заданные эксплуатационные скоростные режимы железных дорог [8, 9, 12].

Как показывает мировой опыт строительства и эксплуатации ВСЖДМ в аналогичных условиях, использование в конструктивных элементах дисперсного армирования с фиброй позволяет минимизировать образование дефектов от воздействий, в том числе связанных с динамикой от подвижного состава.

Образование трещины в пролётном строении с раскрытием до предельного значения $[\Delta_{cr}]_{np}$ при скоростях движения поезда $V_{max} \leq 300$ км/ч по совокупности случайных событий является по факту отказом конструкции пролётного строения, переводящим его в неработоспособное состояние, что определяет необходимость ограничения эксплуатационной скорости (V_{exp}) движения поездов [4, 5, 7]. При этом отказ конструкции целесообразно устанавливать по максимальной ширине раскрытия трещины Δ_{crfb} , при достижении которой снижается проектная надёжность пролётного строения H_n по функциональным и ресурсным показателям. Тогда критерий отказа примет вид

$$[\Delta_{cr}]_{np} \geq [\Delta_{crfb}],$$

где $[\Delta_{cr}]_{np}$ – предельная ширина раскрытия трещины; Δ_{crfb} – максимальная ширина раскрытия трещины.

$$\Delta_{crfb} \geq \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_3 \cdot \psi_s \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot l_s,$$

где φ_1 – коэффициент непродолжительности действия нагрузки; φ_2 – коэффициент периодического профиля арматуры; φ_3 – коэффициент изгибаемых элементов; ψ_s – линейная нагрузка; σ_s – нормальное напряжение; E_s – модуль упругости бетона.

На кафедре «Мосты» ПГУПС совместно с ООО «КИЦ СМТ» проведена научно-исследовательская работа по обоснованию характеристик дисперсно-армированного железобетонного пролётного строения $L = 66$ м под высокоскоростные магистрали в условиях эксплуатации в Республике Узбекистан. В результате математического моделирования установлено, что надёжность таких конструкций связана с вероятностью образования нормальной трещины к оси пролётного строения раскрытием до $\Delta_{crfb} = 0,011$ мм.

Установлено, что использование дисперсно-армированной конструкции позволяет полностью исключить возникновение наклонных трещин, обусловленных действием перерезывающей силы и в два раза сократить максимальную величину раскрытия нормальной трещины Δ_{crfb} по сравнению с предельной величиной раскрытия для обычного преднапряжённого железобетона, регламентированной [1].

Также в ходе исследований на математических моделях были получены эффекты, повышающие конструктивную (H_n) и технологическую (H_c) надёжность конструкции и обуславливающие эффективность применения дисперсно-армированных пролётных строений на высокоскоростных магистралях Республики Узбекистан.

Анализ результатов

1) Уменьшение высоты сжатой зоны пролётного строения X

Устанавливается методами расчёта по первой группе предельных состояний. Во многом обуславливается повышением расчётного сопротивления конструкционного материала пролётного строения и, следовательно, предельного изгибающего момента в случае с дисперсным армированием, соответственно. Так,

$$R_b < R_{bf}, M_f > M,$$

где R_b – расчётное сопротивление бетона; R_{bf} – расчётное сопротивление фибробетона; M_f – предельный изгибающий момент дисперсно-армированной конструкции пролётного строения; M – предельный изгибающий момент железобетонной конструкции пролётного строения.

Схема определения высоты сжатой зоны приведена на рис. 1.

Улучшение прочностных характеристик материала, в том числе расчётного сопротивления фибробетона R_{bf} , позволяет обеспечить эффективные конструктивные и технологические решения.

При разработке конструктивных решений пролётного строения эффект позволяет уменьшить:

- материалоемкость конструкции, обеспечив лучшие технико-экономические показатели пролётного строения;
- толщину стенок коробки дисперсно-армированного пролётного строения до $b = 250$ мм;
- нагрузку от собственного веса конструкции на 15 %;
- расход арматуры и бетона.

Кроме того, эффект позволяет улучшить работу конструкции пролётного строения за счёт повышения прочности зоны плиты пролётного строения при ударных динамических воздействиях от подвижного состава.

2) Повышение трещиностойкости, жесткости, долговечности пролётного строения

Устанавливается методами расчёта по второй группе предельных состояний на образование и ширину раскрытия трещин в конструкции пролётного строения, о чём сказано выше. По мнению авторов, является основным с позиции формирования надёжности дисперсно-армированного пролётного строения. В условиях значительных динамических нагрузок является существенным фактором формирования жёсткости пролётного строения и восприятия сейсмических воздействий. Минимизация процессов, связанных с образованием трещин, обеспечивает ресурсные

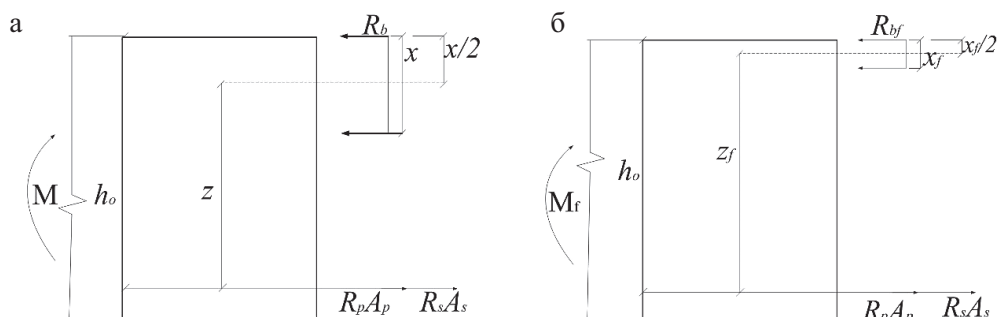


Рис. 1. Схема определения высоты сжатой зоны обычного (а) и дисперсно-армированного (б) бетона

характеристики конструкции, обеспечивающие срок эксплуатации сооружения T_3 .

3) Повышение эксплуатационной надёжности зон передачи сосредоточенных воздействий взамен локального армирования.

К таким участкам относятся места анкерного закрепления продольной высокопрочной арматуры (1, 2), зоны перелома высокопрочной арматуры (3), места анкерного закрепления хомутов, места анкерного закрепления поперечной высокопрочной арматуры (рис. 2).

Использование эффекта при проектировании позволяет:

- усовершенствовать конструкцию узлов передачи сосредоточенных сил;
- повысить технологическую эффективность возведения пролётного строения за счёт сокращения сроков возведения, повышения качества бетонных работ благодаря отсут-

ствию необходимости бетонировать густоармированные элементы.

При обосновании конструктивных решений дисперсно-армированного пролётного строения были выработаны требования к обеспечению надёжности на разных этапах жизненного цикла мостов. Они использовались при разработке нормативного документа «Методика проектирования и строительства, дисперсно-армированного железобетонного пролётного строения под ВСМ в условиях Республики Узбекистан».

Заключение

Решена теоретическая научная задача обоснования надёжности дисперсно-армированных железобетонных конструкций, пред-

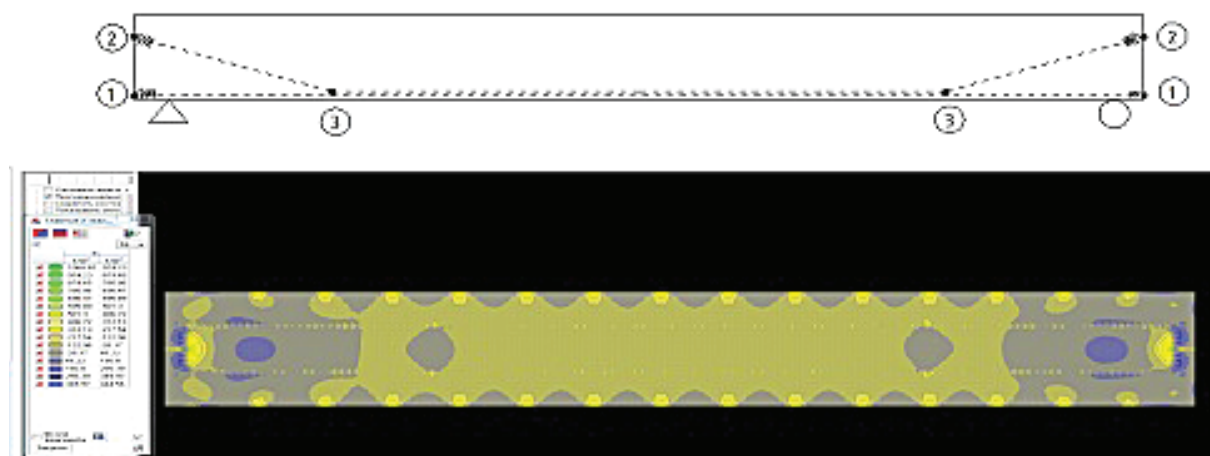


Рис. 2. Схема определения трещин и поля напряжений σ в местах передачи сосредоточенных нагрузок по плите пролётного строения

назначенных для использования на высокоскоростных железнодорожных магистралях в условиях Республики Узбекистан.

Научно-прикладной характер задачи связан с выявлением преимуществ дисперсно-армированных конструкций и с разработкой практических рекомендаций по проектированию и возведению таких конструкций.

Решение задачи позволяет повысить эффективность эксплуатации высокоскоростных магистралей, улучшить ресурсные характеристики пролётных строений железобетонных дисперсно-армированных мостов, повысить их надёжность и долговечность. Продление эксплуатационного ресурса и увеличение межремонтных сроков обеспечит экономическую эффективность таких конструкций по сравнению с конструкциями, не армированными фиброй.

Библиографический список

1. Авиром Л. С. Надёжность сборных зданий и сооружений / Л. С. Авиром. – Л. : Стройиздат, 1971. – 216 с.
2. Бегам Л. Г. Надёжность мостовых переходов через водотоки / Л. Г. Бегам, В. Ш. Цыпин. – М. : Транспорт, 1984. – 252 с.
3. Ермолаев Н. Н. Надёжность оснований сооружений / Н. Н. Ермолаев, В. В. Михеев. – Л. : Стройиздат, 1976. – 152 с.
4. Иосилевский Л. И. Железобетонные пролетные строения мостов индустриального изготовления. Конструирование и методы расчета / Л. И. Иосилевский, А. В. Носарев, В. П. Чирков, О. В. Шепетовский. – М. : Транспорт, 1986. – 216 с.
5. Кудзис А. П. Оценка надёжности железобетонных конструкций / А. П. Кудзис. – Вильнюс : Мокслас, 1985. – 156 с.
6. Новак Ю. В. К оценке надёжности метода расчета наклонных сечений железобетонных конструкций / Ю. В. Новак // Надёжность конструкций мостов и тоннелей : сб. науч. трудов МАДИ. – М. : МАДИ, 1986. – С. 23–26.
7. Осипов В. О. Содержание, реконструкция, усиление и ремонт мостов и труб / В. О. Осипов,

Ю. Г. Козьмин, А. А. Кирста и др. ; под ред. В. О. Осипова, Ю. Г. Козьмина. – М. : Транспорт, 1996. – 471 с.

8. Руководство по определению грузоподъёмности железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов / МПС. – М. : Транспорт, 1989. – 127 с.

9. Смирнов В. Н. Менеджмент в мостостроении / В. Н. Смирнов, С. В. Чижов ; Институт повышения квалификации и переподготовки. – СПб., 2011. – 42 с.

10. Смирнов В. Н. Особенности высокоскоростного движения железнодорожных экспрессов по мостам / В. Н. Смирнов. – СПб., 2015. – 57 с.

11. СНиП 2.05.03-84 «Мосты и трубы». – М. : Госстрой России, 1998. – 214 с.

12. Честной В. М. Железобетонные мосты : температура и надёжность / В. М. Честной. – М. : Транспорт, 1991. – 135 с.

13. Чижов С. В. Надёжность тоннельных обделок из набрызгбетона, сооружаемых в протерозойских глинах : автореф. ... канд. техн. наук / С. В. Чижов. – СПб. : ПГУПС, 1998. – 25 с.

14. Чижов С. В. О требованиях к мостам при высокоскоростном движении / С. В. Чижов, Э. Т. Яхшиев // Изв. ПГУПС. – 2014. – Вып. 4. – С. 87–91.

15. ШНК 2.05.03-11* «Мосты и трубы».

References

1. Avirom L. S. Nadezhnost sbornykh zdaniy i sooruzheniy [Reliability of Fabricated Buildings and Structures]. Leningrad, Stroyizdat, 1971. 216 p.
2. Begam L. G. & Tsypin V. Sh. Nadezhnost mostovykh perekhodov cherez vodotoki [Reliability of Bridge Crossings across Waterways]. Moscow, Transport, 1984. 252 p.
3. Yermolayev N. N. & Mikheyev V. V. Nadezhnost osnovaniy sooruzheniy [Reliability of Structure Foundations]. Leningrad, Stroyizdat, 1976. 152 p.
4. Iosilevskiy L. I., Nosarev A. V., Chirkov V. P. & Shepetovskiy O. V. Zhelezobetonnyye proletnyye stroyeniya mostov industrialnogo izgotovleniya.

Konstruivaniye i metody rascheta [Concrete Slab Spans of Industrially-produced Bridges. Designing and Calculation Methods]. Moscow, Transport, 1986. 216 p.

5. Kudzis A. P. Otsenka nadezhnosti zhelezobetonnykh konstruktsiy [Reliability Assessment for Reinforced-concrete Structures]. Vilnius, Mokslas, 1985. 156 p.

6. Novak Yu. V. K otsenke nadezhnosti metoda rascheta naklonnykh secheniy zhelezobetonnykh konstruktsiy [For Assessing the Reliability of the Method of Calculation of the Inclined Sections of Reinforced Concrete Structures]. *Nadezhnost konstruktsiy mostov i tonneley: sbornik nauchnykh trudov MADI (Reliability of Bridge and Tunnel Constructions: Coll. Sci. Papers of MADI)*. Moscow, MADI, 1986. Pp. 23-26.

7. Osipov V. O., Kozmin Yu. G., Kirsta A. A., Karapetov E. S. & Ruzin Yu. G. Soderzhaniye, rekonstruktsiya, usileniye i remont mostov i trub [Maintenance, Reconstruction, Strengthening and Repair of Bridges and Pipes]; ed. V. O. Osipov, Yu. G. Kozmin. Moscow, Transport, 1996. 471 p.

8. Rukovodstvo po opredeleniyu gruzopodyemnosti zhelezobetonnykh proletnykh stroyeniy zheleznodorozhnykh mostov. MPS [Manual for Measuring Bearing

Capacity of Concrete Slab Spans of Railway Bridges]. Moscow, Transport, 1989. 127 p.

9. Smirnov V. N. & Chizhov S. V. Menedzhment v mostostroyenii [Management in Bridge Construction]. St. Petersburg, 2011. 42 p.

10. Smirnov V. N. Osobennosti vysokoskorostnogo dvizheniya zheleznodorozhnykh ekspressov po mostam [Specific Features of High-speed Movement of Express Trains across Bridges]. St. Petersburg, 2015. 57 p.

11. SNiP 2.05.03-84 Mosty i truby [Bridges and Pipes]. Moscow, Gosstroy Rossii, 1998. 214 p.

12. Chestnoy V. M. Zhelezobetonnyye mosty: temperatura i nadezhnost [Railway Bridges: Temperature and Reliability]. Moscow, Transport, 1991. 135 p.

13. Chizhov S. V. Nadezhnost tonnelnykh obdelok iz nabryzgbetona, sooruzhayemykh v proterozoysskikh glinakh [Reliability of Shotcrete Tunnel Linings Built in Proterozoic Clays]. St Petersburg, PGUPS, 1998. 25 p.

14. Chizhov S. V. & Yakhshiyev E. T. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2014, Is. 4, pp. 87-91.

15. ShNK 2.05.03-11* Mosty i truby [Bridges and pipes].

ЧИЖОВ Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, sergchizh@yandex.ru; ПРОКОПОВИЧ Владимир Степанович – доцент, pvs@spbsmt.ru; *ЯХШИЕВ Элбек Толипович – аспирант, elbek-8420@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 624.21.093.004

С. В. Чижов, Э. Т. Яхшиев, Л. К. Дьяченко**ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ МОСТОВ
С УЧЁТОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ФАКТОРА НАДЁЖНОСТИ**

Дата поступления: 25.04.2016

Решение о публикации: 10.05.2016

Цель: Разработать и научно обосновать алгоритм и содержание процедуры оценки безопасности мостовых сооружений с учётом динамического фактора надёжности для включения результатов в методику «Проектирования и строительства дисперсно-армированных пролётных строений на высокоскоростных железнодорожных магистралях Республики Узбекистан». **Методы исследования:** Использовались системный анализ мостового сооружения, включающий полный перечень возможных взаимообусловленных состояний элементов моста под сочетаниями нагрузок и воздействий; методы математического моделирования; метод сопоставления аналогий. **Результаты:** Определены значимые факторы, влияющие на надёжность в условиях динамических нагрузок и воздействий, для их включения в методику оценки безопасности мостов на высокоскоростных железнодорожных магистралях. **Практическая значимость:** Решение данной прикладной задачи позволит перейти к разработке серии типовых дисперсно-армированных пролётных строений с целью их использования под высокоскоростное движение в соответствии с государственной программой модернизации железных дорог Узбекистана.

Безопасность, надёжность, динамические нагрузки, воздействия, дисперсно-армированное пролётное строение, высокоскоростная магистраль, системный анализ, трещиностойкость, отказ.

Sergey V. Chizhov, Cand. Eng., assistant professor; ***Elbek T. Yakhshiev**, postgraduate student, elbek-8420@mail.ru; **Leonid K. Dyachenko**, assistant lecturer (Petersburg State Transport University) **SAFETY ASSESSMENT OF BRIDGES WITH CONSIDERATION FOR DYNAMIC RELIABILITY FACTOR**

Objective: The study seeks to develop and scientifically justify an algorithm and contents of a procedure for safety assessment of bridges with consideration of dynamic reliability factor to incorporate the results into the methodological guide “Design and construction of dispersed-reinforced superstructures on high-speed railway lines of the Republic of Uzbekistan”. **Methods:** Systemic analysis of bridge structures was applied, including the full range of potential interrelated conditions of bridge elements under different combinations of loads and impacts, ensuring the required reliability of a bridge and reducing the likelihood of a system failure. Methods of mathematical simulation and mapping analogies were used. **Results:** Significant factors influencing reliability under dynamic loads and impacts were identified to be incorporated into the methodology of safety assessment of bridges on high-speed railway lines. **Practical importance:** The solution of this applied problem allows to start developing a series of models of particulate-reinforced spans to be used for high-speed traffic in accordance with the state programme of modernization of Uzbekistan railways.

Safety, reliability, dynamic loads, impact, particulate-reinforced superstructure, high-speed railway, systemic analysis, fracture resistance, failure.

Актуальность работы обусловлена тем, что проектирование и строительство мостов в современных условиях требует решить комплекс научно-прикладных задач для обеспе-

чения надёжной работы таких сооружений. Это становится невозможным без выявления и оценки всего перечня рисков, возникающих в период эксплуатации моста и влияющих на его безопасность. В связи с развитием сети высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСЖДМ) в различных геологических, климатических условиях требуются объективная оценка и обоснование технических характеристик конструктивных элементов мостов с учётом значимых факторов надёжности. Для мостов на ВСЖДМ таким фактором является динамический фактор надёжности, обусловленный нагрузками от подвижного состава, сейсмических воздействий, ветра.

Безопасная работа конструкций мостовых сооружений в течение всего срока службы предполагает выявление и оценку всех факторов риска, приводящих к снижению надёжности сооружений. Как правило, требования к мостам, идентичным по функциональному назначению, конструктивным особенностям, технологии возведения обобщаются в виде отраслевых нормативных документов, утверждаемых на государственном уровне. Использование новых функциональных, конструктивных, технологических решений требует разработки нормативных требований, обеспечивающих их безопасную эксплуатацию.

Такие параметры целесообразно нормировать с применением аппарата теории надёжности [2, 8, 10]. При этом установление в нормативных документах предельных значений параметров, характеризующих состояние конструкции, обуславливающих её переход в неработоспособное состояние, может учитывать показатель кумулятивного риска наступления отказа [1].

Развитие сети высокоскоростных железных дорог требует разработки проектных решений, учитывающих региональные особенности, поскольку они в значительной мере обуславливают разнообразие требований, предъявляемых к искусственным сооружениям [7].

Методы исследования

Научно-исследовательская работа на кафедре «Мосты» ПГУПС выявила факторы риска и позволила выработать практические мероприятия для обеспечения надёжности железобетонных пролётных строений мостов в сети ВСЖДМ Узбекистана.

По результатам обследования конструкций установлено, что отказ железобетонных пролётных строений мостов на ВСЖДМ связан с прогрессирующим характером развития трещин при действии динамических нагрузок. Из-за таких дефектов невозможно обеспечить заданный эксплуатационный режим по скорости движения поездов до $V = 300$ км/ч. Из-за особенностей железобетона такие дефекты развиваются в процессе эксплуатации [9, 12].

Длительные наблюдения за характером развития трещин в эксплуатируемых железобетонных пролётных строениях на кафедре «Мосты» ПГУПС и в «Институте сейсмостойкости Узбекистана» позволили выявить значимые факторы, оказывающие динамическое воздействие на мостовые сооружения в Узбекистане:

- от подвижного состава X_1 ;
- сейсмические X_2 ;
- ветровые нагрузки X_3 .

В связи с переходом на высокоскоростное движение поездов в Узбекистане разрабатывается перспективная конструкция дисперсно-армированного железобетонного пролётного строения, которая будет принята в качестве базовой для создания линейки типовых пролётов разной длины. В связи с этим возникла необходимость исследовать нормативную обеспеченность требований, связанных с динамическим фактором надёжности такой конструкции. Конструкцию пролётного строения разрабатывали при участии специалистов проектной организации ООО «КИЦ СМТ».

Данное пролетное строение – двухпутное с безбалластным мостовым полотном, изготавливается из предварительно напряженно-

го дисперсно-армированного железобетона с применением металлической фибры (рис. 1).

Результаты исследований

В ходе расчётного обоснования конструкции определён критерий отказа, связанный с возможностью образования и с шириной раскрытия трещин a для таких пролётных строений в условиях существенных динамических воздействий. В результате расчёта для дисперсно-армированного пролётного строения $L = 66$ м получена предельно возможная величина раскрытия нормальной к продольной оси пролётного строения трещины $a = 0,011$ мм. Результаты расчётного обо-

снования использованы в качестве одного из параметров ограничения S_i в случае возникновения отказа в дисперсно-армированном железобетонном пролётном строении на ВСЖДМ Узбекистана.

В качестве второго параметра ограничения использован показатель нормативного значения ширины раскрытия трещины для пролётного строения из обычного железобетона $a = 0,3$ мм. В этом случае вероятность безотказной работы пролётного строения с учётом значения кумулятивного риска возникновения отказа по заданному параметру величины раскрытия трещины и используемого в качестве параметра ограничения будет иметь вид

$$P\{S_i \leq [S_i]\} \geq P_i^H = 1 - V_i^H,$$

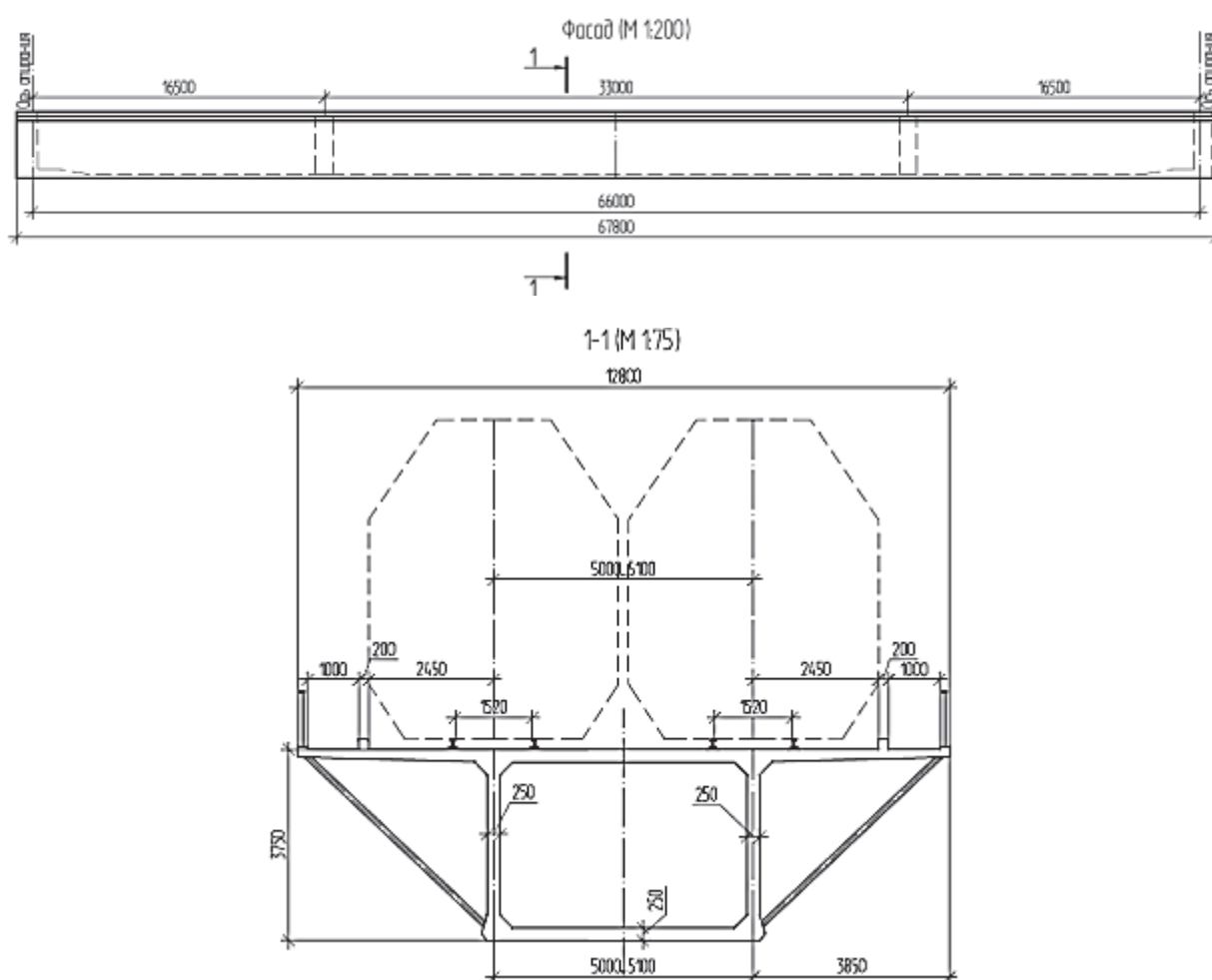


Рис. 1. Фасад и поперечное сечение коробчатого железобетонного пролётного строения расчётным пролётом 66 м

где P_i^H – нормативное значение вероятности безотказной работы пролётного строения; V_i^H – предельное значение кумулятивного риска (вероятность превышения значением S_i значения $[S_i]$, определяющее жёсткость требования ограничению параметра S_i); $S_i = a$ – параметр ширины раскрытия трещины, по которому производится ограничение; $[S_i] = a = 0,011$ мм – предельное значения этого i -го параметра.

Поскольку вероятность безотказной работы связана с риском, образование трещин в железобетонном пролётном строении от динамических нагрузок и воздействий X_1 , X_2 , X_3 от подвижного состава, сеймики и ветра, соответственно, является функцией случайных величин. Такая зависимость с учётом входного параметра вероятности безотказной работы и функции ограничения по ширине раскрытия трещин может быть исследована на оптимизационной математической модели вида

$$Y(X_i) = f(X_i) \rightarrow \max(\min);$$

$$Y_j(X_i) = f(X_i) \leq 0, \quad j = 1 \dots k, \quad i = 1 \dots n;$$

$$\alpha_i^{\min} \leq \alpha_i \leq \alpha_i^{\max},$$

где $Y(X_i) = P^H$ – целевая функция вероятности безотказной работы дисперсно-армированного пролётного строения; $Y_j(X_i)$ – функции ограничений, связанных с параметрами различных видов динамических воздействий X_1 , X_2 , X_3 ; $\alpha_i^{\min} \leq \alpha_i \leq \alpha_i^{\max}$ – двусторонние ограничения на переменные по ширине раскрытия нормаль-

ных к продольной оси трещин $0,011 \leq \alpha \leq 0,3$, где $\alpha = f(X_1; X_2; X_3)$.

Модель была построена с учётом статистических данных по результатам обследований, полученных на кафедре «Мосты и тоннели» ТАШИИТ (Ташкентский институт железнодорожного транспорта) и позволила установить вклад параметров X_i , связанных с динамической работой конструкции пролётного строения, характерных для эксплуатационных условий ВСЖДМ Узбекистана, в формирование безотказной работы конструкции пролётного строения [3, 13].

Были установлены значения кумулятивного риска для входных параметров факторов надёжности по виду динамического воздействия (табл. 1).

Исследования на математической модели показали, что значимость факторов X_1 , X_2 , характеризующих воздействие от подвижного состава и сейсмических воздействий, соответственно, существенны для железобетонных пролётных строений, в то время как ветровая нагрузка не вызывает рисков, связанных с безопасной эксплуатацией мостов таких конструкций.

Проблема сейсмостойкости железобетонных мостов в условиях Узбекистана изучена в достаточной мере [4–6]. Результаты этих исследований были учтены при разработке нормативных документов по проектированию и строительству мостов в Узбекистане [14].

Вместе с тем, исследований в части динамического фактора надёжности, связанного с воздействием подвижного состава на конструкции мостов в Узбекистане, до настоящего времени не проводилось. Также отсутствуют

ТАБЛИЦА 1. Кумулятивный риск по виду динамического воздействия

Вид динамического воздействия, параметр X_i	Средний показатель риска V_i	Нормативная обеспеченность в Узбекистане
Подвижной состав, X_1	0,7	Отсутствует
Сейсмика, X_2	0,9	ШНК 2.05.03-11
Ветровая нагрузка, X_3	0,1	

нормативные документы, регламентирующие особенности проектирования и строительства таких конструкций с учётом указанного фактора. Исследования в области высокоскоростного движения поездов показывают актуальность его нормирования [11].

Поскольку фактор динамической надёжности, связанный с воздействием подвижного состава, зависит от характеристик как принятых к эксплуатации поездов, так и пролётного строения, на кафедре «Мосты» ПГУПС проведены исследования, позволяющие обосновать возможность применения динамической системы поезд – пролётное строение с учётом исходных данных, принятых на ВСЖДМ Узбекистана.

Динамическая система представляет собой эксплуатационные нагрузки от поезда типа Talgo AV-250, приложенные к расчётному

пролёту $L = 66$ м с заданными характеристиками пролётного строения.

Динамическая задача решалась методом неявного пошагового интегрирования по времени методом Ньюмарка [15]. В результате расчёта получены первая и вторая изгибные формы колебаний коробчатого железобетонного пролётного строения (рис. 2).

Динамические характеристики пролётного строения представлены в табл. 2.

В процессе исследования с помощью программного комплекса Sofistic также определены динамические коэффициенты μ_1 для различных моделей нагрузки (табл. 3). Дисперсия значений динамических коэффициентов для различных моделей нагрузки по отношению к исходным параметрам расчётного поезда Talgo-250 Afrosiyob показывает эффективность принятых конструктивных реше-

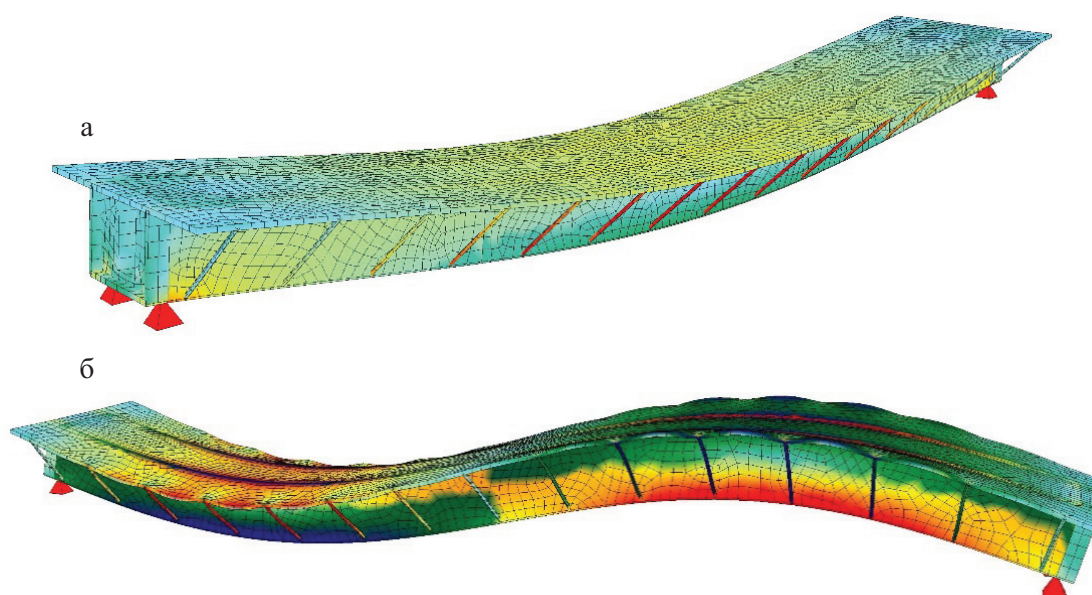


Рис. 2. Первая (а) и вторая (б) собственные изгибные формы колебаний коробчатого железобетонного пролётного строения расчётным пролётом 66 м

ТАБЛИЦА 2. Динамические характеристики пролётного строения

Расчетная длина, м	Жесткость, МН*, м ²	Собственный по- гонный вес, кН/м	Погонный вес мостового по- лотна (max/min), кН/м	Частота собствен- ных колебаний (max/min), Гц
66,0	462 250	141,65	220,45/123,15	1,96/2,22

ТАБЛИЦА 3. Результаты динамических расчетов

Модель нагрузки	Динамический коэффициент, μ_1
A1	1,304
A2	1,296
A3	1,299
A4	1,541
A5	1,728
A6	1,721
A7	1,594
A8	1,362
A9	1,335
A10	1,352
Talgo-250 «Afrosiyob»	1,232

ний с учётом фактора динамической надёжности.

В ходе расчётов определена зависимость изменения динамического коэффициента от скорости движения высокоскоростного поезда, принятого в качестве элемента динамической системы поезд – пролётное строение с учётом исходных данных ВСЖДМ Узбекистана (рис. 3).

Заключение

Исследование динамического фактора надёжности дисперсно-армированных пролётных строений на ВСЖДМ Узбекистана с учётом кумулятивного риска возникновения отказа показывает необходимость нормирования требований к системе поезд – пролётное строение и к методам определения динами-

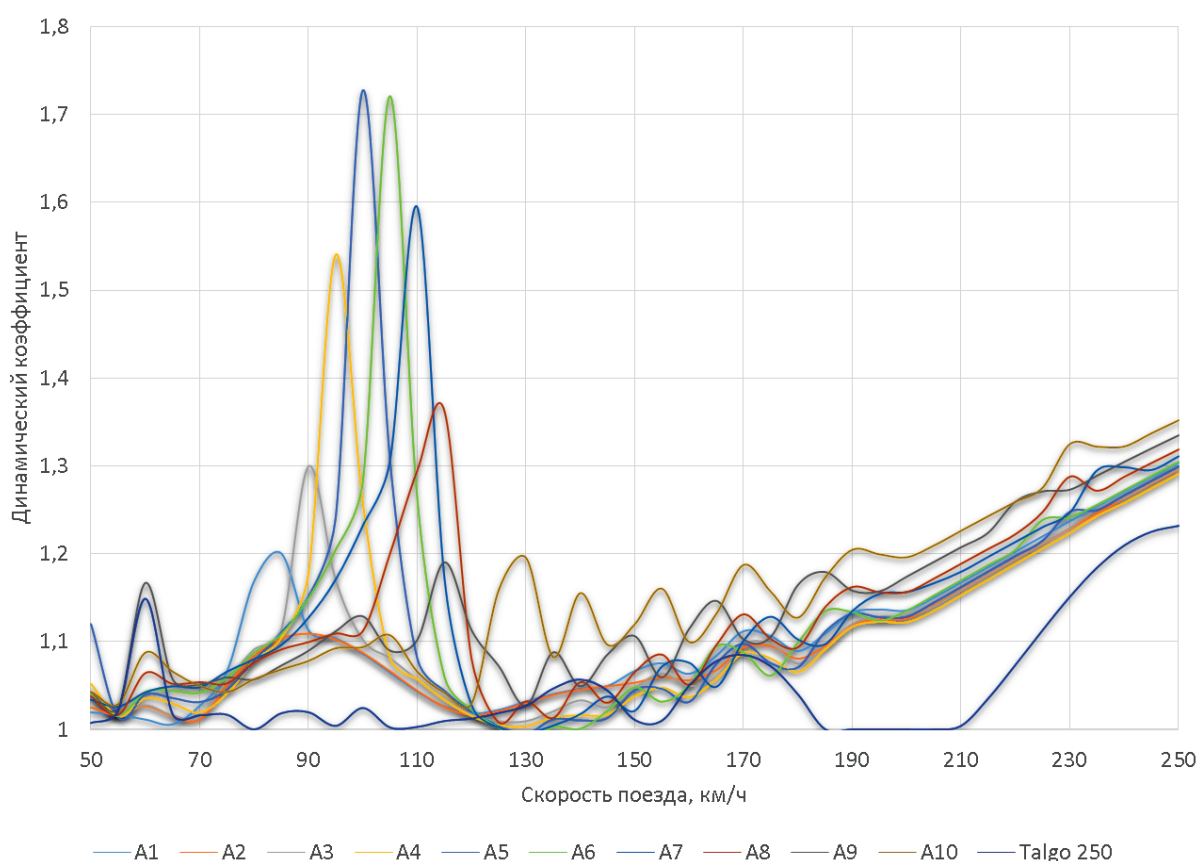


Рис. 3. Графики изменения динамического коэффициента к временной нагрузке пролётного строения 66 м в зависимости от скорости движения поезда (нагрузки A1–A10, Talgo 250)

ческих характеристик, определяемых в зависимости от скорости движения поезда и исходных параметров подвижного состава.

Динамические расчёты, проведённые в ходе исследования, подтверждают актуальность разработки и принятия на уровне республики нормативного акта, регламентирующего процессы проектирования искусственных сооружений, которые позволят повысить безопасность и надёжность мостов на ВСЖДМ Узбекистана.

Полученные в ходе исследования результаты обоснования характеристик пролётного строения позволяют рекомендовать его к использованию в сети ВСЖДМ Узбекистана.

Библиографический список

1. Авиром Л. С. Надёжность сборных зданий и сооружений / Л. С. Авиром. – Л. : Стройиздат, 1971. – 216 с.
2. Бегам Л. Г. Надёжность мостовых переходов через водотоки / Л. Г. Бегам, В. Ш. Цыпин. – М. : Транспорт, 1984. – 252 с.
3. Бондарь Н. Г. Взаимодействие железнодорожных мостов с подвижным составом / Н. Г. Бондарь, Ю. Г. Козьмин, З. Г. Ройтбурд и др. / под ред. Н. Г. Бондаря. – М. : Транспорт, 1984. – 272 с.
4. Ботвинкин Н. Н. Руководство по сейсмостойкости сооружений / Н. Н. Ботвинкин // Ташкент : Средне-Азиатское отд. объедин. гос. изд-ва, 1993. 160 с.
5. Кузнецова И. О. Использование упругого полупространства для моделирования оснований при оценке сейсмостойкости больших мостов / И. О. Кузнецова, А. М. Уздин, У. З. Шермухамедов, В. Хайбинь // Вестн. гражданских инженеров. – 2010. – Вып. 3. – С. 91–95.
6. Рашидов Т. Р. Колебания сооружений, взаимодействующих с грунтом / Т. Р. Рашидов, Г. Х. Хожметов, Б. Н. Мардонов. – Ташкент : Фан, 1975. – 173 с.
7. Смирнов В. Н. Особенности высокоскоростного движения железнодорожных экспрессов по мостам / В. Н. Смирнов. – СПб., 2015. – 57 с.
8. Честной В. М. Железобетонные мосты : температура и надёжность / В. М. Честной. – М. : Транспорт, 1991. – 135 с.
9. Чижев С. В. К вопросу прогноза степени усадки бетона / С. В. Чижев, С. А. Кузнецов // Мир дорог. – 2014. – № 77. – С. 20–21.
10. Чижев С. В. Надёжность тоннельных обделок из набрызгбетона, сооружаемых в протерозойских глинах : автореф. ... канд. техн. наук / С. В. Чижев. – СПб. : ПГУПС, 1998. – 25 с.
11. Чижев С. В. О требованиях к мостам при высокоскоростном движении / С. В. Чижев, Э. Т. Яхшиев // Изв. ПГУПС. – 2014. – Вып. 4. – С. 87–91.
12. Чижев С. В. Прогнозирование процесса карбонизации бетона / С. В. Чижев, С. А. Кузнецов // Перспективы науки. – 2014. – № 11 (62). – С. 76–81.
13. Шермухамедов У. З. Гашение продольных сейсмических колебаний опор балочных мостов с сейсмоизолирующими опорными частями : автореф. ... канд. техн. наук / У. З. Шермухамедов. – М. : МИИТ, 2010. – 23 с.
14. ШНК 2.05.03-11* «Мосты и трубы».
15. EN 1991-2 (2003): Eurocode 1 : Actions on structures. P. 2 : Traffic loads on bridges.

References

1. Avirom L. S. Nadezhnost sbornykh zdaniy i sooruzheniy [Reliability of Fabricated Buildings and Structures]. Leningrad, Sroyzdat, 1971. 216 p.
2. Begam L. G. & Tsypin V. Sh. Nadezhnost mostovykh perekhodov cherez vodotoki [Reliability of Bridge Crossings across Waterways]. Moscow, Transport, 1984. 252 p.
3. Bondar N. G., Kozmin Yu. G., Roytburg Z. G. et al. Vzaimodeystviye zheleznodorozhnykh mostov s podvizhnym sostavom [Interaction between Railway Bridges and Rolling Stock]; ed. N. G. Bondar. Moscow, Transport, 1984. 272 p.
4. Botvinkin N. N. Rukovodstvo po seysmostoykosti sooruzheniy [A Manual in Seismic Resistance of Structures]. Tashkent, Sredne-Aziatskoye otdeleniye obyedinennogo gosizdatelstva, 1993. 160 p.
5. Kuznetsova I. O., Uzdin A. M., Shermukhamedov U. Z. & Khaybin V. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Civil Eng. Newsletter, 2010, Is. 3, pp. 91-95.
6. Rashidov T. R., Khozhmetov G. Kh. & Mardonov B. Kolebaniya sooruzheniy, vzaimodeystvuyush-

chikh s gruntom [Vibrations of Structures Interacting with the Ground]. Tashkent, Fan, 1975. 173 p.

7. Smirnov V.N. Osobennosti vysokoskorostnogo dvizheniya zheleznodorozhnykh ekspressov po mostam [Specific Features of High-speed Movement of Express Trains across Bridges]. St. Petersburg, 2015. 57 p.

8. Chestnoy V.M. Zhelezobetonnyye mosty: temperatura i nadezhnost [Railway Bridges: Temperature and Reliability]. Moscow, Transport, 1991. 135 p.

9. Chizhov S.V. & Kuznetsov S.A. *Mir dorog* – *World of Roads*, 2014, no. 77, pp. 20-21.

10. Chizhov S.V. Nadezhnost tunnelnykh obdelok iz nabryzgbetona, sooruzhayemykh v proterozoysskikh glinakh [Reliability of Shotcrete Tunnel Linings Built in Proterozoic Clays]. St Petersburg, PGUPS, 1998. 25 p.

11. Chizhov S.V. & Yakhshiyev E.T. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2014, Is. 4, pp. 87-91.

12. Chizhov S.V. & Kuznetsov S.A. *Perspektivy nauki – Perspectives of Sci.*, 2014, no. 11 (62), pp. 76-81.

13. Shermukhamedov U.Z. Gasheniye prodolnykh seysmicheskikh kolebaniy opor balochnykh mostov s seysmoizoliruyushchimi opornymi chastyami [Suppression of Dilatational Seismic Vibrations of Beam Bridge Supports with Earthquake-isolating Substructures]. Moscow, MIIT, 2010. 23 p.

14. ShNK 2.05.03-11* Mosty i truby [Bridges and pipes].

15. EN 1991-2 (2003): Eurocode 1: Actions on structures. P. 2: Traffic loads on bridges.

ЧИЖОВ Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, sergchizh@yandex.ru; *ЯХШИЕВ Элбек Толипович – аспирант, elbek-8420@mail.ru; ДЬЯЧЕНКО Леонид Константинович – ассистент, leonid_dyachenko@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).



УДК 004.358

**Я. С. Ватулин, С. К. Коровин, М. С. Коровина,
С. В. Орлов, Д. А. Потахов, Е. А. Потахов**

БЕЗОПАСНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МОБИЛЬНЫХ ПОДЪЁМНИКОВ С РАБОЧИМИ ПЛАТФОРМАМИ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАТУРНЫХ И ВИРТУАЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Дата поступления: 03.03.2016

Решение о публикации: 12.05.2016

Цель: Обосновать применение методики виртуального моделирования нарушений работоспособного состояния мобильных подъёмников с рабочими платформами (МПП) с целью обеспечения их безопасной эксплуатации. **Методы:** Совместное использование микроэлектромеханических систем (МЭМС – MEMS), прикладных модулей SolidWorks Simulation, SolidWorks Motion и матричной математической системы MATLAB. **Результаты:** Предложена методика моделирования нарушений работоспособного состояния МПП. Сравнение результатов виртуального моделирования некоторых дефектов на подъёмнике ВС-22-МС и натурных экспериментов с применением MEMS-акселерометров показало, что их расхождение не превышает 7,1–9,2 %. **Практическая значимость:** Благодаря виртуальному моделированию сокращается стоимость и упрощаются исследования причин возникновения дефектов МПП. Предлагаемая методика позволяет определить некоторые дефекты конструкции.

Мобильный подъёмник, рабочая платформа, МЭМС-акселерометр, прикладной модуль, SolidWorks Simulation, SolidWorks Motion, матричная математическая система MATLAB, статический анализ, модальный анализ, вейвлет-преобразование.

Yan S. Vatulin, Cand. Eng., assistant professor, department chair, yan-roos@yandex.ru; ***Sergey K. Korovin**, Cand. Eng., assistant professor, big-bernar@yandex.ru; **Mariya S. Korovina**, assistant lecturer, pgups2013@yandex.ru; **Sergey V. Orlov**, Cand. Eng., assistant professor, orlov@spbmuseum.ru; **Denis A. Potakhov**, student, schan-di@mail.ru; **Yegor A. Potakhov**, student, schan-di@mail.ru, (Petersburg State Transport University) **SAFE OPERATION OF MOBILE ELEVATING WORK PLATFORMS ON THE BASIS OF RESULTS OF FULL-SCALE AND VIRTUAL EXPERIMENTS**

Objective: To justify application of the method of virtual modelling of mobile elevating work platforms' operational condition disturbance to ensure their safe operation. **Methods:** Joint application of microelectromechanical systems (MEMS), SolidWorks Simulation and SolidWorks Motion application modules, and MATLAB matrix mathematical system. **Results:** A method for simulation of operational condition disturbances of mobile elevating work platforms is proposed. A comparison of results of virtual simulation of some defects on VS-22-MS elevating platform and full-scale experiments in which MEMS accelerometers were used indicated that the discrepancies do not exceed 7.1 to 9.2 per cent. **Practical importance:** Virtual simulation allows to cut expenses and simplify study into causes of defects of mobile elevating work platforms. The proposed method allows to identify some constructive defects.

Mobile elevator, work platform, MEMS accelerometers, application module, SolidWorks Simulation, SolidWorks Motion, MATLAB matrix mathematical system, static analysis, modal analysis, wavelet decomposition.

Выявление дефектов мобильных подъёмников с рабочими платформами (МПП), согласно ГОСТ 53037-2013, связано с контролем большого количества параметров [3, 4]. В некоторых руководящих документах по грузоподъёмным машинам приведены наиболее вероятные повреждения металлоконструкций и предельные допустимые значения повреждений или дефектов изготовления (Приложение 15 РД 10-112-2-09) [14, с. 63], предельные отклонения параметров подъёмников (вышек) [15, с. 21]. К сожалению, большинство таких документов либо отменены [15], либо имеют статус организационно-ограниченного применения [14]. При техническом обслуживании и ремонте эксплуатируемых в организациях МПП обычно пользуются инструкциями по эксплуатации, в которых перечень контролируемых параметров МПП ограничен [5, 16, 17]. Одним из путей повышения достоверности оценок состояния МПП, расширения перечня параметров и их уточнения в условиях эксплуатации является применение сравнительных результатов натурных и модельных экспериментов. В предлагаемой работе оценивалась сходимость натурных экспериментов с использованием микроэлектромеханических систем (МЭМС) и результатов моделирования на основе совместного применения прикладных модулей SolidWorks Simulation, SolidWorks Motion и матричной математической системы MATLAB [6, 10, 13]. В качестве МПП рассматривался автомобильный гидравлический подъёмник с шарнирно-сочленённой стрелой ВС-22-МС, а контролируемыми параметрами являлись компоненты вектора линейного перемещения, полученные в результате двойного интегрирования данных с МЭМС акселерометров и с виртуальных датчиков линейных перемещений в прикладных модулях SolidWorks [1, 2].

Методика применения МЭМС-акселерометра

При проведении экспериментальных исследований использовалась МЭМС LSM303 DLHC. Акселерометр в МЭМС LSM303DLHC имеет четыре диапазона измерений линейных ускорений g с разными значениями минимального ускорения в младшем значащем бите (mg/LSB): $\pm 2g$ ($1mg/LSB$); $\pm 4g$ ($2mg/LSB$); $\pm 8g$ ($4mg/LSB$); $\pm 16g$ ($12mg/LSB$). Кроме того, в режиме низкого энергопотребления пропускная способность (полоса частот) равна $1/2$ частоты выходных данных при времени включения $1ms$, а в режиме нормального энергопотребления (гарантированного высокого разрешения) – $1/9$ частоты выходных данных при времени включения, равном 7 частотам выходных данных, ms . Ток потребления в режиме сна $1\mu A$, в режиме нормального энергопотребления – $110\mu A$ (частота выходных данных $50Hz$, напряжение питания $2,16-3,6V$). Ток потребления возрастает с увеличением частоты выходных данных [17]. Регистры МЭМС LSM303DLHC позволяли изменять режим энергопотребления при разной частоте выходных данных и настройку конфигурации высокочастотного фильтра, использовать два независимых прерывания и четыре диапазона ускорения, четыре режима буфера FIFO, два конфигурационных регистра для источника прерываний по высокому или низкому уровню ускорений по каждой координате, а также устанавливать величину порогов, максимальную и минимальную распознаваемую длительность события прерывания, включение однократного или двойного порога с настройкой интервала времени между ними, времени падения ускорения по соответствующей оси координат [18].

МЭМС LSM303DLHC может измерять постоянные ускорения, запоминать выходное

значение сенсора (ось направлена к центру Земли) и выходное значение сенсора после поворота оси на 180° (ось направлена в небо). В результате к акселерометру будет приложено ускорение, равное $\pm 1g$. Реальную чувствительность акселерометра МЭМС LSM303DLHC можно получить, вычтя большее значение из меньшего и разделив полученную разность пополам. Это значение почти не зависит от температуры и времени. Уровень смещения нуля описывает отклонение выдаваемого

сигнала от идеального в условиях отсутствия ускорения МЭМС LSM303DLHC. В стабильном состоянии на горизонтальной поверхности акселерометр измеряет $0g$ по оси X, $0g$ по оси Y и $1g$ по оси Z.

Автогидроподъемник ВС-22-МС (рис. 1) предназначен для подъема рабочих с инструментом и приспособлениями для строительно-монтажных или ремонтных работ. В соответствии с рекомендациями [15] расчётные положения подъемника представлены на рис. 2.

а



б

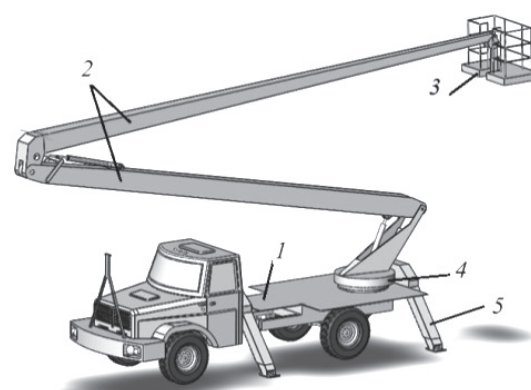


Рис. 1. Автогидроподъемник ВС-22-МС:

а) общий вид; б) схема; 1 – автомобиль; 2 – шарнирно сочлененная стрела; 3 – люлька; 4 – рама; 5 – выдвижная опора

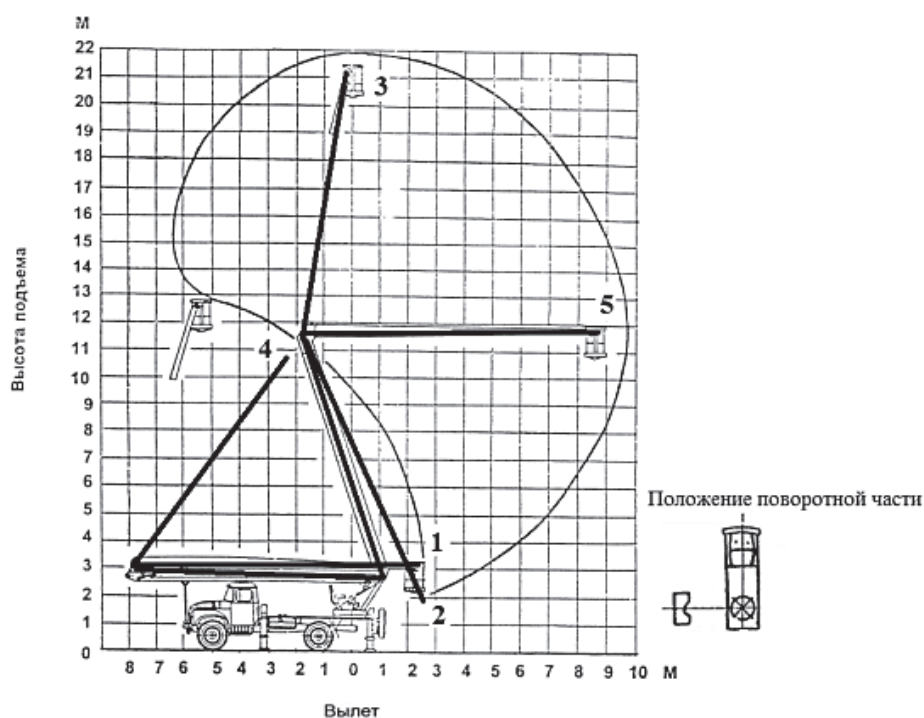


Рис. 2. Расчётные положения подъемника

Все дальнейшие исследования производили для положения 5.

На первом этапе исследований определяли сходимость результатов статического анализа и данных с МЭМС-акселерометров после их двойного интегрирования. В качестве оцениваемого параметра рассматривали прогибы отдельных составных частей шарнирно сочленённой стрелы под действием собственного веса. Напряженно-деформированное состояние шарнирно сочленённой стрелы приведено на рис. 3. Каждая последующая точка являлась опорной относительно предыдущей: самая удаленная точка 1; точка 2 – опорная относительно 1; точка 3 – опорная относительно 2; точка 4 – опорная относительно 3 (табл. 1).

Реконструкция пространственного портрета шарнирно сочленённой стрелы

По результатам измерения, полученным с помощью трёхкомпонентных акселерометров,

реконструировали пространственный портрет шарнирно сочленённой стрелы. Портрет представляет собой визуализацию НДС конструкции, сформированную на основе показаний датчиков, зафиксированных в её критических точках. Портрет позволяет оценить параметры упругих деформаций во всем диапазоне эксплуатационных режимов и внешних механических воздействий: любое изменение геометрических параметров или прочностных свойств вызывает изменение мод колебаний конструкции и как следствие – изменение портрета. Таким образом, можно прогнозировать эксплуатационные и прочностные свойства шарнирно сочленённой стрелы.

Чтобы составить достоверный портрет шарнирно сочленённой стрелы, необходимо установить акселерометры в местах, наиболее подверженных разрушению. Расположение этих мест не всегда очевидно без предварительных расчетов.

Одним из способов определения мест установки акселерометров является модели-

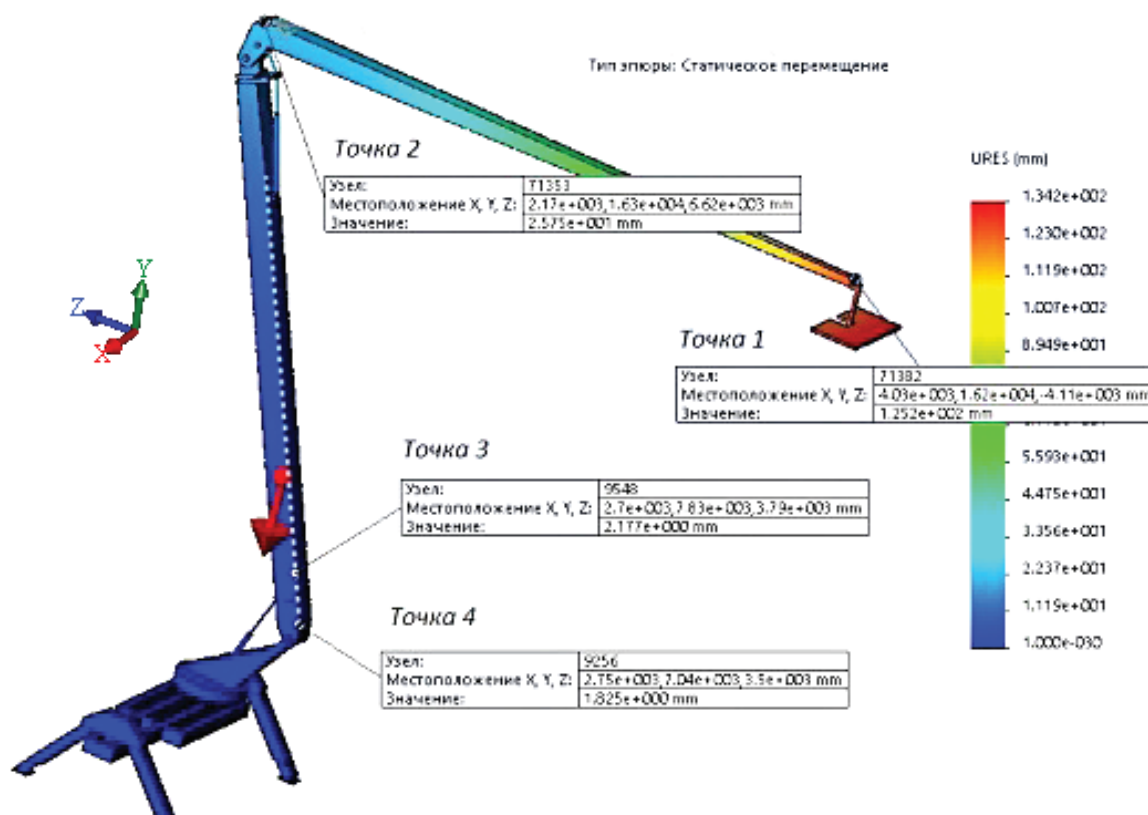


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние шарнирно сочленённой стрелы

ТАБЛИЦА 1. Результаты исследований

№ точки	Перемещения, мм	
	Моделирование	МЭМС
1	125,2	125,4
2	25,6	25,5
3	2,2	2,4
4	1,8	1,6

рование поведения исследуемой конструкции под воздействием внешних нагрузок с помощью расчетного модуля Simulation в программной среде SolidWorks. SolidWorks Simulation использовалась для получения данных напряженно-деформированного состояния составных частей шарнирно сочленённой стрелы.

Модальный анализ шарнирно сочленённой стрелы

В процессе моделирования собственные частоты и формы колебаний определяли на основании модального анализа, выполненного в SolidWorks Motion. SolidWorks Motion применяли, чтобы получить значения кинематических параметров взаимодействия составных частей шарнирно сочленённой стрелы между собой. Частотный анализ выполняли для определения собственных частот колебаний. Как известно, каждая частота собственных колебаний имеет определенную форму, или моду, колебаний. При модальном анализе использовался метод блочной итерации подпространств [9]:

$$K\vec{N} - \lambda B\vec{N} = 0,$$

где K – матрица жёсткости конструкции; $\vec{N}$ – собственный вектор; λ – собственное значение; $B = M$ – матрица массы в случае динамического анализа; в остальных случаях $B = Ks$ (Ks – матрица напряжения-жёсткости, создаваемая линеаризацией соответствующего нелинейно-

го оператора при решении задачи устойчивости).

Метод блочной итерации подпространства заключался в синхронных итерациях вектора в подпространстве заданного измерения. Каждый вектор, для которого завершён процесс сходимости итераций, удаляли из рабочего подпространства и на его место добавляли новый начальный вектор. Ортогональность векторов обеспечивалась на каждом шаге итераций. Применяли следующий критерий сходимости:

$$\left| \frac{\lambda_i^{k+1} - \lambda_i^k}{\lambda_i^k} \right| < tol,$$

где i, k – число форм и число шагов итераций, соответственно; tol – допуск, заданный в поле «Допуск».

Результаты модального анализа и анализа устойчивости [8] определяли с заданной точностью по формуле [9]:

$$\mu = \frac{\|\vec{N}_i - \lambda_i K^{-1} B \vec{N}_i\|}{\|\vec{N}_i\|}.$$

При медленном процессе сходимости применяли процедуру сдвига:

$$K_\sigma \vec{N} - \lambda B \vec{N} = 0,$$

где $K_\sigma = K - \sigma M$ (σ – значение сдвига).

По результатам модального анализа, выполненного в SolidWorks Motion, производили предварительную настройку программ-

руемого фильтра МЭМС LSM303DLHC [17]. Известно, что основная энергия колебаний распространяется на низких частотах. Однако при исследовании МППП трудно предварительно определить полосу фильтрующих частот без предварительных исследований. Поскольку фильтр «отбирает» только определенный участок из всего диапазона частот, он может «срезать» некоторые значимые возмущения. Высокочастотный фильтр сохраняет более высокие частоты выходных данных акселерометра за счёт ослабления более низких частот. Начальная частота выходного сигнала, ниже которой начинается ослабление, является частотой среза. Частоту среза высокочастотного фильтра (по уровню -3dB) определяли по формуле [19]

$$f_{\text{cutoff}} = \frac{0,318}{H_{\text{pc}}} \cdot \frac{ODRx}{2},$$

где $ODRx$ – частота выходных данных в текущей настройке акселерометра МЭМС; H_{pc} – коэффициент, используемый для расчета частоты среза высокочастотного фильтра (по уровню -3dB).

H_{pc} принимал значения 512, 1024, 2048, 4096. Уровень -3dB соответствует частоте среза, где волновой сигнал ослабляется до половины исходной мощности. Мощность волнового сигнала вычисляли как его амплитуду в квадрате, а частота среза определяла ослабление волнового сигнала до половины исходной мощности. Амплитуда ускорения акселерометра на частоте среза по уровню -3dB ослаблялась до 70,7% от значения, полученного в обход фильтра, а мощность – до половины.

Значения f_{cutoff} определяли для следующих частот выходных данных: 1; 10; 25; 50; 100; 200; 400; 1620; 1344 и 5376 Гц.

Расчетные случаи, соответствующие порядковым номерам мод колебаний, приведены в табл. 2. Графические результаты анализа второй формы колебаний шарнирно сочленённой стрелы при переходе из положения 1 в положение 2 и обратно даны на рис. 4, а эпюра ускорений, представляющая интенсивность и направление колебательных процессов, – на рис. 5.

Модальный анализ выполняли, чтобы определить численные значения деформаций по координатам X, Y, Z. В результате установлены коэффициенты массового участия (модальные массы) для каждой собственной частоты. В табл. 3 представлены коэффициенты массового участия (модальные массы) в глобальных направлениях X, Y и Z, нормализованных относительно общей массы.

Определение коэффициентов массового участия

Коэффициенты массового участия позволяют оценить значимость моды. Эти коэффициенты представляют процент массы системы, задействованной в конкретной моде. Чем ближе к единице коэффициент, соответствующий некоторому направлению, тем большая доля массы системы участвует в колебании в соответствии с некоторой формой в этом направлении. Он предоставляет меру энергии колебаний, заключенной в каждой моде.

ТАБЛИЦА 2. Расчетные случаи для порядковых номеров мод колебаний

Расчетный случай	Частотный (Рад/с)	Частотный (Гц)	Период (с)
1	5,09	0,81	1,23
2	7,58	1,20	0,83
3	8,16	1,30	0,77
4	14,38	2,29	0,44
5	19,48	3,10	0,32

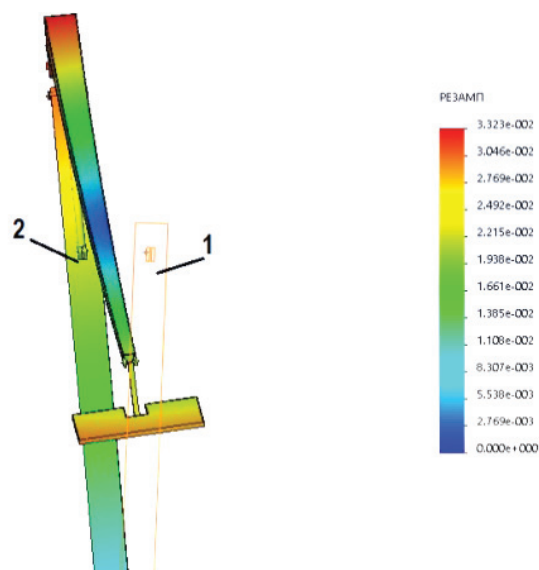


Рис. 4. Вторая форма колебаний (переход элемента конструкции из положения 1 в положение 2 и обратно)

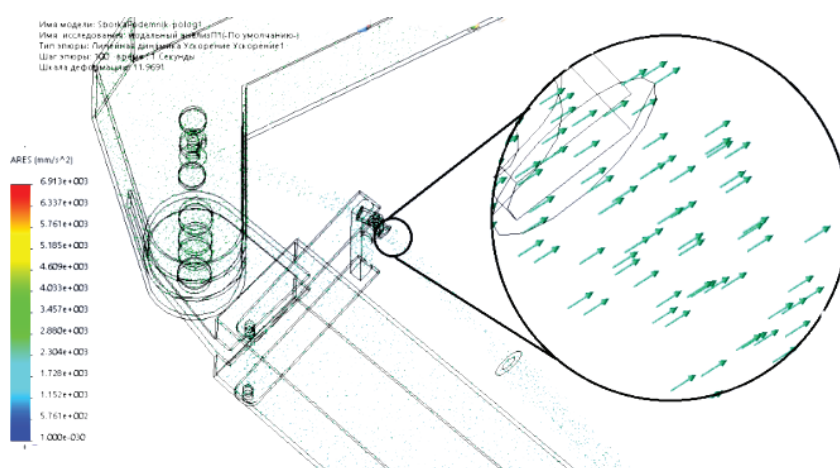


Рис. 5. Эпюра ускорений, представляющая интенсивность и направление колебательных процессов

ТАБЛИЦА 3. Коэффициенты массового участия

Расчетный случай	Частота (Гц)	Направление X	Направление Y	Направление Z
1	0,81082	0,19175	4,131e-007	0,025411
2	1,2063	0,080204	0,00063012	0,0030397
3	1,2985	0,00059726	0,032928	0,10141
4	2,2883	7,7439e-006	0,048308	0,24301
5	3,101	0,09649	0,0040028	0,2507
		Сумма по X = 0,36905	Сумма по Y = 0,085869	Сумма по Z = 0,62358

SolidWorks Motion рассматривает шарнирно сочленённую стрелу в виде группы недеформируемых элементов, результаты кинематического анализа которой в значительной степени отличаются от данных натурального эксперимента. Для уточнения результатов моделирования в расчётную схему вводили фиктивные шарниры с условными пружинами и демпфером, позволяющие создать имитацию деформации звеньев, влияющей на колебательный процесс (рис. 6, 7).

Результаты, полученные в SolidWorks Simulation, позволяют настроить жёсткостные

параметры фиктивных шарниров (рис. 8). Для выявления картины колебаний в схему вводили виртуальные датчики линейных перемещений, которые устанавливаются в точках 1 и 3 относительно точек 2 и 4. По ним определяли перемещение элементов шарнирно сочленённой стрелы и подбирали свойства фиктивного шарнира – коэффициент упругости пружины и постоянную демпфирования – такими, чтобы перемещения (во всех проекциях) и формы колебаний в точке установки датчиков в SolidWorks Simulation и Motion Analysis совпадали.

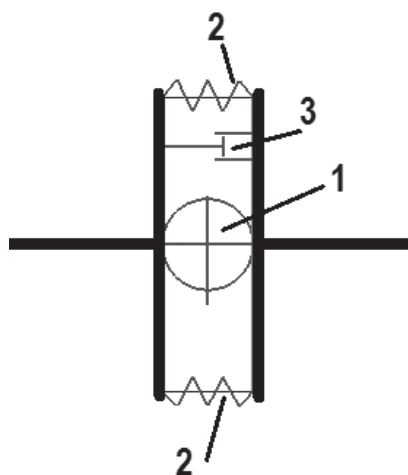


Рис. 6. Схема фиктивного шарнира:
1 – фиктивный шарнир; 2 – пружина;
3 – демпфер

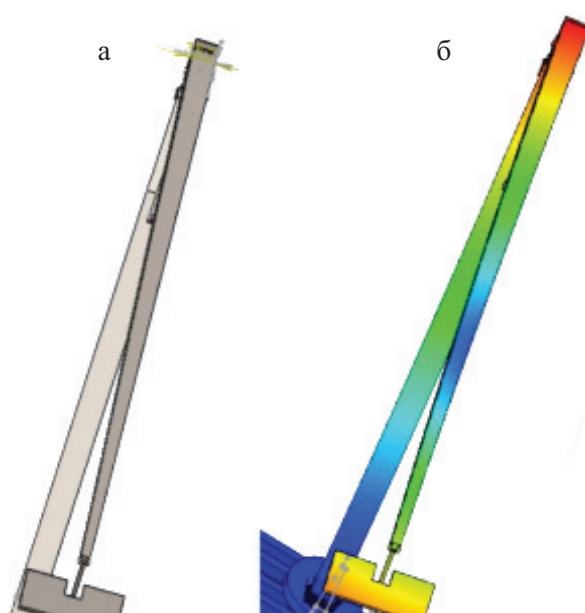


Рис. 7. Результаты модального анализа колена шарнирно сочленённой стрелы с фиктивным шарниром (а) и без него (б)

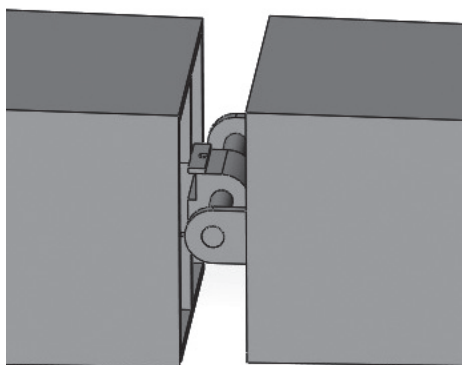


Рис. 8. Общий вид виртуального шарнира

Методика контроля резонансных частот

Методика контроля резонансных частот при заданной форме изгиба поясняется на рис. 9. Пример перемещения точки 1 относительно точки 2 по осям X, Y, Z представлен на рис. 10.

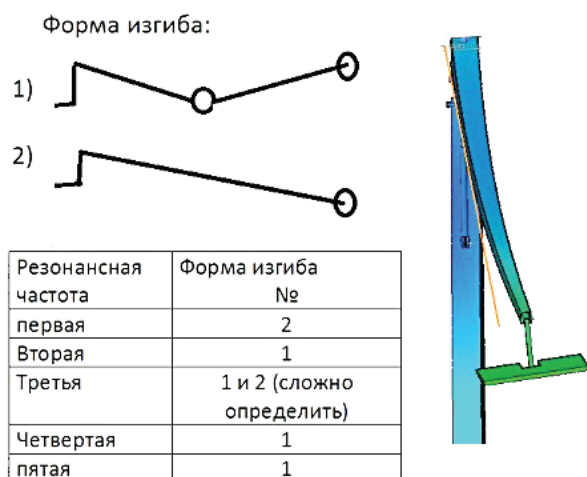


Рис. 9. Методика контроля резонансных частот по осям X, Y, Z

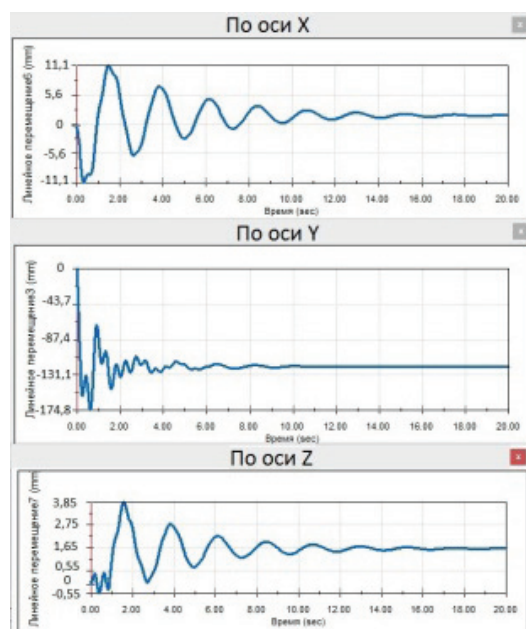


Рис. 10. Перемещение точки 1 относительно точки 2

Таким образом, введенные в конструкцию фиктивные шарниры позволяют моделиро-

вать как взаимодействие элементов шарнирно сочленённой стрелы между собой, так и их деформацию.

На следующем этапе исследований определяли изменение энергетической картины текущего состояния элементов шарнирно сочленённой стрелы по результатам wavelet-анализа в системе математического моделирования MATLAB. Применение wavelet-анализа позволило выделить в компонентах основного сигнала разложение сигнала по базису вейвлетов, пороговое значение шума для каждого уровня разложения, пороговую фильтрацию коэффициентов детализации, реконструкцию сигнала. Локализация и классификация особых точек, вычисление фрактальных характеристик, а также частотно-временной анализ нестационарных сигналов позволили выделить ряд дефектов элементов шарнирно сочленённой стрелы, представленных в эксплуатационных или руководящих документах.

Вейвлет-анализ

Характерный пример результатов вейвлет-анализа в двух- и трёхмерной форме представлен на рис. 11. Очевидно, что в данном примере выделение энергии в направлении оси Y больше, чем в направлениях X и Z. Расчётные вейвлет-коэффициенты для данного примера представлены в табл. 4.

Вейвлет-преобразование позволяет получить коэффициенты энтропии сигнала, которые показывают распределение энергии по частотам. Вейвлет-коэффициенты позволяют с помощью фигур Лиссажу установить их соответствие с явлениями, происходящими в элементах шарнирно сочленённой стрелы.

Результаты моделирования

Результаты моделирования применительно к [14] представлены в табл. 5. Графики в табл. 5 представляют собой приращения

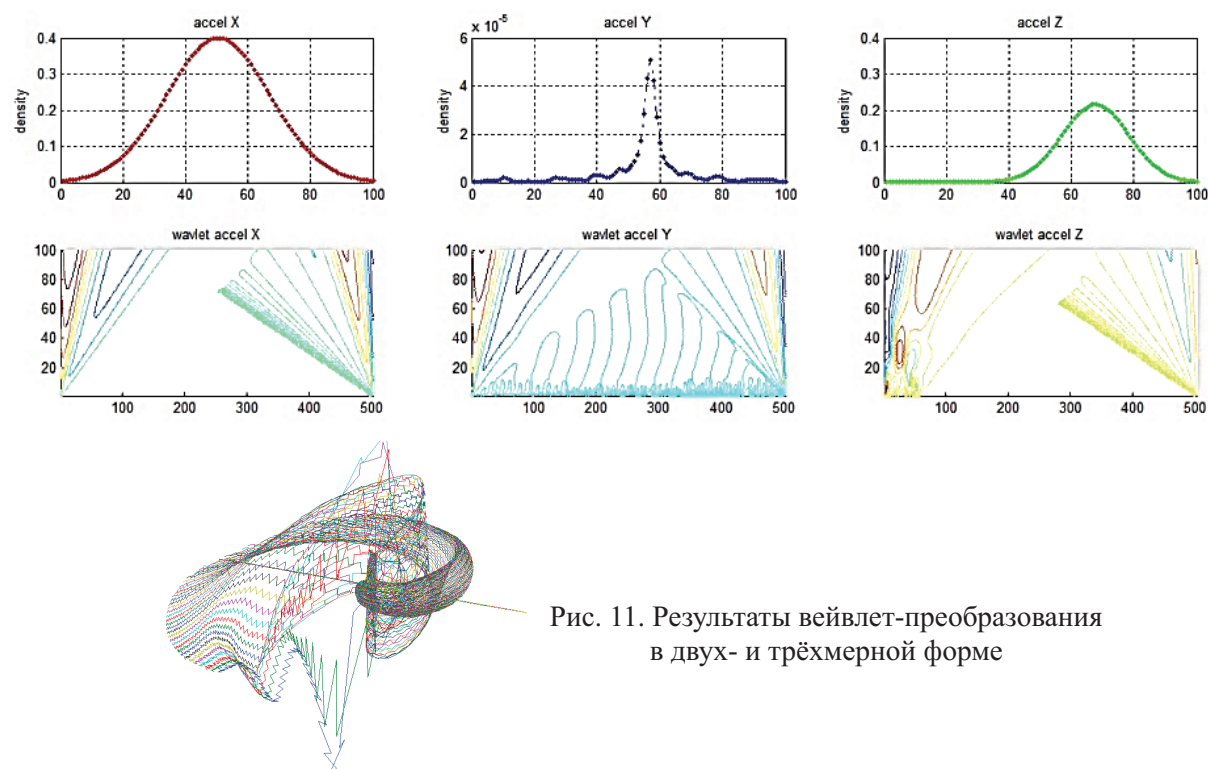


Рис. 11. Результаты вейвлет-преобразования в двух- и трёхмерной форме

ТАБЛИЦА 4. Расчётные вейвлет-коэффициенты

Е _е (соответствует оси X)	97,85791	1,192317	0,243878	0,341623	0,1451	0,028038	0,077647	0,113486
Е _п (соответствует оси Y)	97,81871	1,215328	0,248195	0,347187	0,147454	0,028568	0,079038	0,115519
Е _в (соответствует оси Z)	97,02764	1,58153	0,289532	0,425184	0,313857	0,134827	0,080477	0,14695

вейвлет-коэффициентов рассматриваемого дефектного состояния относительно исходного в двух- (третий столбец) и в трёхмерном (четвёртый столбец) изображении. Преимущества трёхмерного представления вибропортрета очевидны.

Заключение

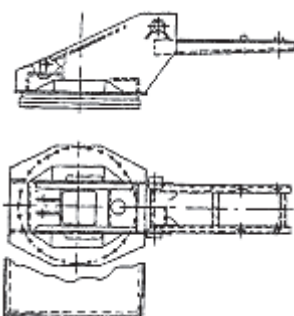
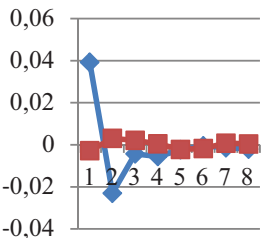
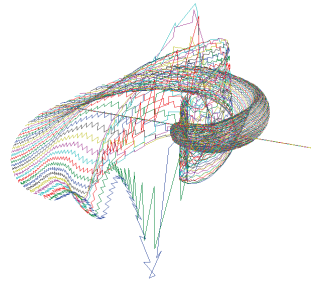
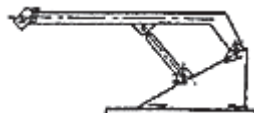
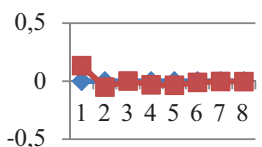
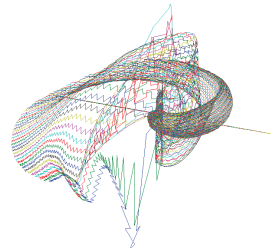
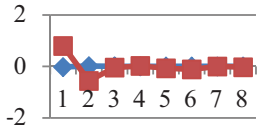
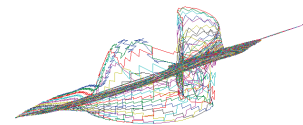
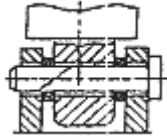
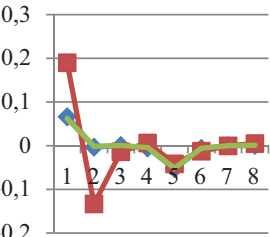
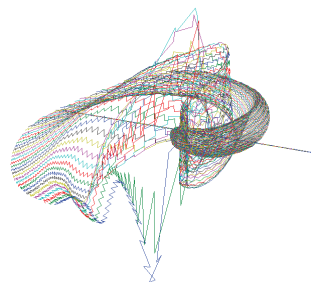
В ходе экспериментов установлено, что расхождение между результатами машинного и натурного экспериментов находится в диапазоне 7,1–9,2%.

Предлагаемая методика позволяет определять следующие дефекты в конструкции: тре-

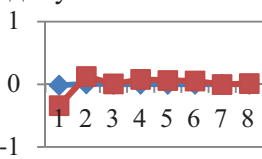
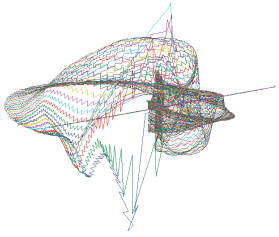
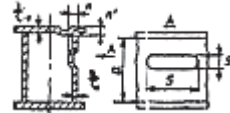
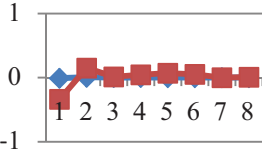
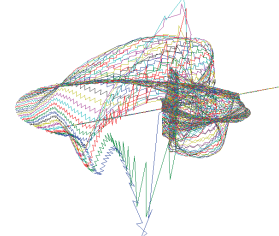
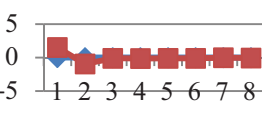
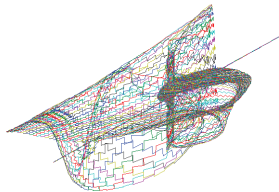
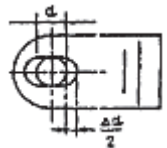
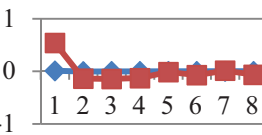
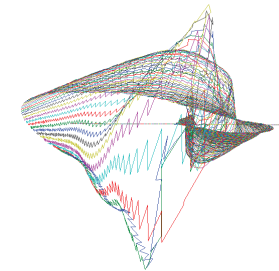
щины в сварных швах и в основном металле поворотной платформы, в сварных соединениях проушин колен и гидроцилиндров, в оси соединения гидроцилиндра с проушиной; выпуклость поясов и стенок сварных балок колен; местные деформации на поясах и стенках колен; скручивание коробчатых балок; выработку отверстий и валов; отклонение от прямолинейности оси колена. Преимущества трёхмерного представления вибропортрета очевидны.

Данная методика проявляет чувствительность и к остальным видам дефектов (уменьшению толщины элемента из-за коррозии, трещинам в сварных швах опорно-ходовой рамы с выносными опорами, изгибу опорно-

ТАБЛИЦА 5. Приращения вейвлет-коэффициентов

Наименование узла	Описание повреждения или дефекта	Зависимость количества выделяемой энергии в долях от полной (вертикальная ось графика) в каждом из рассмотренных восьми диапазонов частот (горизонтальная ось графика): синий – ось Y, красный – ось Z	Трёхмерное представление вибропортрета в виде приращения вейвлет-коэффициентов: синий – E_p , красный – E_v , зеленый – E_e (E_e – ось X, E_p – ось Y, E_v – ось Z)
1. Поворотная платформа			
Продольные и поперечные балки, зоны их соединения, элементы над ОПУ, кронштейны пяты стрелы, кронштейны гидроцилиндра подъема стрелы	Трещины в сварных швах и основном металле (не допускаются) 	Трещина в элементе над ОПУ размером 4×250 мм 	
2. Стрела			
Крепление стрелы к платформе (проушины стрелы и гидроцилиндров)	Трещины в сварных соединениях проушин с элементами стрелы (не допускаются) 	Трещина размером $60 \times 40 \times 1$ мм 	
Стрела в рабочем положении	Отклонение от прямолинейности оси стрелы в рабочем положении в плоскости стрелы ($f/L = 0,007$) 	Отклонение 40 мм при допуске 70 мм 	
Крепление гидроцилиндров телекопирования секций	Трещины в оси соединения гидроцилиндра с проушиной (не допускаются) 	Внутренняя трещина $\varnothing 1$ длиной 50 мм в оси $\varnothing 50$ мм 	

Окончание табл. 5

Наименование узла	Описание повреждения или дефекта	Зависимость количества выделяемой энергии в долях от полной (вертикальная ось графика) в каждом из рассмотренных восьми диапазонов частот (горизонтальная ось графика): синий – ось Y, красный – ось Z	Трёхмерное представление вибропортрета в виде приращения вейвлет-коэффициентов: синий – E_p , красный – E_v , зеленый – E_e (E_e – ось X, E_p – ось Y, E_v – ось Z)
3. Узлы металлоконструкций			
Листовые конструкции	Выпуклость поясов и стенок стрел сварных балок (для коробчатых стрел $f/a = 0,01$) 	Идентификация $f = 8$ мм при допуске 4 мм 	
	Местные вмятины на поясах и стенках стрел, балок и на других листовых элементах (стойках поворотных платформ, конструкциях рам шасси и др.) глубиной n с размерами $0,25 \leq S/Q \leq 0,75$ ($n/t = 3$, $n_1/t_1 = 3$) 	Идентификация $n = 20$ мм при допуске $n = 30$ мм 	
	Скручивание коробчатых и двутавровых балок ($f/H \leq 0,005 \times 0,001 L$ при $L \leq 2000$ мм $f/H \leq 0,003 \times 0,001 L$ при $L > 2000$ мм) 	Идентификация $f = 3$ мм при допуске $f = 4,5$ мм 	
	Проушины (под пальцы аутригеров, гидроцилиндров, элементов двуногий стойки, пяты стрелы, блоков и др.) 	Выработка вала Ø100 на 1 мм 	

ходовой рамы из плоскости стойки), но она не может их идентифицировать, поэтому необходимо продолжить работы в этом направлении.

Библиографический список

1. Алямовский А. А. Компьютерное моделирование в современной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собакин, Е. В. Одинцов и др. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
2. Барсуков В. С. Микросистемная спецтехника: интеграция и миниатюризация в одном флаконе / В. С. Барсуков // Спец. техника. – 2003. – № 4.
3. Власов В. Т. Физическая теория процесса «деформация – разрушение» / В. Т. Власов, А. А. Дубов. Ч. I. Физические критерии предельных состояний металла. – М. : ТИССО, 2007. – 517 с.
4. ГОСТ 53037-2013 (ИСО 16368:2010). Мобильные подъемники с рабочими платформами. Расчёты конструкции, требования безопасности, испытания. – М. : Стандартинформ, 2014. – 83 с.
5. Дубов А. А. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля : учеб. пособие / А. А. Дубов, Ал. А. Дубов, С. М. Колокольников. – М. : ТИССО, 2008. – 365 с.
6. Кобяков И. Знание векторных характеристик вибрации – ключ к безопасности технических устройств / И. Кобяков, А. Сперанский, А. Хориков и др. // Двигатель. – 2005. – № 2. – С. 8–11.
7. Кобяков И. Б. Трёхкомпонентный виброакселерометр для систем вибрационной диагностики технических систем / И. Б. Кобяков // Контроль. Диагностика. – 2001. – № 10. – С. 17–18.
8. Коровина М. С. Трёхкомпонентные МЭМС-датчики в системах мониторинга технического состояния специального самоходного подвижного состава / М. С. Коровина // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2013. – № 7. – С. 84–91.
9. Лепеш Г. В. Проектирование БМП. Решение инженерных задач на ЭВМ / Г. В. Лепеш. – СПб. : СПбГУСЭ ; ИИЦ «Сервис», 2006. – 172 с.
10. Материалы I междунар. науч.-технич. конф. «Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла» : докл. и тезисы докл. – М. : Энергосистема, 1999.
11. Материалы II междунар. науч.-технич. конф. «Диагностика оборудования и конструкций с ис-

пользованием магнитной памяти металла» : докл. и тезисы докладов. – М. : Энергосистема, 2001.

12. Материалы III междунар. науч.-технич. конф. «Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла» : докл. и тезисы докладов. – М. : Энергосистема, 2003.

13. Материалы IV междунар. науч.-технич. конф. «Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла» : докл. и тезисы докладов. – М. : Энергосистема, 2007.

14. РД-10-112-2-09. Методические рекомендации по экспертному обследованию грузоподъемных машин. Ч. 2. Краны стреловые общего назначения и краны-манипуляторы грузоподъемные. – М. : Изд-во ООО «НИИкраностроения», 2009. – 120 с.

15. РД-10-112-97. Методические указания по проведению обследования технического состояния подъемников (вышек) с истекшим сроком службы с целью определения возможности их дальнейшей эксплуатации. Ч. 9. Подъемники и автовышки. – М. : ВКТИмонтажстроймеханизация, 1998. – 73 с.

16. Смирнов В. Я. Измерение параметров вибрации : состояние и перспективы / В. Я. Смирнов // Мир измерений. – 2002. – № 9–10. – С. 6–13.

17. LIS3LV02DL MEMS inertial sensor rev. 2 by STMicroelectronics. LIS3LV02DQ MEMS inertial sensor rev. 1.

18. LSM303DLHC STMicroelectronics. – URL : <http://www.st.com>.

19. XAudio2. – URL : <http://charlespetzold.com>.

References

1. Alyamovskiy A. A., Sobachkin A. A., Oditsov Ye. V., Kharitonov A. I. & Ponomarev N. B. Kompyuternoye modelirovaniye v sovremennoy praktike [Computer Simulation in Modern Practice]. St. Petersburg, BKhV-Petersburg, 2005. 800 s.
2. Barsukov V. S. *Spetsialnaya tekhnika – Special Equipment*, 2003, no. 4.
3. Vlasov V. T. & Dubov A. A. Fizicheskaya teoriya protsessy “deformatsiya – razrusheniye”. Ch. I. Fizicheskiye kriterii predelnykh sostoyaniy metalla [Physical Theory of Deformation – Destruction Process. Pt. 1. Physical Criteria of Metal Limit States]. Moscow, TISSO, 2007. 517 p.
4. GOST 53037-2013 (ISO 16368: 2010). Mobilnyye podyemniki s rabochimi platformami [Mobile

Elevating Work Platforms]. Moscow, Standartinform, 2014. 83 p.

5. Dubov A.A., Dubov A.I. & Kolokolnikov S.M. Metod magnitnoy pamyati metalla i pribory kontrolya: uchebnoye posobiye [Metal Magnetic Memory Method and Monitors: Course Guide]. Moscow, TISSO, 2008. 365 p.

6. Kobyakov I., Speranskiy A., Khorikov A., Shatokhin A. & Kalinin S. *Dvigatel – Engine*, 2005, no. 2, pp. 8-11.

7. Kobyakov I.B. *Kontrol. Diagnostika – Control. Diagnostics*, 2001, no. 10, pp. 17-18.

8. Korovina M.S. *Izvestiya SPbGETU LETI – Proc. of Saint Petersburg Electrotechnical University LETI*, 2013, no. 7, pp. 84-91.

9. Lepesh G.V. Proyektirovaniye BMP. Resheniye inzhenernykh zadach na EVM. [Armoured Personnel Carrier Design. Computer Solution of Engineering Problems]. St Petersburg, SPbGUSE, IITs Servis, 2006. 172 p.

10. Materialy I mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Diagnostika oborudovaniya i konstruktsiy s ispolzovaniyem magnitnoy pamyati metalla”: doklady i tezisy dokladov [Materials of the 1st Int. Sci. and Tech. Conf. “Diagnostics of Equipment and Elements with the Use of Metal Magnetic Memory”: Reports and Abstracts]. Moscow, Energo-diagnostics, 1999.

11. Materialy II mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Diagnostika oborudovaniya i konstruktsiy s ispolzovaniyem magnitnoy pamyati metalla”: doklady i tezisy dokladov [Materials of the 2nd Int. Sci. and Tech. Conf. “Diagnostics of Equipment and Elements with the Use of Metal Magnetic Memory”: Reports and Abstracts]. Moscow, Energo-diagnostics, 2001.

12. Materialy III mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Diagnostika oborudovaniya i konstruktsiy s ispolzovaniyem magnitnoy pamyati metalla”: doklady i tezisy dokladov [Materials of the

3rd Int. Sci. and Tech. Conf. “Diagnostics of Equipment and Elements with the Use of Metal Magnetic Memory”: Reports and Abstracts]. Moscow, Energo-diagnostics, 2003.

13. Materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Diagnostika oborudovaniya i konstruktsiy s ispolzovaniyem magnitnoy pamyati metalla”: doklady i tezisy dokladov [Materials of the 4th Int. Sci. and Tech. Conf. “Diagnostics of Equipment and Elements with the Use of Metal Magnetic Memory”: Reports and Abstracts]. Moscow, Energo-diagnostics, 2007.

14. RD-10-112-2-09. Metodicheskiye rekomendatsii po ekspertnomu obsledovaniyu gruzopodyemnykh mashin. Ch. 2. Krany strelkovyye obshchego naznacheniya i krany-manipulyatory gruzopodyemnyye [Methodological Recommendations for Expert Inspection of Lifting Machines. Pt. 2. General-Purpose Jib Cranes and Load-Lifting Loader Cranes]. Moscow, Izdatelstvo OOO NII Kranostroyeniya, 2009. 120 p.

15. RD-10-112-97. Metodicheskiye ukazaniya po provedeniyu obsledovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya podyemnikov (vyshek) s istekshim srokom sluzhby s tselyu opredeleniya vozmozhnosti ikh dalneyshey ekspluatatsii. Ch. 9. Podyemniki i avtovyshki [Methodological Directions for Conducting Inspection of Technical Condition of Lifts (Derricks) with Expired Service Term for the Purpose of Determining Possibility of Their Further Operation. Pt. 9. Lifts and Elevated Work Platforms]. Moscow, VKTI montazhstroymekhanizatsiya, 1998. 73 p.

16. Smirnov V.Ya. *Mir izmereniy – Measurement World*, 2002, no. 9-10, pp. 6-13.

17. LIS3LV02DL MEMS inertial sensor rev. 2 by STMicroelectronics. LIS3LV02DQ MEMS inertial sensor rev. 1.

18. LSM303DLHC STMicroelectronics, available at: <http://www.st.com>.

19. XAudio2, available at: <http://charlespetzold.com>.

БАТУЛИН Ян Семёнович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, yan-roos@yandex.ru; *КОРОВИН Сергей Константинович – канд. техн. наук, доцент, big-bernar@yandex.ru; КОРОВИНА Мария Сергеевна – ассистент, rgups2013@yandex.ru; ОРЛОВ Сергей Васильевич – канд. техн. наук, доцент, orlov@spbmmuseum.ru; ПОТАХОВ Денис Александрович – студент, schan-di@mail.ru; ПОТАХОВ Егор Александрович – студент, schan-di@mail.ru, (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 681.518.5:004.052.32

Д. В. Ефанов**ПРИМЕНЕНИЕ РАВНОВЕСНОГО КОДА «2 ИЗ 4»
ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ**

Дата поступления: 11.04.2016

Решение о публикации: 05.06.2016

Цель: Исследовать особенности применения равновесных кодов «1 из 4» и «2 из 4» при организации систем функционального контроля методом логического дополнения. **Методы:** Используются методы теории информации и кодирования, теории дискретных устройств и технической диагностики дискретных систем. **Результаты:** Формализованы правила вычисления функций логического дополнения разрядов векторов рабочих функций систем функционального контроля до разрядов равновесного кода «2 из 4». Данные правила обеспечивают свойство полной самопроверяемости блока логического дополнения и тестера в схеме контроля. В эксперименте с контрольными комбинационными схемами LGSynth'89 показано, что могут быть получены системы функционального контроля, организованные по коду «2 из 4» с меньшей структурной избыточностью, чем системы, организованные по коду «1 из 4». На характеристики системы функционального контроля можно влиять на этапе их разработки, варьируя дополняемые разряды вектора рабочих функций. Кроме того, оба кода обладают высокой обнаруживающей способностью в системах функционального контроля и идентифицируют большее количество искажений, чем часто применяемые коды с суммированием. **Практическая значимость:** Использование равновесного кода «2 из 4» позволяет организовывать системы функционального контроля с небольшой структурной избыточностью, при этом обеспечивается важнейшее их свойство – полная самопроверяемость.

Система функционального контроля, логическое дополнение, код с суммированием, равновесный код, код «1 из 4», код «2 из 4», структурная избыточность, необнаруживаемая ошибка.

Dmitry V. Efanov, Cand. Eng., associate professor, TrES-4b@yandex.ru (Petersburg State Transport University) APPLICATION OF THE 2-OUT-OF-4 CONSTANT-WEIGHT CODE IN ORGANISING CONCURRENT ERROR DETECTION SYSTEMS

Objective: To study specific features of application of 1-out-of-4 and 2-out-of-4 constant-weight codes in organising concurrent error detection systems by Boolean complement method. **Methods:** Information and coding theory, discrete devices theory, and discrete devices' technical diagnostics methods were applied. **Results:** Rules for calculation of Boolean complement functions of vector classes of operating functions of concurrent error detection systems up to 2-out-of-4 constant-weight code positions were formalised. These rules ensure quality of totally self-checkability of Boolean complement block and checker in checking circuit. An experiment with LGSynth'89 Benchmarks indicated that concurrent error detection systems can be produced organised on the 2-out-of-4 code with lesser structure redundancy than those organised on the 1-out-of-4 code. Concurrent error detection system characteristics can be influenced at the development stage by varying complemented positions of operating functions vector. Besides, both codes possess high detection ability in concurrent error detection systems and identify more distortions than the often-used sum codes. **Practical importance:** Application of the 2-out-of-4 constant-weight code allows to organise concurrent error detection systems with low structure redundancy and at the same time their most important quality, totally self-checkability, is ensured.

Concurrent error detection system, Boolean complement, sum code, constant-weight code, 1-out-of-4 code, 2-out-of-4 code, structure redundancy, undetectable error.

При синтезе надежных дискретных устройств часто применяют системы обнаружения ошибок в логических блоках и узлах. Данные системы основываются на использовании парафазного кодирования или же на методах функционального контроля [7, 10]. При реализации логического устройства в парафазной логике каждый сигнал представляется в виде пары значений $\langle 01 \rangle$ или $\langle 10 \rangle$ – так называемого парафазного сигнала. При возникновении неисправности на выходе какого-либо логического элемента нарушается парафазность сигнала на выходе схемы, что и служит признаком ошибки. Такой подход требует существенной избыточности схемы. Альтернативой применения парафазного кодирования является использование систем функционального контроля логических устройств. В такой системе контролируемое логическое устройство $F(x)$ снабжается специальной схемой контроля, позволяющей в процессе его эксплуатации выполнять также техническое диагностирование [5]. В основе системы функционального контроля, как правило, лежит заранее установленный помехоустойчивый код с высокой кодовой скоростью. Часто в качестве таких кодов используют коды Бергера и их модификации [1, 8, 11, 15].

На рис. 1 изображена традиционная структурная схема системы функционального контроля, в основу которой положен систематический (m, k) -код, где m и k – длина информационных и контрольных векторов, соответственно [18, 19]. В ней контролируемое логическое устройство $F(x)$, вычисляющее систему булевых функций $f_1, f_2, \dots, f_m$, дополняется блоком контрольной логики $G(x)$, формирующим значения системы контрольных функций $g_1, g_2, \dots, g_k$, и тестером TSC . Выходы блока $F(x)$ отождествляют с информационным вектором (m, k) -кода, а выходы блока $G(x)$ – с контрольным вектором данного кода. Тестер в системе функционального контроля выполняет функцию проверки в процессе эксплуатации соответствия значений разрядов информационного и контрольного векторов.

Важнейшим свойством системы функционального контроля является обеспечение полной самопроверяемости тестера как устройства, выполняющего роль «последнего сторожа». Это подразумевает наличие возможности формирования защитного сигнала хотя бы на одном входном наборе при несоответствии значений разрядов информационного и контрольного векторов, а также в случае возникновения собственных неисправностей тестера.

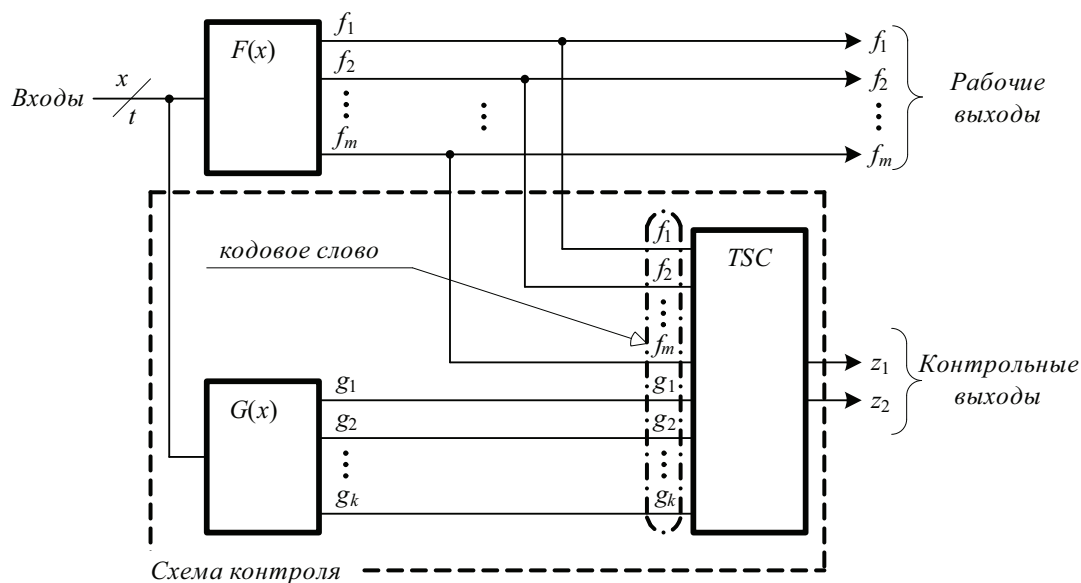


Рис. 1. Традиционная структура системы функционального контроля

Недостатком традиционной структуры системы функционального контроля является то, что для выбранного (m,k) -кода ее техническая реализация будет единственной. Это не дает разработчику системы функционального контроля возможности влиять на ее характеристики, такие как структурная избыточность, обнаруживающая способность, контролепригодность и т.д. В [4, 6, 17] описана структура логического дополнения, лишенная этого недостатка.

В системе функционального контроля на основе логического дополнения (рис. 2), в отличие от традиционной структуры, применен блок логического дополнения. Данный блок образован каскадом сумматоров по модулю «два», предназначенных для преобразования рабочих функций f_i в контрольные функции g_i по правилу

$$h_i = f_i \oplus g_i.$$

Использование блока логического дополнения позволяет в качестве основы системы функционального контроля выбирать любой блочный код, в том числе неразделимый. При этом возможен выбор преобразуемых функций f_i в кодовое слово выбранного кода.

В [3, 14, 16, 20] описано приложение равновесных кодов «1 из 3» (1/3-кодов) и «1 из 4» (1/4-кодов) при организации системы функционального контроля. Выходы контролируемого устройства $F(x)$ разбиваются на группы

по 3 или 4 выхода в каждой, для контроля каждой группы используется 1/3-TSC или 1/4-TSC (в зависимости от выбранного кода), выходы же тестеров объединяются на входах специальных схем сжатия парафазных сигналов с целью организации контроля только одного парафазного выхода [7].

Применение равновесных кодов с небольшой длиной кодового слова обусловлено простотой обеспечения свойства полной самопроверяемости тестера. Например, для полной проверки 1/4-TSC требуется подача на его входы четырех векторов {0001; 0010; 0100; 1000}. Для организации контроля логических устройств можно применить и равновесный код «2 из 4» (2/4-код), тестер с максимальной простотой реализацией которого обладает такой же длиной проверяющего теста, как и 1/4-TSC: {0011; 1100; 1001; 0110} [9].

Данная работа представляет результаты анализа применения 1/4- и 2/4-кодов при организации систем функционального контроля на примере контрольных комбинационных схем LGSynth'89 [13].

Системы контроля на основе 1/4- и 2/4-кодов

На рис. 3 и 4 изображены структуры системы функционального контроля на основе

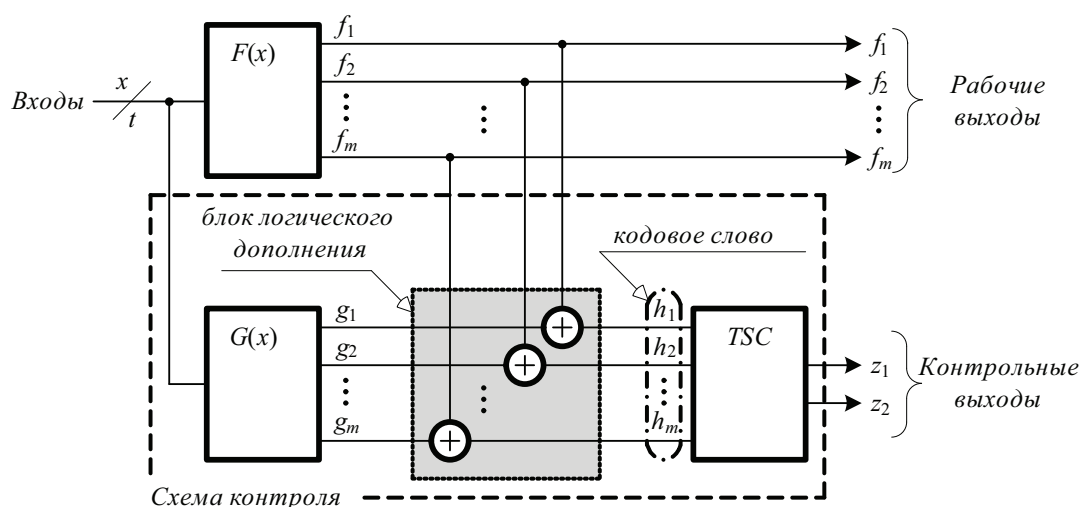


Рис. 2. Структура системы функционального контроля на основе логического дополнения

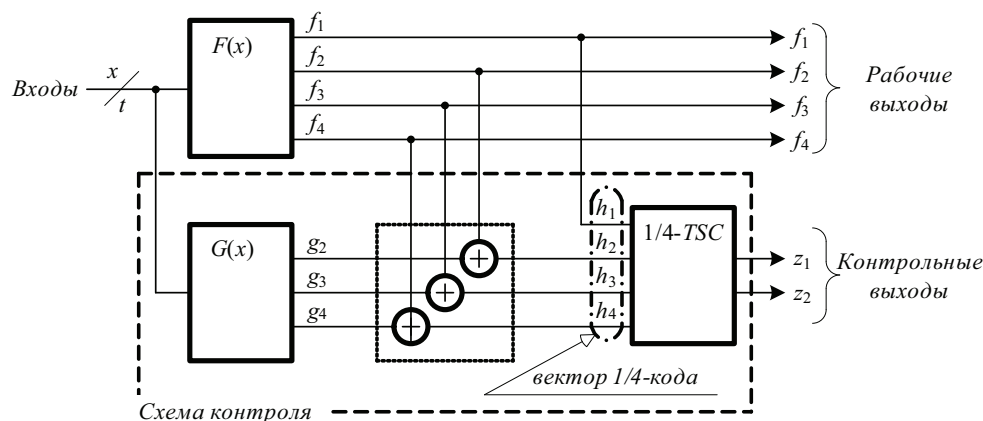


Рис. 3. Структура системы функционального контроля на основе 1/4-кода

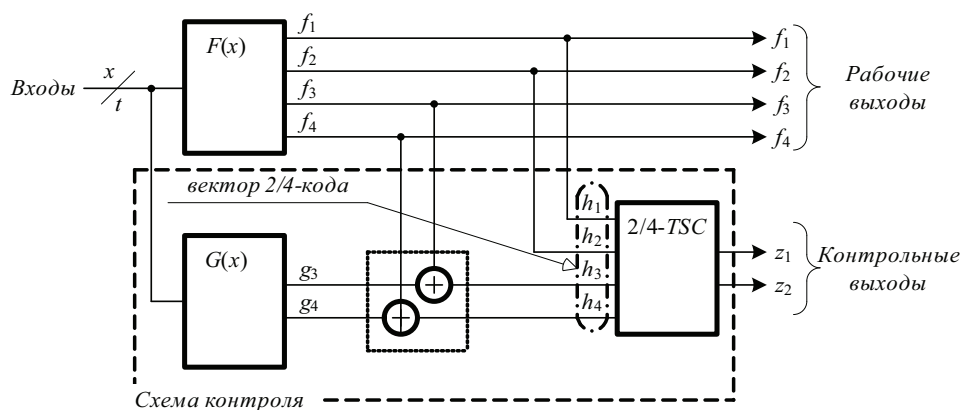


Рис. 4. Структура системы функционального контроля на основе 2/4-кода

1/4- и 2/4-кодов. При построении системы функционального контроля на основе 1/4-кода требуется дополнить любые три рабочие функции, что всегда обеспечивает формирование векторов 1/4-кода. При этом сами функции логического дополнения могут быть определены по следующим правилам [6, 16]:

$$\begin{cases} g_1 = 0; \\ g_2 = f_1 f_2; \\ g_3 = (f_1 \vee f_2) f_3; \\ g_4 = (f_1 \vee f_2 \vee f_3) f_4 \vee \overline{f_1 f_2 f_3 f_4}. \end{cases} \quad (1)$$

При организации системы контроля на основе 2/4-кода удастся минимизировать количество сумматоров по модулю «два» в блоке логического дополнения (рис. 4). Это уменьшает количество функций дополнения

и, соответственно, структурную избыточность схемы контроля. Сами функции логического дополнения вычисляются по правилам:

$$\begin{cases} g_1 = 0; \\ g_2 = f_1 f_2 \vee \overline{f_1 f_2} = \overline{f_1 \oplus f_2}; \\ g_3 = 0; \\ g_4 = f_3 f_4 \vee \overline{f_3 f_4} = \overline{f_3 \oplus f_4}. \end{cases} \quad (2)$$

Эксперимент с контрольными комбинационными схемами

Для определения эффективности приложения 2/4-кода при организации систем функционального контроля были поставлены эксперименты с контрольными комбинационными схемами LGSynth'89. В эксперименте оценивались показатели структурной избыточности

систем функционального контроля, а также показатели обнаруживающей способности.

Для получения результатов использовали специально разработанный программный комплекс, позволяющий синтезировать файлы – описания систем функционального контроля различными методами и симулировать одиночные неисправности в контрольных комбинационных схемах. Для ряда комбинационных схем с четырьмя выходами определены характеристики систем функционального контроля, организованных по методу логического дополнения на основе 1/4- и 2/4-кодов. При этом были проанализированы все возможные варианты логического дополнения, а именно все $4! = 24$ варианта дополнения функций. В таблице приведены результаты эксперимента для одной контрольной комбинационной схемы z4ml.

Для каждого варианта организации системы функционального контроля, полученного с использованием формул (1) и (2) путем всех возможных перестановок разрядов в векторе рабочих функций, вычислены значения площади систем функционального контроля L (в усл. ед.) и количество необнаруживаемых в контролируемой схеме ошибок D (в шт.). Для расчета площади систем функционального контроля был использован интерпретатор SIS [21], позволяющий анализировать свойства логических схем. Площадь блоков системы функционального контроля ($L_{1/4}^S$ и $L_{2/4}^S$) оценивалась по библиотеке функциональных элементов stdcell2_2.genlib. Анализатор одиночных неисправностей интегрирован в разработанный программный комплекс, а данные анализа занесены в столбцы $D_{1/4}^S$ и $D_{2/4}^S$ таблицы.

На основе полученных экспериментальных данных рассчитан ряд показателей систем функционального контроля:

1) структурная избыточность по отношению к площади схемы

$$\delta_{1/4} = \frac{L_{1/4}^S}{L_{F(x)}} \cdot 100 \% \quad \text{и} \quad \delta_{2/4} = \frac{L_{2/4}^S}{L_{F(x)}} \cdot 100 \%;$$

2) коэффициент эффективности по структурной избыточности 2/4-кода по отношению к 1/4-коду

$$\chi = \frac{L_{2/4}^S}{L_{1/4}^S} \cdot 100 \%;$$

3) обнаруживающая способность кода по отношению к максимальному количеству ошибок в схеме ($D_{\max}$)

$$\gamma_{1/4} = \frac{D_{1/4}^S}{D_{\max}} \cdot 100 \% \quad \text{и} \quad \gamma_{2/4} = \frac{D_{2/4}^S}{D_{\max}} \cdot 100 \%;$$

4) коэффициент эффективности по обнаруживающей способности 2/4-кода по отношению к 1/4-коду

$$\mu = \frac{D_{2/4}^S}{D_{1/4}^S} \cdot 100 \%.$$

В 22 случаях из 24 система функционального контроля для схемы z4ml, организованная по 2/4-коду, имеет меньшую площадь, чем система контроля на основе 1/4-кода. В некоторых случаях при использовании 2/4-кода удастся уменьшить площадь системы функционального контроля практически на 25 % по сравнению с площадью системы контроля на основе 1/4-кода. В среднем коэффициент эффективности по структурной избыточности 2/4-кода по отношению к 1/4-коду в системе функционального контроля для схемы z4ml составил $\chi = 88,182 \%$.

По характеристикам обнаруживающей способности код 2/4 также выигрывает у кода 1/4. Минимальное количество необнаруживаемых ошибок в системе функционального контроля на основе 1/4-кода равно 56, а на основе 2/4-кода – 16. Среднее значение коэффициента эффективности по обнаруживающей способности 2/4-кода по отношению к 1/4-коду составило $\mu = 60,958 \%$.

Отметим также, что все необнаруживаемые 1/4- и 2/4-кодами ошибки имеют кратность $d = 2$. Общее же количество двукратных оши-

Экспериментальные результаты

#	Замена выходов контрольной схемы	Показатели структурной избыточности						Показатели обнаруживающей способности				
		$L_{F(x)}$, усл. ед.	$L_{1/4}^S$, усл. ед.	$\delta_{1/4}$, %	$L_{2/4}^S$, усл. ед.	$\delta_{2/4}$, %	χ , %	$D_{1/4}^S$, ош.	$D_{2/4}^S$, ош.	$\gamma_{1/4}$, %	$\gamma_{2/4}$, %	μ , %
1	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow \langle f_{1,2}f_{3,4}f_1 \rangle$	1184	3360	283,784	2528	213,514	75,238	66	16	1,583	0,384	24,242
2	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow \langle f_{1,2}f_{3,4}f_2 \rangle$	1184	3632	306,757	2528	213,514	69,604	56	48	1,344	1,152	85,714
3	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow \langle f_{1,2}f_{3,4}f_3 \rangle$	1184	3352	283,108	3200	270,27	95,465	66	64	1,583	1,536	96,97
4	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow \langle f_{1,2}f_{3,4}f_4 \rangle$	1184	4200	354,73	3464	292,568	82,476	56	64	1,344	1,536	114,286
5	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow \langle f_{1,2}f_{3,4}f_2f_3 \rangle$	1184	3384	285,811	3200	270,27	94,563	62	48	1,488	1,152	77,419
6	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow \langle f_{1,2}f_{3,4}f_3f_2 \rangle$	1184	3856	325,676	3464	292,568	89,834	62	16	1,488	0,384	25,806
7	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow \langle f_{1,2}f_{3,4}f_3f_4 \rangle$	1184	3360	283,784	2528	213,514	75,238	66	48	1,583	1,152	72,727
8	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow \langle f_{2,3}f_{1,4}f_3 \rangle$	1184	3632	306,757	2528	213,514	69,604	56	16	1,344	0,384	28,571
9	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow \langle f_{2,3}f_{1,4}f_4 \rangle$	1184	3352	283,108	3200	270,27	95,465	66	48	1,583	1,152	72,727
10	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow \langle f_{2,3}f_{1,4}f_3f_4 \rangle$	1184	4200	354,73	3200	270,27	76,19	56	16	1,344	0,384	28,571
11	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow \langle f_{2,3}f_{1,4}f_3f_4f_1 \rangle$	1184	3384	285,811	3200	270,27	94,563	62	64	1,488	1,536	103,226
12	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow \langle f_{2,3}f_{1,4}f_3f_4f_2 \rangle$	1184	3856	325,676	3464	292,568	89,834	62	64	1,488	1,536	103,226
13	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow \langle f_{3,1}f_{2,4}f_3f_4 \rangle$	1184	3584	302,703	3464	292,568	96,652	82	64	1,967	1,536	78,049

Окончание таблицы

#	Замена вы- ходов кон- трольной схемы	Показатели структурной избыточности						Показатели обнаруживающей способности				
		$L_{F(x)}$, усл. ед.	$L_{1/4}$, усл. ед.	$\delta_{1/4}$, %	$L_{2/4}$, усл. ед.	$\delta_{2/4}$, %	χ , %	$D_{1/4}^S$, ош.	$D_{2/4}^S$, ош.	$\gamma_{1/4}$, %	$\gamma_{2/4}$, %	μ , %
14	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow$ $\langle f_{3,1}f_{4,2} \rangle$	1184	3896	329,054	3200	270,27	82,136	60	64	1,44	1,536	106,667
15	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow$ $\langle f_{3,2}f_{4,1} \rangle$	1184	3584	302,703	3464	292,568	96,652	82	16	1,967	0,384	19,512
16	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow$ $\langle f_{3,2}f_{4,1} \rangle$	1184	3896	329,054	3200	270,27	82,136	60	48	1,44	1,152	80
17	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow$ $\langle f_{3,4}f_{2,1} \rangle$	1184	3024	255,405	2528	213,514	83,598	86	16	2,063	0,384	18,605
18	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow$ $\langle f_{3,4}f_{2,1} \rangle$	1184	3024	255,405	2528	213,514	83,598	86	48	2,063	1,152	55,814
19	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow$ $\langle f_{4,1}f_{2,3} \rangle$	1184	2936	247,973	3464	292,568	117,984	104	16	2,495	0,384	15,385
20	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow$ $\langle f_{4,1}f_{2,3} \rangle$	1184	3584	302,703	3200	270,27	89,286	88	48	2,111	1,152	54,545
21	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow$ $\langle f_{4,2}f_{3,1} \rangle$	1184	2936	247,973	3464	292,568	117,984	104	64	2,495	1,536	61,538
22	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow$ $\langle f_{4,2}f_{3,1} \rangle$	1184	3584	302,703	3200	270,27	89,286	88	64	2,111	1,536	72,727
23	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow$ $\langle f_{4,3}f_{1,2} \rangle$	1184	2992	252,703	2528	213,514	84,492	96	48	2,303	1,152	50
24	$\langle f_{1,2}f_{3,4} \rangle \rightarrow$ $\langle f_{4,3}f_{2,1} \rangle$	1184	2992	252,703	2528	213,514	84,492	96	16	2,303	0,384	16,667
Средние значения		1184	3483,333	294,201	3053	257,855	88,182	73,667	42,667	1,767	1,024	60,958

бок для схемы $z4m1$ равно 128. Равновесными кодами идентифицируются все 4008 одиночных ошибок и 32 трехкратные ошибки. К слову, классическим кодом Бергера [12] в системе функционального контроля для схемы $z4m1$ не обнаруживаются все 128 двукратных ошибки, а модифицированным кодом Бергера, предложенным в [2], – 64.

Анализируя показатели как структурной избыточности, так и обнаруживающей способности систем функционального контроля, отметим доминирующее положение 2/4-кода по отношению к 1/4-коду.

Заключение

В статье предложен способ вычисления значений функций логического дополнения в системах функционального контроля на основе равновесного 2/4-кода. Эксперимент с контрольными комбинационными схемами показал, что удастся улучшить показатели структурной избыточности и обнаруживающей способности системы по сравнению с использованием для их организации 1/4-кода. Следует отметить, что применение обоих равновесных кодов для рассмотренных в эксперименте контрольных схем оказывается эффективнее, чем применение кодов с суммированием. Полученные результаты позволяют судить о хороших перспективах использования 2/4-кода при организации систем функционального контроля на основе метода логического дополнения. Что немаловажно, при использовании описанных правил вычисления функций логического дополнения обеспечивается свойство полной самопроверяемости тестера в схеме контроля.

Библиографический список

1. 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.

2. Блюдов А. А. Построение модифицированного кода Бергера с минимальным числом обнаруживаемых ошибок информационных разрядов / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Электронное моделирование. – 2012. – Т. 34, № 6. – С. 17–29.

3. Гессель М. Контроль комбинационных схем методом логического дополнения / М. Гессель, А. В. Морозов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 8. – С. 161–172.

4. Гессель М. Логическое дополнение – новый метод контроля комбинационных схем / М. Гессель, А. В. Морозов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 1. – С. 167–176.

5. Пархоменко П. П. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомонян. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 320 с.

6. Сапожников В. В. Организация функционального контроля комбинационных схем методом логического дополнения / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, А. В. Дмитриев, А. В. Морозов, М. Гессель // Электронное моделирование. – 2002. – Т. 24, № 6. – С. 51–66.

7. Сапожников В. В. Основы технической диагностики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – М. : Маршрут, 2004, 318 с.

8. Сапожников В. В. Применение кодов с суммированием при синтезе систем железнодорожной автоматики и телемеханики на программируемых логических интегральных схемах / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 84–107.

9. Сапожников В. В. Самопроверяемые дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.

10. Сапожников В. В. Теория дискретных устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / В. В. Сапожников, Ю. А. Кравцов, Вл. В. Сапожников. – М. : УМК МПС России, 2001. – 312 с.

11. Согомонян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомо-

нян, Е. В. Слабаков. – М. : Радио и связь, 1989. – 208 с.

12. Berger J. M. A Note on Error Detecting Codes for Asymmetric Channels / J. M. Berger // *Inf. and Control*. – 1961. – Vol. 4, N 1. – P. 68–73.

13. Collection of Digital Design Benchmarks. – URL : <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks>.

14. Das D. K. Constraint Don't Cares for Optimizing Designs for Concurrent Checking by 1-out-of-3 Codes / D. K. Das, S. S. Roy, A. Dmitriev, A. Morozov, M. Gössel // *Proc. 10th Int. Workshops on Boolean Problems*, Freiberg, Germany, Sept., 2012. – Freiberg, 2012. – P. 33–40.

15. Das D. Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multi-level Circuits / D. Das, N. A. Touba // *Proc. of the 17th IEEE VLSI Test Symp.*, USA, California, Dana Point, Apr. 25–29, 1999. – Dana Point, California, 1999. – P. 370–376.

16. Goessel M. A New Method for Concurrent Checking by Use of a 1-out-of-4 Code / M. Goessel, V. Sapozhnikov, V. Saposhnikov, A. Dmitriev // *Proc. 6th IEEE Int. On-line Testing Workshop*, Palma de Mallorca, Spain, 3–5 July 2000. – Palma de Mallorca, 2000. – P. 147–152.

17. Gössel M. New Methods of Concurrent Checking / M. Gössel, V. Ocheretny, E. Sogomonyan, D. Marienfeld. – Dordrecht : Springer Sci. + Bus. Media B. V., 2008. – 184 p.

18. Mitra S. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? / S. Mitra, E. J. McClaskey // *Proc. Int. Test Conf.*, USA, Atlantic City, NJ, Oct. 03–05 2000. – Atlantic City, NJ, 2000. – P. 985–994.

19. Nicolaidis M. On-Line Testing for VLSI – A Compendium of Approaches / M. Nicolaidis, Y. Zorian // *J. Electron. Test. : Theory Appl.* – 1998. – N 12. – P. 7–20.

20. Saposhnikov V. V. Design of Totally Self-Checking Combinational Circuits by Use of Complementary Circuits / V. V. Saposhnikov, V. V. Sapozhnikov, A. Morozov, G. Osadtchi, M. Gossel // *Proc. East-West Design & Test Workshop*, Yalta, Ukraine, 2004. – Yalta, 2004. – P. 83–87.

21. Yang S. Logic Synthesis and Optimization Benchmarks: User Guide: Version 3.0. – Microelectronics Center of North Carolina (MCNC), 1991. – 88 p.

References

1. Blyudov A. A., Yefanov D. V., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov V. V. *Avtomatika i telemekhanika – Autom. Remote Control*, 2014, no. 8, pp. 131–145.

2. Blyudov A. A., Yefanov D. V., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov V. V. *Elektronnoye modelirovaniye – Electronic Modeling*, 2012, Vol. 34, no. 6, pp. 17–29.

3. Gössel M., Morozov A. V., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov V. V. *Avtomatika i telemekhanika – Autom. Remote Control*, 2005, no. 8, pp. 161–172.

4. Gössel M., Morozov A. V., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov V. V. *Avtomatika i telemekhanika – Autom. Remote Control*, 2003, no. 1, pp. 167–176.

5. Parkhomenko P. P. & Sogomonyan Ye. S. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki (optimizatsiya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnyye sredstva)* [Technical Diagnostics Basics (Optimisation of Diagnostics Algorithms, Hardware-Based Tools)]. Moscow, Energoatomizdat, 1981. 320 p.

6. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Dmitriev A. V., Morozov A. V. & Gössel M. *Elektronnoye modelirovaniye – Electronic Modeling*, 2002, P. 24, no. 6, pp. 51–66.

7. Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov V. V. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki* [Technical Diagnostics Basics]. Moscow, Marshrut, 2004. 318 p.

8. Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov V. V. & Yefanov D. V. *Avtomatika na transporte – Automatics at Transport*, 2015, Vol. 1, no. 1, pp. 84–107.

9. Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov V. V. *Samoveryayemyye diskretnyye ustroystva* [Self-checking Discrete Devices]. St. Petersburg, Energoatomizdat, 1992. 224 p.

10. Sapozhnikov V. V., Kravtsov Yu. A. & Sapozhnikov V. V. *Teoriya diskretnykh ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki, telemekhaniki i svyazi* [Theory of Discrete Devices of Railway Automatics, Telemechanics and Communication]. Moscow, UMK MPS Rossii, 2001. 312 p.

11. Sogomonyan Ye. S. & Slabakov Ye. V. *Samoveryayemyye ustroystva i otkazoustoychivyye sistemy* [Self-Checking Machines and Fail-Safe Systems]. Moscow, Radio i svyaz, 1989. 208 p.

12. Berger J. M. *A Inf. and Control*, 1961, Vol. 4, no. 1, pp. 68–73.

13. Collection of Digital Design Benchmarks, available at: <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks>.
14. Das D. K., Roy S. S., Dmitriev A., Morozov A. & Gössel M. Constraint Don't Cares for Optimizing Designs for Concurrent Checking by 1-out-of-3 Codes. *Proc. 10th Int. Workshops on Boolean Problems*, Freiberg, Germany, Sept., 2012. Freiberg, 2012. Pp. 33-40.
15. Das D. & Touba N. A. Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multilevel Circuits. *Proc. of the 17th IEEE VLSI Test Symp.*, USA, California, Dana Point, Apr. 25-29, 1999. Dana Point, California, 1999. Pp. 370-376.
16. Goessel M., Saposhnikov V. I., Saposhnikov V. & Dmitriev A. A New Method for Concurrent Checking by Use of a 1-out-of-4 Code. *Proc. 6th IEEE Int. On-line Testing Workshop*, Palma de Mallorca, Spain, 3-5 July 2000. Palma de Mallorca, 2000. Pp. 147-152.
17. Gössel M., Ocheretny V., Sogomonyan E. & Marienfeld D. *New Methods of Concurrent Checking*. Dordrecht, Springer Sci. + Bus. Media B. V., 2008. 184 p.
18. Mitra S. & McClaskey E. J. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? *Proc. Int. Test Conf.*, USA, Atlantic City, NJ, 2000, 03-05 Oct. Atlantic City, NJ, 2000. Pp. 985-994.
19. Nicolaidis M. & Zorian Y. On-Line Testing for VLSI – A Compendium of Approaches. *J. Electron. Test.: Theory Appl.*, 1998, no. 12, pp. 7-20.
20. Saposhnikov V. V., Saposhnikov V. I., Morozov A., Osadtchi G. & Gössel M. Design of Totally Self-Checking Combinational Circuits by Use of Complementary Circuits. *Proc. East-West Design & Test Workshop*, Yalta, Ukraine, 2004. Yalta, 2004. P. 83-87.
21. Yang S. *Logic Synthesis and Optimization Benchmarks: User Guide: Version 3.0*. Microelectronics Center of North Carolina (MCNC), 1991. 88 p.

ЕФАНОВ Дмитрий Викторович – канд. техн. наук, доцент, TrES-4b@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 681.518.5:004.052.32

М. Р. Черепанова**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗНАЧЕНИЯ МОДУЛЯ КОДА
С СУММИРОВАНИЕМ НА СТРУКТУРНУЮ ИЗБЫТОЧНОСТЬ
СИСТЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ**

Дата поступления: 07.04.2016

Решение о публикации: 05.06.2016

Цель: Исследовать влияние значения модуля кода с суммированием на структурную избыточность систем функционального контроля. **Методы:** Используются методы теории информации и кодирования, теории дискретных устройств и технической диагностики дискретных систем. **Результаты:** Приведены преимущества модульных кодов с суммированием перед другими методами построения систем функционального контроля, поскольку у модульного кода меньшее количество контрольных разрядов, чем у классического кода Бергера, а площадь систем функционального контроля, организованных по модульным кодам с суммированием, меньше, чем у аналогичных систем, организованных по коду Бергера. Результаты экспериментов с набором контрольных комбинационных схем MCNC Benchmarks показали, что не всегда лучшее решение дает выбор значения модуля – степени числа 2. Для различных реальных схем эффективным может оказаться применение модульного кода с четными значениями модулей или вовсе с нечетными числами, что кажется не совсем очевидным. Приведены результаты сравнения занимаемой площади двух видов систем функционального контроля: при отдельной и при совместной реализации контролируемого и контрольного устройств. **Практическая значимость:** Использование модульных кодов с суммированием в системах функционального контроля позволяет организовать контролепригодные дискретные устройства с меньшей структурной избыточностью, чем дают известные подходы, например, дублирование. Это, в свою очередь, позволяет уменьшать затраты на техническую реализацию устройства и на его дальнейшую эксплуатацию.

Техническая диагностика, система функционального контроля, код Бергера, модульный код с суммированием, структурная избыточность, контрольная комбинационная схема.

Mariya R. Cherepanova, student, bugsbunny.k38@gmail.com (Petersburg State Transport University) A STUDY INTO INFLUENCE OF SUM CODE MODULE VALUE ON STRUCTURE REDUNDANCY OF CONCURRENT ERROR DETECTION SYSTEMS

Objective: To study the influence of sum code module value on structure redundancy of concurrent error detection systems. **Methods:** Information and coding theory, discrete devices theory, and discrete devices' technical diagnostics methods were applied. **Results:** Module sum codes' advantages over other methods for building concurrent error detection systems are outlined, as module code has fewer check bits than classic Berger code does, and two-dimensional extent of concurrent error detection systems organised by module sum codes is lesser than that of similar systems organised by Berger code. Results of experiments with MCNC Benchmarks testing combinational circuits indicated that the choice of module value as the power of number 2 does not always produce best solution. For various real schemes application of module code with even values of modules or odd numbers may prove efficient, which does not seem quite obvious. Results of comparison of two-dimensional extent of two types of concurrent error detection system are provided – in cases of discrete or joint implementation of unit under test and verifier. **Practical importance:** Use of module sum codes in concurrent error detection systems allows to organise

testable discrete devices with lesser structure redundancy than the known approaches like duplication. In its turn, that allows to cut expenses on technical implementation of a device and its further operation.

Technical diagnostics, concurrent error detection system, Berger code, module sum code, structure redundancy, testing combinational circuit.

В автоматике и вычислительной технике для определения технического состояния логических схем в процессе их функционирования применяют методы функционального контроля [12, 22]. В системе функционального контроля исходное устройство $F(x)$ дополняется специализированной схемой контроля, в которую входят блок контрольной логики $G(x)$ и самопроверяемый тестер [14, 19, 20]. В функции блока контрольной логики входит вычисление значений контрольных функций $g_1, g_2, \dots, g_k$, а в функции тестера – сравнение полученных значений контрольных функций со значениями рабочих функций $f_1, f_2, \dots, f_m$. Соответствие между значениями функций $f_1, f_2, \dots, f_m$ и $g_1, g_2, \dots, g_k$ устанавливается на этапе проектирования системы функционального контроля. Правила вычисления значений контрольных функций определяются свойствами помехоустойчивого кода [2, 5, 6, 8, 11, 17].

При построении систем функционального контроля наиболее важными характеристика-

ми являются структурная избыточность системы и обнаруживающая способность контролируемого устройства.

Есть два вида функционального контроля: функциональный контроль с отдельной реализацией блоков основной и контрольной логики и функциональный контроль с их совместной реализацией. Совместная реализация подразумевает такую оптимизацию структуры, при которой блоки контрольной и основной логики будут использовать часть одинаковых логических элементов. Такая реализация уменьшает структурную избыточность, но может ухудшить обнаруживающую способность, если неисправность повлияет на общие элементы блоков основной и контрольной логики. Соответственно, отдельная реализация означает, что блоки контрольной и основной логики не имеют общих элементов [13].

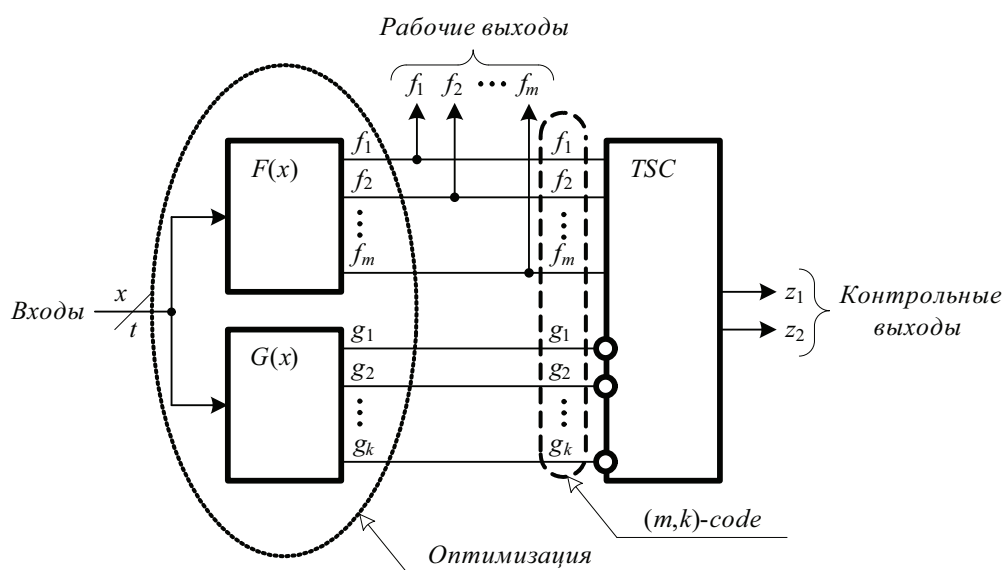


Рис. 1. Структурная схема системы функционального контроля

Наиболее просто организуются структуры систем функционального контроля на основе дублирования и паритета (рис. 2) [1, 9, 10, 18]. Метод паритета и метод дублирования дают стандартные структуры систем функционального контроля, диаметрально противоположные по свойствам. У метода паритета наименьшая структурная избыточность, но при этом и минимальная обнаруживающая способность, у метода дублирования высокая обнаруживающая способность при высокой структурной избыточности. Эффективное решение может быть получено путем использования кодов с суммированием [11].

Модульные коды с суммированием

Классический код с суммированием, известный как код Бергера [15] – это разделимый код, у которого в контрольном векторе сумма единичных разрядов в информационном векторе записывается в виде двоичного числа. Будем далее обозначать код Бергера как $S(m,k)$ -код, где m и k – длина информационного и контрольного вектора, соответственно.

$S(m,k)$ -кодом обнаруживаются однонаправленные ошибки любой кратности и не обнаруживаются разнонаправленные ошибки четной

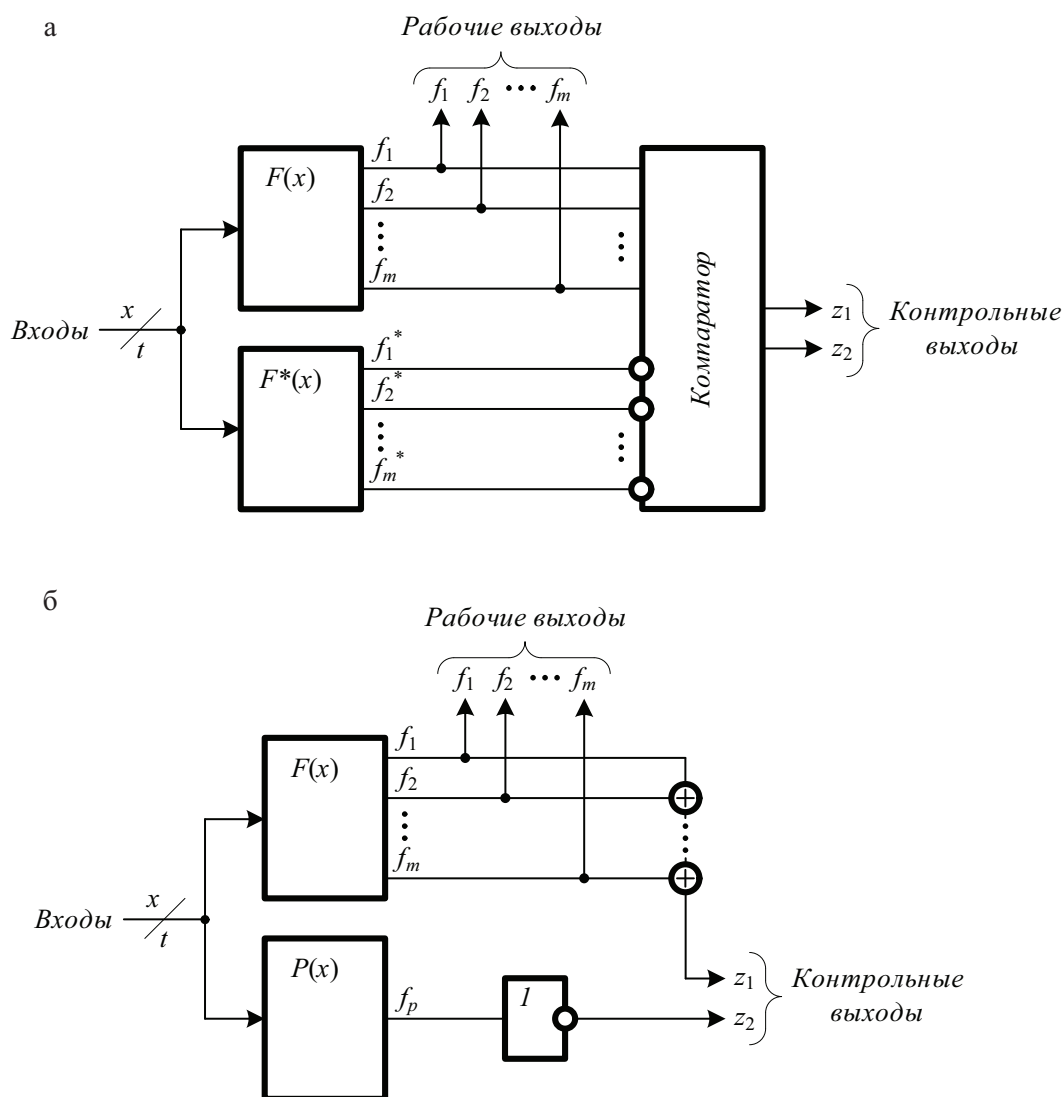


Рис. 2. Стандартные структуры систем функционального контроля:
а) дублирование; б) паритет

кратности. Однонаправленные ошибки – это ошибки, которые преобразуют только нулевые разряды в единичные, или наоборот – единичные в нулевые. Относительно обнаруживающей способности и избыточности системы функционального контроля применение кода Бергера дает структуры, которые по своим характеристикам находятся между характеристиками структуры дублирования и паритета.

В [3] детально изучены свойства $S(m,k)$ -кодов по обнаружению ошибок в системах функционального контроля. Например, найдена формула подсчета количества необнаруживаемых ошибок по каждой кратности d :

$$N_{m,d} = \sum_{r=\frac{d}{2}}^{\frac{m-d}{2}} C_m^r C_r^{\frac{d}{2}} C_{m-r}^{\frac{d}{2}}, \quad (1)$$

где $d = \{2, 4, \dots, m-1\}$, если m нечетно, и $d = \{2, 4, \dots, m\}$ если m четно.

По выражению (1) можно рассчитать общее число искажений в коде с суммированием как сумму всех величин $N_{m,d}$:

$$N_m = \sum_{d=2}^{m-1} N_{m,d}.$$

$S(m,k)$ -коды вне зависимости от длины информационного вектора не обнаруживают одинаковую долю ошибок четной кратности d от общего количества ошибок данной кратности:

$$\beta_d = \frac{\sum_{r=\frac{d}{2}}^{\frac{m-d}{2}} C_m^r C_r^{\frac{d}{2}} C_{m-r}^{\frac{d}{2}}}{2^m C_m^d} = 2^{-d} C_d^{\frac{d}{2}}.$$

Значение β_d с увеличением m уменьшается.

Применение кода Бергера в системах функционального контроля реальных логических схем не всегда оправданно, так как некоторые виды искажений никогда не возникают на рабочих выходах системы, сами же контрольные функции получаются весьма сложными.

Для уменьшения структурной избыточности системы функционального контроля можно применять коды с уменьшенным количеством разрядов в контрольных векторах, поэтому до сих пор разрабатываются коды, применение которых позволяет уменьшать избыточность схем при некотором ухудшении (а в некоторых случаях – и улучшении) обнаруживающей способности в информационных векторах [2, 5]. Среди таких кодов можно назвать модульные коды с суммированием ($SM(m,k)$ -коды).

Число разрядов контрольных векторов в $SM(m,k)$ -кодах уменьшается за счет использования модулей, тем самым уменьшается структурная избыточность системы функционального контроля.

Модульные коды с суммированием строятся по следующему алгоритму:

- 1) для конкретного значения длины информационного вектора выбирается модуль M ;
- 2) подсчитывается сумма r единичных разрядов информационного вектора – это вес информационного вектора;
- 3) рассчитывается значение W по формуле $W = r \pmod{M}$, т.е. определяется наименьший неотрицательный вычет числа r по модулю M .

Число W , представленное в двоичном виде, соответствует значениям разрядов контрольного вектора. Например, в табл. 1 представлены все контрольные векторы для разнообразных модульных кодов с суммированием с длиной информационного вектора $m = 3$. К примеру, для информационного вектора $\langle 011 \rangle$ $r = 2$. При построении $S3(3,2)$ -кода определяем число $W = 2 \pmod{3} = 2$, что соответствует контрольному вектору $\langle 10 \rangle$.

В информационном векторе будут обнаружены все ошибки, изменяющие значение W . Характеристики обнаружения ошибок в информационных векторах $SM(m,k)$ -кодов устанавливаются по специальным таблицам, в которых указывается распределение информационных векторов между контрольными векторами [3]. Например, в табл. 2 и 3 приведено распределение информационных векторов между контрольными векторами (они

ТАБЛИЦА 1. Контрольные векторы $SM(3,k)$ -кодов

№	Информационный вектор			r	$r \pmod{M}$			Контрольный вектор				
								$S2(3,1)$	$S3(4,2)$		$SM(3,2), M \geq 4$	
	f_3	f_2	f_1		2	3	≥ 4	g_1	g_2	g_1	g_2	g_1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
2	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1
3	0	1	1	2	0	2	2	0	1	0	1	0
4	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1
5	1	0	1	2	0	2	2	0	1	0	1	0
6	1	1	0	2	0	2	2	0	1	0	1	0
7	1	1	1	3	1	0	3	1	0	0	1	1

ТАБЛИЦА 2. Распределение информационных векторов между контрольными векторами модульных кодов с $M=3$ и $M=4$

Контрольные группы			
00	01	10	11
Векторы $S4(3,2)$ -кода			
000	001	011	111
	010	101	
	100	110	
Векторы $S3(3,2)$ -кода			
000	001	011	
111	010	101	
	100	110	

ТАБЛИЦА 3. Распределение информационных векторов между контрольными векторами для кода паритета

Контрольные группы	
00	01
Векторы $S2(2,1)$ -кода	
000	001
011	010
101	100
110	111

образуют контрольные группы) в $SM(3,k)$ -кодах с различными значениями модуля. По данным таблицам можно проследить, как изменяется состав контрольных групп. Например, в $S4(3,2)$ -коде, являющемся кодом Бергера, распределение неравномерно. Уменьшение модуля приводит к сокращению задействованных контрольных групп и «уплотнению» распределения информационных векторов на контрольные группы. При изменении значения модуля от значения $M = m + 1$ к значению $M = 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}$ изменяется количество заполняемых контрольных групп: появляются пустые контрольные группы (см. распределение для $S3(3,2)$ -кода). Однако при достижении значения $M = 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}$ уменьшается на единицу количество разрядов в контрольном векторе, а также достигается распределение с заполнением всех контрольных групп (распределение, однако, неравномерно). Более равномерное распределение получается с дальнейшим уменьшением модуля и становится абсолютно равномерным для $S2(m,1)$ -кода. Рассмотренные особенности справедливы и для модульных кодов с большими значениями длины информационных векторов.

Общее число необнаруживаемых искажений в информационных векторах $SM(m,k)$ -

кодов равно сумме количества необнаруживаемых ошибок по каждой контрольной группе:

$$N_m = \sum_{t=0}^{t=M-1} N_{m(t)} = \sum_{t=0}^{t=M-1} p_t(p_t - 1), \quad (2)$$

где

$$p_t = C_m^t + C_m^{M+t} + C_m^{2M+t} + \dots + C_m^{iM+t} -$$

общее количество информационных векторов в контрольной группе с номером $t \in [0; M - 1]$.

Например, пользуясь формулой (2) для $S3(3,2)$ -кода, получаем:

$$\begin{aligned} N_3 &= \sum_{t=0}^{t=3-1} N_{3(t)} = N_{3(0)} + N_{3(1)} + N_{3(2)} = \\ &= (C_3^0 + C_3^{0+3})(C_3^0 + C_3^{0+3} - 1) + \\ &+ (C_3^1)(C_3^1 - 1) + (C_3^2)(C_3^2 - 1) = \\ &= 2 \cdot 1 + 3 \cdot 2 + 3 \cdot 2 = 2 + 6 + 6 = 14. \end{aligned}$$

В [4, 7, 21] установлены свойства обнаружения ошибок $SM(m,k)$ -кодами. Данная же статья представляет результаты исследования влияния значения модуля на показатель сложности технической реализации системы функционального контроля.

Экспериментальные исследования

Для решения задачи был поставлен эксперимент с набором контрольных комбинационных схем MCNC Benchmarks [16]. Данные схемы известны во всем мире, их применяют для тестирования новых методов технической диагностики.

Автор работы использовал специально разработанный программный модуль Coding, который позволяет формировать файлы – описания блоков системы функционального контроля, построенной по правилам вычисления различных модульных кодов с суммированием. Получаемые файлы имеют формат *.pla (он соответствует табличной форме задания схемы). Эти файлы обсчитывали в программе SIS для определения показателя слож-

ности технической реализации – условной площади, занимаемой модулем на кристалле [23]. Получаемые значения площадей блоков функционального контроля, построенных с использованием $SM(m,k)$ -кодов, заносили в таблицы данных. В табл. 4–6 приведены некоторые результаты экспериментов.

Для оценки площади автор выбрал стандартную библиотеку функциональных элементов stdcell2_2.genlib. Для каждой контрольной схемы был определен показатель площади при изменении значения модуля от $M = 2$ до $M = m + 1$.

Оценим эффект от уменьшения значения модуля $SM(m,k)$ -кода для конкретных контрольных схем. Для оценки используем коэффициент структурной избыточности – долю площади системы функционального контроля для данной комбинационной схемы $F(x)$ от площади самой комбинационной схемы:

$$\theta = \frac{L_s}{L_{F(x)}},$$

где L_s – площадь системы функционального контроля; $L_{F(x)}$ – площадь контрольной комбинационной схемы.

При этом в эксперименте оценивался показатель структурной избыточности системы функционального контроля на основе модульного кода с суммированием как при раздельной (S_{pp}), так и при совместной (S_{cp}) реализации блоков основной и контрольной логики. Как правило, наименьшей структурной избыточностью обладают системы функционального контроля, построенные по коду паритета, так как требуется вычислять всего один контрольный разряд. Анализируя табл. 4–6, можно подтвердить эту особенность. Интерес представляет сравнение между собой показателей θ при одинаковом количестве контрольных разрядов в коде. Для модульных кодов с суммированием одинаковое количество контрольных разрядов будут иметь коды с модулями:

$$2^{k-1} + 1 \leq M \leq 2^k.$$

ТАБЛИЦА 4. Результаты экспериментов с контрольной схемой «m2»

M	k	Площадь, занимаемая системой функционального контроля, усл. ед.		Показатель структурной избыточности θ , %			
		По методу дублирования	По $SM(m,k)$ -коду		По методу дублирования	По $SM(m,k)$ -коду	
			S_{pp}	S_{cp}		S_{pp}	S_{cp}
2	1	24 048	11 440	4936	2,382	1,133	0,489
3	2	24 048	16 744	10 104	2,382	1,658	1,001
4	2	24 048	15 504	8872	2,382	1,536	0,879
5	3	24 048	23 256	17 768	2,382	2,303	1,76
6	3	24 048	74 824	68 168	2,382	7,411	6,752
7	3	24 048	66 104	60 600	2,382	6,548	6,002
8	3	24 048	21 560	15 240	2,382	2,135	1,51
9	4	24 048	32 728	27 384	2,382	3,242	2,712
10	4	24 048	87 608	82 368	2,382	8,677	8,158
11	4	24 048	150 552	145 160	2,382	14,912	14,378
12	4	24 048	83 632	78 272	2,382	8,284	7,753
13	4	24 048	34 736	29 440	2,382	3,441	2,916
14	4	24 048	32 880	27 520	2,382	3,257	2,726
15	4	24 048	35 456	30 136	2,382	3,512	2,985
16	4	24 048	29 536	24 160	2,382	2,926	2,393
17	5	24 048	30 000	24 624	2,382	2,971	2,439

ТАБЛИЦА 5. Результаты экспериментов с контрольной схемой «max1024»

M	k	Площадь, занимаемая системой функционального контроля, усл. ед.		Показатель структурной избыточности θ , %			
		По методу дублирования	По $SM(m,k)$ -коду		По методу дублирования	По $SM(m,k)$ -коду	
			S_{pp}	S_{cp}		S_{pp}	S_{cp}
2	1	36 928	22 912	20 344	2,073	1,286	1,142
3	2	36 928	26 016	24 120	2,073	1,46	1,354
4	2	36 928	26 264	25 552	2,073	1,474	1,434
5	3	36 928	27 928	28 848	2,073	1,568	1,619
6	3	36 928	26 976	28 864	2,073	1,514	1,62
7	3	36 928	27 456	28 816	2,073	1,541	1,617
8	3	36 928	27 456	28 816	2,073	1,541	1,617

Например, для схемы «m2», имеющей 16 выходов, с числом контрольных разрядов $k = 3$ могут быть использованы коды с моду-

лями $5 \leq M \leq 8$ (табл. 4). Для модульных кодов со значением M из приведенного диапазона получено, что минимальная структурная

ТАБЛИЦА 6. Результаты экспериментов с контрольной схемой «mlp4»

M	k	Площадь, занимаемая системой функционального контроля, усл. ед.			Показатель структурной избыточности θ , %		
		По методу дублирования	По $SM(m,k)$ -коду		По методу дублирования	По $SM(m,k)$ -коду	
			S_{pp}	S_{cp}		S_{pp}	S_{cp}
2	1	16 256	9840	7680	2,25	1,362	1,063
3	2	16 256	13 712	11 552	2,25	1,898	1,599
4	2	16 256	14 304	12 336	2,25	1,98	1,708
5	3	16 256	18 952	16 696	2,25	2,623	2,311
6	3	16 256	16 952	14 632	2,25	2,347	2,025
7	3	16 256	18 216	16 240	2,25	2,522	2,248
8	3	16 256	16 872	14 896	2,25	2,336	2,062
9	4	16 256	16 600	14 624	2,25	2,298	2,024

избыточность системы функционального контроля (как S_{pp} , так и S_{cp}) достигается при значении $M = 8$ (степень числа 2). Аналогичная закономерность имеется и для кодов с $k = 2$ и $k = 4$.

На первый взгляд кажется очевидным результат, описанный выше, и система функционального контроля на основе $SM(m,k)$ -кода должна иметь минимальную площадь при значении M , равном степени числа 2. Однако для многих реальных схем получаются иные результаты. Например, для схемы «max1024», у которой 6 выходов, при $k = 3$ минимум показателя θ (S_{pp}) получен при выборе кода со значением $M = 6$ (табл. 5).

Для контрольной схемы «mlp4», имеющей 8 выходов, применение модульных кодов вообще оказывается нецелесообразным при $M \geq 5$. А среди кодов с количеством контрольных разрядов $k = 2$ минимальным значением коэффициента θ обладает $S3(8,2)$ -код.

Заключение

Результаты экспериментов с системой контрольных комбинационных схем MCNC Benchmarks показали высокую эффективность применения $SM(m,k)$ -кодов при организации систем функционального контроля по показа-

телю структурной избыточности. Подтверждено, что минимальным показателем структурной избыточности обладает стандартная структура контроля по коду паритета (по $S2(m,1)$ -коду). Показано, что не всегда минимальное значение показателя структурной избыточности имеют системы функционального контроля, организованные по кодам с модулями, значения которых являются степенями числа 2.

Представленные результаты исследования позволяют расширить теорию функционального контроля на основе кодов с суммированием, а также дать разработчику возможность целесообразного выбора кода с учетом как свойств обнаружения ошибок, так и показателя структурной избыточности системы.

Библиографический список

1. Аксенова Г.П. О функциональном диагностировании дискретных устройств в условиях работы с неточными данными / Г.П. Аксенова // Проблемы управления. – 2008. – № 5. – С. 62–66.
2. 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.

3. Ефанов Д. В. О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 6. – С. 155–162.
4. Ефанов Д. В. Применение модульных кодов с суммированием для построения систем функционального контроля комбинационных логических схем / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 10. – С. 152–169.
5. 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.
6. Сапожников В. В. Исследование свойств кодов Хэмминга и их модификаций в системах функционального контроля / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1, № 3. – С. 311–337.
7. Сапожников В. В. Модульные коды с суммированием в системах функционального контроля. I. Свойства обнаружения ошибок кодами в информационных векторах / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, М. Р. Черепанова // Электронное моделирование. – 2016. – Т. 38, № 2. – С. 27–48.
8. Сапожников В. В. Обнаружение опасных ошибок на рабочих выходах комбинационных логических схем / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1, № 2. – С. 195–211.
9. Сапожников В. В. Организация систем функционального контроля комбинационных схем на основе модифицированного кода с суммированием взвешенных переходов (начало) / Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. и др. // Электронное моделирование. – 2015. – Т. 37, № 6. – С. 49–68.
10. Сапожников В. В. Основы технической диагностики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – М. : Маршрут, 2004, 318 с.
11. Сапожников В. В. Предельные свойства кода с суммированием / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Изв. ПГУПС. – 2010. – Вып. 3. – С. 290–299.
12. Сапожников В. В. Применение кодов с суммированием при синтезе систем железнодорожной автоматики и телемеханики на программируемых логических интегральных схемах / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 84–107.
13. Сапожников В. В. Самодвойственные дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, М. Гессель. – СПб. : Энергоатомиздат, Санкт-Петербург, отд., 2001. – 331 с.
14. Сапожников В. В. Самопроверяемые дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
15. Berger J. M. A Note on Error Detecting Codes for Asymmetric Channels / J. M. Berger // Inf. and Control. – 1961. – Vol. 4, N 1. – P. 68–73.
16. Collection of Digital Design Benchmarks. – URL : <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks>.
17. Das D. Synthesis of Circuits with Low-Cost Concurrent Error Detection Based on Bose-Lin Codes / D. Das, N. A. Touba // J. Electron. Testing: Theory Appl. – 1999. – Vol. 15, Is. 1–2. – P. 145–155.
18. Goessel M. Error Detection Circuits / M. Goessel, S. Graf. – L : McGraw-Hill, 1994. – 261 p.
19. Mitra S. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? / S. Mitra, E. J. McClaskey // Proc. Int. Test Conf., USA, Atlantic City, NJ, Oct. 03–05 2000. – Atlantic City, NJ, 2000. – P. 985–994.
20. Piestrak S. J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes / S. J. Piestrak. – Wrocław : Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. – 111 p.
21. Sapozhnikov V. Modular Sum Code in Building Testable Discrete Systems / V. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov, D. Efanov // Proc. 13th IEEE East-West Design & Test Symp. (EWDTS'2015), Batumi, Georgia, Sept. 26–29, 2015. – Batumi, 2015. – P. 181–187.
22. Ubar R. Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source) / R. Ubar, J. Raik, H.-T. Vierhaus. – Inf. Sci. Ref., Hershey. – NY : IGI Global, 2011. – 578 p.
23. Yang S. Logic Synthesis and Optimization Benchmarks : User Guide : Version 3.0. – Microelectronics Center of North Carolina (MCNC), 1991. – 88 p.

References

1. Aksenova G. P. *Problemy upravleniya – Management Problems*, 2008, no. 5, pp. 62-66.
2. Blyudov A. A., Yefanov D. V., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov V. V. *Avtomatika i telemekhanika – Autom. Remote Control*, 2014, no. 8, pp. 131-145.
3. Yefanov D. V., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov V. V. *Avtomatika i telemekhanika – Autom. Remote Control*, 2010, no. 6, pp. 155-162.
4. Yefanov D. V., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov V. V. *Avtomatika i telemekhanika – Autom. Remote Control*, 2015, no. 10, pp. 152-169.
5. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. & Yefanov D. V. *Elektronnoye modelirovaniye – Electronic Simulation*, 2014, T. 36, no. 1, pp. 59-80.
6. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. & Yefanov D. V. *Avtomatika na transporte – Automatics at Transport*, 2015, T. 1, no. 3, pp. 311-337.
7. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Yefanov D. V., Dmitriyev V. V. & Cherepanova M. R. *Elektronnoye modelirovaniye – Electronic Modeling*, 2016, T. 38, no. 2, pp. 27-48.
8. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. & Yefanov D. V. *Avtomatika na transporte – Automatics in Transport*, 2015, T. 1, no. 2, pp. 195-211.
9. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Yefanov D. V., Dmitriyev V. V. & Cherepanova M. R. *Elektronnoye modelirovaniye – Electronic Modeling*, 2015, T. 37, no. 6, pp. 49-68.
10. Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov V. V. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki [Technical Diagnostics Basics]*. Moscow, Marshrut, 2004. 318 p.
11. Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov V. V. & Yefanov D. V. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transport Univ.*, 2010, Is. 3, pp. 290-299.
12. Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov V. V. & Yefanov D. V. *Avtomatika na transporte – Automatics at Transport*, 2015, Vol. 1, no. 1, pp. 84-107.
13. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. & Ges-sel M. *Samodvoystvennyye diskretnyye ustroystva [Self-Dual Discrete Devices]*. St. Petersburg, Energoatomizdat, Sankt-Peterburgskoye otdeleniye, 2001. 331 p.
14. Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov V. V. *Samoproveryayemyye diskretnyye ustroystva [Self-checking Discrete Devices]*. St. Petersburg, Energoatomizdat, 1992. 224 p.
15. Berger J. M. *A Inf. and Control*, 1961, Vol. 4, no. 1, pp. 68-73.
16. Collection of Digital Design Benchmarks, available at: <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks>.
17. Das D. & Toubia N. A. *J. Electron. Testing: Theory Appl.*, 1999, Vol. 15, Is. 1-2, pp. 145-155.
18. Goessel M. & Graf S. *Error Detection Circuits*. L, McGraw-Hill, 1994. 261 p.
19. Mitra S. & McClaskey E. J. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? *Proc. Int. Test Conf.*, USA, Atlantic City, NJ, 2000, 03-05 Oct. Atlantic City, NJ, 2000. Pp. 985-994.
20. Piestrak S. J. *Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes*. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. 111 p.
21. Sapozhnikov V., Sapozhnikov V. V. & Yefanov D. *Modular Sum Code in Building Testable Discrete Systems. Proc. 13th IEEE East-West Design & Test Symp. (EWDTS'2015)*, Batumi, Georgia, Sept. 26-29, 2015. Batumi, 2015. Pp. 181-187.
22. Ubar R., Raik J. & Vierhaus H.-T. *Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source)*. Inf. Sci. Ref., Hershey, NY, IGI Global, 2011. 578 p.
23. Yang S. *Logic Synthesis and Optimization Benchmarks: User Guide: Version 3.0*. Microelectronics Center of North Carolina (MCNC), 1991. 88 p.

ЧЕРЕПАНОВА Мария Родионовна – студент, bugsbunny.k38@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).