

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 15, выпуск 4, 2018

ISSN (Print) 1815-588X

Учредитель и издатель

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

Адрес учредителя и издателя

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

Адрес редакции

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

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

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

Журнал зарегистрирован

в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)

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

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

Журнал имеет институт рецензирования

Журнал распространяется

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

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Научный редактор

А. К. Канаев, д-р техн. наук, доцент

Выпускающий редактор

Э. А. Горелик

Перевод на английский язык

Ю. А. Фаттахова

Верстка

А. А. Стуканова

Редактор сайта

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

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

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

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

Подписано в печать с оригинал-макета 20.12.2018.

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

Усл. печ. л. 24,375. Установочный тираж 300 экз.

Заказ 162. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ПГУПС

190031, СПб., Московский пр., 9.

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY, volume 15, issue 4, 2018

ISSN (Print) 1815-588X

Founder and publisher

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

Founder and publisher address

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

Editorial address

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

e-mail: izvestia@izvestiapups.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 publishes scientific articles in the fields of Technics (05.00.00): Transport (05.22.00), Informatics, computer engineering and management (05.13.00), Construction and architecture (05.23.00), Radiotechnics and communication (05.12.00); Geoscience (25.00.00)

The Journal has the Peer-review division

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

JOURNAL STAFF

Editor-in-chief

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

Deputy chief editor

V. Sapozhnikov, D.Eng., Professor

Science editor

A. Kanayev, D.Eng., Associate Professor

Executive editor

E. Gorelik

English translation

Yu. Fattakhova

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

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

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

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

© Petersburg State Transport University, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

→ ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Агунов А. В., Варенцов В. М., Соколов Д. А.

Особенности расчетов потерь мощности в тяговых сетях с учетом перемещения электрических потребителей энергии 491

Бутунов Д. Б., Котенко А. Г.

Оценка непроизводительных потерь в работе сортировочной станции 498

Курков А. В., Смирнов И. А., Шубин А. Д., Пушкин С. С.

Выявление поперечных трещин в гребнях бандажей локомотивных колес 511

Пегин П. А., Иголкин Г. В.

Обоснование строительства высокоскоростной линии между аэропортом и центром города 517

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

Аль-Дамлахи Ию.

Разработка методики на основе ГИС и САПР для трассирования автомобильных дорог в районах твердого грунта 524

Кабанов А. В., Малышев К. С., Васильев Д. Н.

Повышение эффективности работы щебеночных карьеров на основе оптимального обеспечения фронтов балластировочных работ 536

Ким К. К., Смирнов А. А., Герасимов М. А.

Автономное электроснабжение речных мостов и прилегающих к ним объектов 545

Козлов И. С.

Напряженно-деформированное состояние железнодорожной насыпи с использованием минерального геоэкозащитного материала 551

Кручек В. А., Грищенко А. В., Грачев В. В.

Процесс устойчивой реализации силы тяги локомотивов с групповым тяговым приводом колесных пар 560

→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Альдреби З. А.

Повышение сейсмостойкости и усиление строительных конструкций архитектурных памятников в Сирии с помощью современных композитных материалов 576

Белаш Т. А., Нудьга И. Б., Яковлев А. Д.

Цунамизащита зданий в сейсмоопасных районах 583

Карапетов Э. С., Атанов А. В.

Анализ существующих способов включения стали и железобетона в совместную работу 592

Киселев И. Г., Крылов Д. В., Водопьянова Ю. О.

Особенности компоновки и эксплуатации силовых блоков в полупроводниковых преобразовательных установках с испарительно-воздушным охлаждением 605

Корниенко А. А., Никитин А. Б., Диасамидзе С. В., Кузьменкова Е. Ю.

Моделирование компьютерных атак на распределенную информационную систему 613

Ходаковский В. А., Дегтярев В. Г., Герасименко П. В., Микони С. В.

Синтез сигналов с оптимальными по уровню боковых лепестков автокорреляционными свойствами 629

Шакиров М. А., Ткачук А. А.

Ф-инвариантные поверхности в обмотках броневых двухобмоточных трансформаторов 637

Шевченко Г. Г., Гура Д. А., Лобанова Ю. В.

Об обработке результатов определения пространственного положения деформационных марок с использованием поискового способа метода наименьших квадратов 653

Юрченко В. Э.

Расчет железобетонных конструкций балочного типа методом конечных элементов с использованием переменных параметров упругости 666



УДК 621.331:621.314

А. В. Агунов, В. М. Варенцов, Д. А. Соколов

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ТЯГОВЫХ СЕТЯХ С УЧЕТОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Дата поступления: 18.06.2018

Решение о публикации: 17.10.2018

Аннотация

Цель: Рассмотреть характерные особенности расчетов средних токов и потерь мощности в электротяговых сетях в условиях постоянно изменяющейся нагрузки. **Методы:** Применяются вероятностные методы расчетов. **Результаты:** Рассчитаны вероятности появления определенного количества поездов на межподстанционной зоне на основе анализа графика движения поездов. Приведены расчеты токов и потерь мощности в различных элементах системы тягового электроснабжения при фиксированном числе поездов на межподстанционной зоне. Установлено, что полученным значениям токов и потерь мощности соответствуют вероятности их появления в зависимости от количества поездов на межподстанционной зоне. На основании этого сделан вывод о том, что средние величины токов и потерь мощности в элементах тяговой сети могут рассматриваться как математические ожидания. Ввиду наличия на межподстанционной зоне поездов разной массы показана методика приведения токов этих поездов к усредненному значению на основе вероятностей появления указанных токов поездов соответствующего весового интервала и их математических ожиданий. **Практическая значимость:** В связи с постоянным перемещением электротяговой нагрузки по межподстанционной зоне, неравномерным токопотреблением и присутствием различного числа поездов проведенные расчеты, использующие вероятностные методы, являются наиболее подходящими для определения электропотребления и потерь мощности в системах тягового электроснабжения.

Ключевые слова: Электроснабжение, экономия электроэнергии, потери мощности, электротяговая нагрузка, вероятностные методы.

Alexander V. Agunov, D. Eng. Sci., professor, alexagunov@mail.ru; **Valeriy M. Varentsov**, Cand. Eng. Sci., associated professor; ***Denis A. Sokolov**, postgraduate student, sokoloffffffff@gmail.com (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) THE SPECIFICITIES OF POWER LOSS CALCULATION IN ELECTRIC TRACTION NETWORK WITH ALLOWANCE FOR MOVEMENT OF POWER CONSUMING DEVICES

Summary

Objective: To study the specificities of average currents and power loss calculation in electric traction networks in conditions of constantly changing load. **Methods:** Probabilistic methods of calculation were applied. **Results:** Occurrence probability of a certain number of trains in an inter-substation zone was

calculated on the basis of train schedule analysis. Calculations of currents and power loss in different elements of a traction energy system with a fixed number of trains in an inter-substation zone were given. It was found that the obtained values of currents and power loss correspond with their occurrence probability depending on the number of trains in an inter-substation zone. For reasons given, a conclusion was made that average values of currents and power loss in traction network elements may be considered as expectation values. Due to the presence of trains with different weight in an inter-substation zone, the method of reducing the currents of these trains to averaged values based on occurrence probabilities of the currents in question was shown for trains with relevant weight range as well as their expectation values. **Practical importance:** Due to constant electric traction load displacement in an inter-substation zone, and uneven current consumption as well as the presence of a different number of trains, the conducted calculations based on probabilistic methods are the most applicable for determination of energy consumption and power loss in traction energy systems.

Keywords: Power supply, energy saving, loss of power, traction load, probabilistic methods.

Введение

В отличие от стационарных электропотребителей на промышленных предприятиях электрический подвижной состав постоянно перемещается, и количество подвижных электроприемников на межподстанционных зонах меняется. Это связано с неравномерностью графика движения и пропуском поездов после ремонта железнодорожного пути, контактной сети и других видов работ. Режим токопотребления поезда также характеризуется большой неравномерностью [1–6].

Все это усложняет расчеты электропотребления и потерь электрической энергии в оборудовании тяговых подстанций и контактной сети, а также оценку экономического эффекта от внедрения новых технических устройств.

При расчетах нагрузок и потерь электрической энергии в оборудовании тяговой сети используются вероятностные методы расчетов.

Определение вероятности появления поездов

Для оценки вероятностей появления поездов на межподстанционной зоне предлагается использовать суточный график движения поездов.

Если через одинаковые интервалы времени провести сечения и определить по графику количество поездов на межподстанционной зоне, а затем посчитать число сечений с одним поездом n_1 , с двумя поездами n_2 и так далее до максимального на межподстанционной зоне $n_{\text{макс}}$, то тогда вероятности появления одного, двух и так далее до максимального числа поездов рассчитываются по следующим формулам:

для одного поезда

$$P_{n_1} = \frac{n_1}{N}, \quad (1)$$

для двух поездов

$$P_{n_2} = \frac{n_2}{N}, \quad (2)$$

для максимального количества поездов

$$P_{n_{\text{макс}}} = \frac{n_{\text{макс}}}{N}, \quad (3)$$

в которых N – общее число сечений графика движения поездов за рассматриваемый интервал времени.

Величина $n_{\text{макс}}$ на межподстанционной зоне длиной 20 км обычно не превышает 6–8. Это характерно для системы постоянного тока. На переменном токе $n_{\text{макс}} = 12–15$.

Определение средних токов и потерь мощности

Для того чтобы использовать вероятности (1)–(3) для расчетов средних токовых нагрузок в тяговых сетях или потерь мощности в преобразователях тяговых подстанций и контактной сети, необходимо предварительно определить средние токи или потери мощности при фиксированном числе поездов. Тогда каждому значению потерь будет соответствовать вероятность его появления, и средние величины токов фидеров, подстанций, трансформаторов можно рассматривать как математические ожидания.

Для среднего тока фидера

$$I_{\text{фс}} = \sum I_{\text{фн}} \cdot P_n, \quad (4)$$

где $I_{\text{фн}}$ – ток фидера при n поездах на межподстанционной зоне.

Для среднего эффективного тока трансформатора, равного эффективному току подстанции:

$$I_{\text{тэс}} = \sum I_{\text{тэн}} \cdot P_n, \quad (5)$$

здесь $I_{\text{тэн}}$ – эффективный ток трансформатора при n поездах на межподстанционной зоне.

Средние потери мощности в трансформаторе определяются выражением

$$\Delta P_{\text{ст}} = \sum_{n=0}^{n=n_{\text{макс}}} \cdot P_{\text{стн}} \cdot P_n, \quad (6)$$

в котором

$$\Delta P_{\text{стн}} = \frac{R}{k} \cdot \sum_{i=1}^{i=k} I_{\text{тэн}}^2 \cdot P_n, \quad (7)$$

где R – активное сопротивление трансформатора; k – число рассматриваемых мгновенных схем.

В формулах (4)–(7) выборочные средние потери в трансформаторе, например, для 10 мгновенных схем с двумя поездами находятся следующим образом:

$$\Delta P_{\text{ст2}} = \frac{1}{10} \cdot \sum_{k=1}^{k=10} \cdot P_{2k},$$

$$I_{\text{сэ2}} = \frac{1}{10} \cdot \sum_{k=1}^{k=10} I_{\text{тэ}k}.$$

Аналогично рассчитываются потери мощности в трансформаторе для поездов $n = 1, 2, \dots, n_{\text{макс}}$. Средние потери мощности в трансформаторе за сутки $\Delta P_{\text{ст}}$, вычисляемые как математическое ожидание, имеют число слагаемых в сумме, равное $n_{\text{макс}}$. Это максимальное количество на межподстанционной зоне, полученное при обработке графика движения поездов.

Точность таких расчетов средних величин зависит от числа сечений в выборке. Расчеты средних потерь мощности в элементах тяговой сети следует начинать с определения токов в них.

Для рассматриваемых моментов времени (сечений) составляются мгновенные схемы замещения с указанием положения поездов и значений потребляемых ими токов. Токи электровозов должны быть предварительно получены либо из тяговых расчетов, либо на основании опытных поездок по обследуемому участку.

По результатам расчетов мгновенных схем определяются токи фидеров, подстанций, трансформаторов, преобразователей энергии.

Потери в тяговых преобразовательных агрегатах системы постоянного тока складываются из потерь холостого хода $\Delta P_{\text{хх}}$, которые во многих случаях можно считать постоянными и равными номинальным потерям холостого хода $\Delta P_{\text{хх,н}}$, и потерь в медных обмотках $\Delta P_{\text{кз}}$, зависящих от квадрата тока подстанции, протекающего в них. Среднесуточные потери составляют

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{стп}} &= \Delta P_{\text{хх}} + \sum_{n=0}^{n=n_{\text{макс}}} I_{\text{пн}}^2 \cdot R \cdot P_n = \\ &= \Delta P_{\text{хх}} + \frac{S_{\text{э}}^2}{S_{\text{н}}^2} \cdot \Delta P_{\text{кз}}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$S_{\Sigma} = \sum_{n=0}^{n=n_{\max}} S_{\Sigma n} \cdot P_n, \quad (9)$$

где S_{Σ} – номинальная мощность трансформатора; $S_{\Sigma n}$ – средняя мощность трансформатора при n поездах на межподстанционной зоне.

В формулах (8), (9) эффективный ток вычислен с использованием вероятностей появления поездов на межподстанционной зоне и токов подстанций для фиксированных чисел поездов.

Аналогичным способом можно определить и потери в выпрямителях:

$$\Delta P_{\text{в}} = \Delta U_{\text{с}} \cdot I_{\text{св}},$$

здесь $\Delta U_{\text{с}}$ – падение напряжения на диодах при протекании по ним тока, в первом приближении его можно считать постоянным; $I_{\text{св}}$ – среднесуточный ток выпрямителя, равный среднесуточному току подстанции $I_{\text{сп}}$:

$$I_{\text{сп}} = \sum_{n=0}^{n=n_{\max}} I_{\text{сп}n} \cdot P_n.$$

Во всех приведенных формулах значения P_n одинаковые.

При расчете средних токов подстанций учитываются профиль пути, масса поезда, основное сопротивление движению, ограничения скорости и др. При таких условиях ток поезда возрастает пропорционально увеличению массы поезда.

Если при этом требуется установить зависимость тока поезда от пути при массах поездов, значительно превышающих массы на реальном участке, то можно ток, рассчитанный для максимальной массы на реальном участке, увеличить пропорционально росту массы проектируемого поезда.

В реальных условиях ток поезда может существенно зависеть от способа ведения его машинистом, наличия временных ограничений скорости и т. д.

Усредненное значение тока поезда не может быть построено сразу для всех поездов

с различными массами. Вначале необходимо токи поездов с разными массами привести к 1000 т. При этом экспериментальные зависимости токов от пути для фиксированного диапазона масс делятся на коэффициент

$$L = \frac{Q}{1000},$$

где Q – масса поезда.

Приведенные кривые наносятся на график и представляют собой стационарную случайную функцию, для которой строится математическое ожидание случайной функции. Если на рассматриваемой зоне обращаются поезда с массами до 10 000 т, то можно распределить массы на три весовых интервала: 1000–3000, 4000–7000 и 8000–10 000 т.

Для каждого интервала масс следует экспериментально получить зависимости тока поезда от пути и построить три математических ожидания токов поездов от пути.

Из графика движения определяются массы поездов, входящих в каждый весовой интервал, и вероятности появления поездов для каждого интервала P_{Q1} , P_{Q2} , P_{Q3} следующим образом:

$$P_{Q1} = \frac{N_1}{N}, P_{Q2} = \frac{N_2}{N}, P_{Q3} = \frac{N_3}{N},$$

здесь N_1 , N_2 , N_3 – количество поездов в первом, втором и третьем весовых интервалах; N – суточное число поездов, устанавливаемое по графику движения поездов.

Тогда средняя расчетная масса поезда вычисляется по формуле

$$Q_{\text{ср}} = \sum Q_i \cdot P_{Qi}.$$

Для этой массы находится математическое ожидание функции тока путем умножения величин токов математических ожиданий для весового интервала, в который попадает значение $Q_{\text{ср}}$, на коэффициент $L = Q_{\text{ср}}/1000$.

Данную функцию математического ожидания в зависимости от пути нужно исполь-

зывать при расчетах средних токов и потерь мощности в оборудовании тяговых подстанций [7–15].

В условиях эксперимента средний ток для каждого интервала времени определяется по амперметрам и показаниям счетчиков электроэнергии:

$$I_c = \frac{W}{T \cdot U},$$

где T – рассматриваемый период времени; W – показания счетчика электроэнергии за период времени T ; U – напряжение.

Заключение

Электротяговая нагрузка носит резкопеременный характер из-за перемещения поездов по межподстанционной зоне и их различного количества на ней. В связи с этим при расчетах нагрузок и потерь мощности в оборудовании тяговой сети используются вероятностные методы.

Значения токов и потерь мощности определяются для фиксированного числа поездов на межподстанционной зоне, а затем на основании вероятностей появления разных чисел поездов, полученных в ходе анализа графика движения, рассчитываются средние указанные величины за определенный период времени.

При прохождении по межподстанционной зоне поездов с различным весом усредненное значение тока поезда вычисляется на основе математического ожидания, найденного путем умножения величины токов математических ожиданий для соответствующего весового интервала на коэффициент $L = Q_{\text{ср}}/1000$.

Библиографический список

1. Агунов А. В. Анализ потерь мощности в контактной сети при поперечной емкостной компенсации с учетом перемещения поездов по межподстанционной зоне / А. В. Агунов, Д. А. Соколов // Тез. докл. Девятого Междунар. симпозиума «ELTRANS'2017». – СПб. : ПГУПС, 2017. – С. 10.
2. Бурьяноватый А. И. Вероятности появления максимальных токов фидеров / А. И. Бурьяноватый, В. М. Варенцов // Вестн. ВНИИЖТ. – 2014. – № 1. – С. 30–34.
3. Бурьяноватый А. И. Законы распределения токов фидеров при фиксированных числах поездов / А. И. Бурьяноватый, В. М. Варенцов // Тез. докл. Шестого Междунар. симпозиума «ELTRANS'2011». – СПб. : ПГУПС, 2011. – С. 17.
4. Бурьяноватый А. И. Использование законов распределения токов фидеров при фиксированном числе поездов для определения вероятностей максимальных нагрузок / А. И. Бурьяноватый, В. М. Варенцов, Т. В. Варенцова // Материалы Шестого Междунар. симпозиума «ELTRANS'2011». – СПб. : ПГУПС, 2013. – С. 121–129.
5. Бурьяноватый А. И. Использование статистических методов при оценке максимальных величин токов фидеров / А. И. Бурьяноватый, В. М. Варенцов // Материалы Пятого Междунар. симпозиума «ELTRANS'2009». – СПб. : ПГУПС, 2010. – С. 269–271.
6. Варенцов В. М. Оценка надежности преобразователей тяговых подстанций / В. М. Варенцов // Материалы Второго Междунар. симпозиума «ELTRANS'2003». – СПб. : ПГУПС, 2003. – С. 307–310.
7. Варенцов В. М. Электроснабжение электрических железных дорог / В. М. Варенцов, Э. П. Селедцов. – СПб. : ПГУПС, 2001. – 30 с.
8. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М. : Высшая школа, 1999. – 575 с.
9. Вентцель Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М. : Высшая школа, 2000. – 383 с.
10. Кузин С. Е. Методы расчета системы электро-снабжения электрических железных дорог / С. Е. Кузин. – Л. : Изд-во ЛИИЖТ, 1970. – 96 с.
11. Лебедев А. Б. Основы электрической тяги / А. Б. Лебедев. – Л. ; М. : ОНТИ. Гл. ред. энергетич. лит., 1937. – 620 с.
12. Розенфельд В. Е. Электрические железные дороги / В. Е. Розенфельд, Н. Н. Сидоров, С. Е. Кузин. – М. : Трансжелдориздат, 1951. – 536 с.

13. Соколов Д. А. Анализ потерь мощности в контактной сети при поперечной емкостной компенсации с учетом перемещения поездов по межподстанционной зоне / Д. А. Соколов, А. В. Агуннов // Бюл. результатов науч. исследований. – 2017. – Вып. 4 (25). – С. 199–207.

14. Соколов Д. А. Потери мощности в контактной сети с учетом перемещения поездов по межподстанционной зоне при поперечной емкостной компенсации / Д. А. Соколов, В. М. Варенцов // Транспорт : проблемы, идеи, перспективы : сб. трудов LXXVII Всерос. науч.-технич. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб. : ПГУПС, 2017. – С. 394–399.

15. Соколов Д. А. Потери мощности в проводах контактной сети железных дорог переменного тока при установке компенсирующего устройства в середине межподстанционной зоны с учетом движения по ней поездов / Д. А. Соколов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2017. – Т. 13, вып. 3 (52). – С. 79–88.

References

1. Agunov A. V. & Sokolov D. A. Analiz poter moshchnosti v kontaktnoy sety pry poperechnoy yemkostnoy kompensatsii s uchetom peremeshcheniya poyezdov po mezhpodstantsionnoy zone [The analysis of loss of power in the catenary system taking into account the movement of trains in an inter-substation zone under shunt capacitive compensation]. *Tezisy dokladov Devyatogo Mezhdunarodnogo simpoziuma "ELTRANS'2017"* [Abstracts of the 9th International symposium "ELTRANS'2017"]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2017, p. 10. (In Russian)
2. Buryanovaty A. I. Veroyatnosty poyavleniy maksimalnykh tokov fiderov [Peak current of feeders: occurrence probability]. Moscow, VNIIZhT Publ., 2014, no. 1, pp. 30–34. (In Russian)
3. Buryanovaty A. I. & Varentsov V. M. Zakony raspredeleniya tokov fiderov pry fiksirovannykh chislakh poyezdov [The laws of current distribution of feeders for a fixed number of trains]. *Tezisy dokladov Shestogo Mezhdunarodnogo simpoziuma "ELTRANS'2011"* [Abstracts of the 6th International symposium "ELTRANS'2011"]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2011, p. 17. (In Russian)
4. Buryanovaty A. I., Varentsov V. M. & Varentsova T. V. Ispolzovaniye zakonov raspredeleniya tokov fiderov pry fiksirovannom chisle poyezdov dlya opredeleniya veroyatnostey maksimalnykh nagruzok [The use of laws of current distribution of feeders for a fixed number of trains for the purpose of maximum load determination]. *Materialy Shestogo Mezhdunarodnogo simpoziuma "ELTRANS'2011"* [Proceedings of the 6th International symposium "ELTRANS'2011"]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2013, pp. 121–129. (In Russian)
5. Buryanovaty A. I. & Varentsov V. M. Ispolzovaniye statisticheskikh metodov pry otsenke maksimalnykh velichyn tokov fiderov [The use of statistical methods for the purpose of estimating peak current magnitudes of feeders]. *Materialy Pyatogo Mezhdunarodnogo simpoziuma "ELTRANS'2009"* [Proceedings of the 5th International symposium "ELTRANS'2009"]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2010, pp. 269–271. (In Russian)
6. Varentsov V. M. Otsenka nadezhnosti preobrazovateley tyagovykh podstantsiy [Reliability evaluation of converters at railway substations]. *Materialy Vtorogo Mezhdunarodnogo simpoziuma "ELTRANS'2003"* [Proceedings of the 2nd International symposium "ELTRANS'2003"]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2003, pp. 307–310. (In Russian)
7. Varentsov V. M. & Seledtsov E. P. *Elektrosnabzheniye elektricheskikh zheleznnykh dorog* [Electric railways: electric power supply]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2001, 30 p. (In Russian)
8. Ventsel E. S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, Vysshaya shkola (Higher school) Publ., 1999, 575 p. (In Russian)
9. Ventsel E. S. & Ovcharov L. A. *Teoriya sluchainykh protsessov i yeye inzhenerniye prilozheniya* [The theory of random processes and its engineering applications]. Moscow, Vysshaya shkola (Higher school) Publ., 2000, 383 p. (In Russian)
10. Kuzin S. E. *Metody rascheta sistemy elektrosnabzheniya elektricheskikh zheleznnykh dorog* [Power supply system of electric railways: calculation methods]. Leningrad, LIIZhT Publ., 1970, 96 p. (In Russian)
11. Lebedev A. B. *Osnovy elektricheskoy tyagy* [The foundations of electric traction]. Leningrad, Moscow, ONTI (Department of Scientific and Technical Information. Chief ed. board of energy. lit.) Publ., 1937, 620 p. (In Russian)

12. Rozenfeld V. E., Sidorov N. N. & Kuzin S. E. *Elektricheskiye zheleznnye dorogi* [Electric railways]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1951, 536 p. (In Russian)
13. Sokolov D. A. & Agunov A. V. Analiz poter moshchnosti v kontaktnoy sety pry poperechnoy yemkostnoy kompensatsii s uchetom peremeshcheniya poyezdov po mezhpodstantsionnoy zone [The analysis of power loss in the catenary system under shunt capacitive compensation taking into account the movement of trains in an inter-substation zone]. *Byulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of research results], 2017, issue 4(25), pp. 199–207. (In Russian)
14. Sokolov D. A. & Varentsov V. M. Potery moshchnosti v kontaktnoy sety s uchetom peremeshcheniya poyezdov po mezhpodstantsionnoy zone pry poperechnoy yemkostnoy kompensatsii. *Transport: problemy, idei, perspektivy* [The loss of power in the catenary system taking into account the movement of trains in an inter-substation zone under shunt capacitive compensation. Transport: problems, ideas, prospects]. *Sbornik trudov LXXVII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Transport: problems, ideas, prospects. Collected works of the 77th All-Russian scientific and technical conference of students, postgraduates and young scientists]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2017, pp. 394–399. (In Russian)
15. Sokolov D. A. Potery moshchnosti v provodakh kontaktnoy sety zheleznykh dorog peremennogo toka pry ustanovke kompensiruyushchego ustroystva v sereдине mezhpodstantsionnoy zony s uchetom dvizheniya po ney poyezdov [The loss of power in cable wires of alternate current railroad catenary system in the process of landing gear installation in the middle of inter-substation zone, taking into account the movement of trains]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2017, vol. 13, issue 3(52), pp. 79–88. (In Russian)

АГУНОВ Александр Викторович – д-р техн. наук, профессор, alexagunov@mail.ru; ВАРЕНЦОВ Валерий Михайлович – канд. техн. наук, доцент; *СОКОЛОВ Денис Алексеевич – аспирант, sokoloffffff@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 656.212.5.073

Д. Б. Бутунов, А. Г. Котенко**ОЦЕНКА НЕПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ
В РАБОТЕ СОРТИРОВОЧНОЙ СТАНЦИИ**

Дата поступления: 11.07.2018

Решение о публикации: 17.10.2018

Аннотация

Цель: Определить наиболее эффективный метод для оценки непроизводительных потерь в работе сортировочной станции. **Методы:** Применяются методы системного анализа, сравнения показателей работы сортировочной станции, графического моделирования. **Результаты:** Приведены основные виды непроизводительных потерь в работе сортировочных станций. На основе графического моделирования работы сортировочной станции Чукурсай определены фактические среднесуточные и среднемесячные величины времени нахождения вагонов по всем видам непроизводительных потерь, в том числе по паркам станции. Определены среднесуточные и среднемесячные экономические потери станции от непроизводительных потерь при переработке вагонопотоков. Установлено, что для оценки непроизводительных потерь сортировочных станций используемое графическое моделирование неэффективно. **Практическая значимость:** Оценка непроизводительных потерь в работе сортировочной станции по фактическим среднесуточным и среднемесячным величинам элементов непроизводительных потерь, в том числе по паркам станции, позволяет не только целенаправленно выявлять методы сокращения простоя вагонов, но и осуществлять точную оценку работы коллектива станции, а также корректировать норму простоя вагонов.

Ключевые слова: Сортировочная станция, непроизводительная потеря, время ожидания, время нахождения вагонов на станции, виды потерь, элемент простоя, аналитический метод, графическое моделирование, имитационное моделирование.

***Dilmurod B. Butunov**, postgraduate student, dilmurodpgups@mail.ru; **Alexey G. Kotenko**, D. Eng. Sci., associate professor, department chair, kotenko@pgups.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) ESTIMATION OF INEFFICIENT LOSSES IN RAILROAD YARD OPERATION

Summary

Objective: To determine a more sufficient method for estimation of inefficient losses in railroad yard operation. **Methods:** The methods of system analysis, performance comparison, as well as graphics simulation were applied. **Results:** The main types of insufficient losses in railroad yard operation were given. On the basis of graphic simulation of Chukursay railroad yard operation daily and monthly average downtime of cars according to all types of insufficient losses, including station parks was determined. Daily and monthly economic losses of the station from insufficient losses obtained in the process of car traffic volume operation were assessed. It was revealed that the graphic simulation used for the assessment of insufficient losses was inefficient. **Practical importance:** The assessment of insufficient losses in railroad yard operation according to daily and monthly values of elements of insufficient losses, including station parks, makes it possible not only to explore the methods reducing inactivity of cars, but also to fulfill accurate work evaluation of the staff, as well as to correct downtime standard of cars.

Keywords: Railroad yard, insufficient losses, waiting period, downtime of cars, types of losses, inactivity elements, analytical method, graphic simulation, simulation modeling.

Введение

Основная задача сортировочной станции – переработка вагонопотоков и формирование поездов в оптимальном режиме с тем, чтобы нахождение вагона на станции было минимальным и технологически обоснованным [1, 2]. В этой связи важнейшим показателем работы сортировочных станций является среднее время нахождения вагона на станции. Нормы времени нахождения вагонов на станции рассчитываются с учетом рациональной техноло-

гии работы отдельно для транзитных вагонов с переработкой и без нее, а также местных вагонов [3].

Основными видами непроизводительных потерь в работе сортировочной станции, согласно теории бережливого производства [4, 5] и методическим рекомендациям по оптимизации трудозатрат работников железнодорожных станций, служат время ожидания выполнения операций, дублирование операций, ненужные перемещения подвижного состава и рабочих (таблица) [6, 7].

Основные виды непроизводительных потерь в работе сортировочных станций

Группа потерь	Типовые потери	Примеры потерь
Время ожидания	Время нахождения вагонов на станции в ожидании	Ожидание закрепления состава по прибытию (в том числе из-за того, что сигналисты обслуживают несколько парков)
		Ожидание обработки составов
		Ожидание расформирования
		Ожидание и связанные с ними простои вагонов при проведении плановых и внеплановых «окон»
		Ожидание подачи и уборки вагонов с мест выполнения погрузо-разгрузочных операций
		Ожидание формирования
		Ожидание отправления (в том числе оформления перевозочного документа)
		Ожидание поездных локомотивов
Ненужная обработка и лишние процессы	Дублирование операций	Увеличение времени обработки составов в парках станций при поступлении распоряжений, приказов (после сходов, аварий и др.)
		Сверхнормативные затраты времени на выполнение технологических операций
		Несовершенные коммуникации, искусственное искажение информации, дублирование и повторное выполнение операций, излишняя документация и документирование деятельности на станции
		Дополнительные затраты на проверку номеров вагонов в грузовых поездах, прибывающих на станцию
		Повторное коммерческое и техническое обслуживание вагонов после проследования небольших расстояний
		Обслуживание состава после формирования (в сортировочном парке) и перед отправлением

Окончание таблицы

Группа потерь	Типовые потери	Примеры потерь
Ненужные перемещения рабочих	Нерациональная организация труда	Потери рабочего времени, связанные с удаленностью мест выполнения технологических операций
		Потери рабочего времени, связанные с нерациональным размещением оборудования, материалов и рабочих мест
Дефекты и их устранение	Дефекты и переделка	Нарушение порядка выдачи предупреждений на поезд
		Нарушение порядка и норм закрепления подвижного состава на путях парка тормозными устройствами
		Нарушение порядка оформления документов при перевозке грузов
		Нарушение технологии роспуска, приводящее к повреждению вагонов
		Нарушение порядка приготовления маневровых маршрутов
		Отправление, пропуск вагонов с техническими и коммерческими неисправностями
		Нарушение плана формирования поездов
Излишние запасы	Излишние мощности и запасы	Излишние маневровые локомотивы, не обеспеченные объемами маневровой работы
		Излишний вагонный парк под погрузку
		Избыточные мощности инфраструктуры станции
		Излишние затраты на содержание и обслуживание железнодорожных путей, устройств, механизмов
Необоснованная транспортировка материалов	Нерациональные перемещения подвижного состава по станции	Неоптимальные технологические процессы станционной работы, угловые передачи
		Повторная переработка вагонов
Скрытые потери от перепроизводства	Нарушение нормативов технологического процесса из-за нерационального взаимодействия подразделений	Досрочное выполнение технологических операций

Наибольший вклад в составе непроизводительных потерь вносит ожидание выполнения операций, основными причинами которого являются [6, 7]:

- недостатки планирования на уровне диспетчерского аппарата;
- отсутствие информации;
- слабые взаимодействия со смежными подразделениями, задействованными в одном технологическом процессе.

Для устранения этих причин целесообразно установить наиболее удобные способы учета и анализа потерь.

Обзор методов учета и анализа непроизводительных потерь

В теории менеджмента в рамках бережливого производства непроизводительные потери в работе сортировочной станции могут оцени-

ваться разнообразными методами: картирование потока создания ценности, кайдзен, канбан, стандартизация, «Рока-Йоке», визуализация, система 5S, система «точно вовремя» и др.

Вопросам учета и анализа непроизводительных потерь и развития методов бережливого производства посвящены работы многих ученых, однако большинство из них раскрывает отдельные аспекты проблемы, не предлагая универсального механизма оценки [5, 6, 8]. Например, авторы [9] предложили использовать методы картирования потока создания ценности. Ими на примере внедрения бережливого производства на железнодорожной станции Московка Западно-Сибирской железной дороги с целью уменьшения потерь времени, влияющих на время нахождения вагонов в парках станции, были сформированы карты потоков создания ценности процесса в ходе обработки поезда в парке приема сортировочной станции до применения мероприятий по сокращению времени технического обслуживания состава и коммерческого осмотра вагонов и после (рис. 1). Из [9] следует, что увеличение ценности возможно только за счет уменьшения времени на обслуживание состава в техническом и коммерческом отношении (рис. 1), но не указывается его конкретный механизм.

В теории эксплуатационной работы применяются методы, которые можно объединить в две группы – аналитические и методы моделирования (графического, табличного, имитационного и др.).

Типовой технологический процесс [2] рекомендует определять нормы времени нахождения вагона на станции методами либо табличного моделирования, либо графического на основе построения суточного плана-графика работы станции. Несмотря на то, что расчет времени нахождения вагонов на станции данными методами является приближенным и трудоемким, они широко используются на практике.

Графическое моделирование суточной работы станции представляет собой изображение работы станции по обработке транзитных и местных вагонопотоков в течение суток. План составляется на графические размеры движения, на двухсторонних станциях – отдельно для каждой системы. На план-графике прибытие и отправление поездов принимаются в соответствии с графиком движения поездов, продолжительность обработки в парках – по нормам технологического процесса. Работа пункта технического обслуживания локомотивов и обеспечения локомотивами



Рис. 1. Карта потока создания ценности процесса в ходе обработки поезда в парке приема сортировочной станции

и бригадами не показывается, т. е. принимается условной. Достоинство план-графика в наглядности и удобстве анализа работы станции с учетом взаимного влияния элементов друг на друга и на прилегающие участки; по суточному план-графику хорошо изучать технологию работы станции, но определение времени по нему связано с условностью характера исходных данных и прежде всего отсутствием механизмов учета неравномерности прибытия поездов на станцию, колебаний продолжительности технологических операций, отсутствием учета работы системы обеспечения составов локомотивами и бригадами.

В связи с этим устанавливаемые на основе суточного план-графика нормы времени нахождения вагонов, как правило, получаются существенно заниженными, а непроизводительные потери – завышенными.

Метод табличного моделирования заключается в последовательном сопоставлении интенсивности поступления составов (вагонов) в парк станции с интенсивностью их выхода после обработки за обследуемый период. В результате расчетов определяются вероятности состояний вагонов и время их нахождения под операциями. Достоинствами этого метода являются учет неравномерности поступления составов и обработки в парках, а также возможность моделирования за любой период времени, недостатком – хотя и меньшая, чем в случае применения графического моделирования, но все же большая трудоемкость расчетов. Кроме того, нарушаются требования системного подхода – расчетные подсистемы рассматриваются в качестве независимо функционирующих технологических подсистем, что не позволяет корректно учитывать занятость путей, работы локомотивов, враждебность в горловинах и др.

В результате нормы времени нахождения вагонов получаются достаточно приближительными. Вычисленные по этим группам потери зачастую не соответствуют действительности. Количество ошибок при использовании графического и табличного моделирования составляет примерно 20 % [10].

В группе *аналитических методов* можно выделить две подгруппы, направленные на расчет времени нахождения вагонов на станциях: первая – с помощью математического аппарата теории массового обслуживания, вторая – с использованием статистических зависимостей. Во всех случаях аналитические методы применяются для определения среднего времени нахождения вагонов только в подсистемах станции. Их недостатком является отсутствие учета влияния подсистем друг на друга [11]. Обычно количество ошибок – порядка 50 % [10].

Метод имитационного моделирования заключается в многократно повторяемом расчете на ЭВМ станционных процессов с большей или меньшей степенью их детализации. При этом собирается статистический материал по интересующим параметрам процесса. Формализация исследуемого процесса заключается в расчленении его на элементы, между которыми устанавливаются взаимосвязи, аналогично существующим в реальности. Далее воспроизводится построенный моделирующий алгоритм для получения интересующих характеристик процесса.

Применение имитационного моделирования не имеет ограничений на сложность описываемых объектов при исследовании станционных систем, но позволяет решить ряд задач совершенствования технологий их работы: выявить элементы, ограничивающие пропускную и перерабатывающую способности, обосновать нормирование времени нахождения вагонов в подсистемах станции с расчленением простоя по элементам, оценить эффективность мер перспективного развития станции и др.

К недостаткам имитационного моделирования следует отнести сложность как разработки его инструментов, их отладки и верификации, так и использования для получения результатов. Вместе с тем имитационное моделирование принято считать основным методом анализа и расчета больших систем [11].

Внешний вид инструмента для имитационного моделирования работы станции представлен на рис. 2–4. Он состоит из трех элементов

(вкладок) [12]: параметры, график и журнал. На вкладке «Параметры» (рис. 2) указываются параметры потока поездов и его переработки. После выполнения процесса моделирования происходит построение графика обработки поездов на заданный период (рис. 3). На его основе составляется таблица поступления и обработки поездов на станции (рис. 4).

В работе [10] отмечается, что количество ошибок при использовании методов имитационного моделирования варьируется на уровне 5–10 %, что существенно лучше, чем у перечисленных ранее методов.

Анализ параметров моделирования и оценки времени нахождения вагона на станции

Вопросами моделирования времени нахождения вагона на сортировочной станции

занимались многие ученые, однако они использовали разный набор параметров. Например, Н. Н. Шабалин [13] отмечает, что для оптимизации процесса организации вагонопотоков на железных дорогах необходимо анализировать работу сортировочных станций с учетом «лимитирующих» элементов в процессе расформирования и формирования. Он предлагает, чтобы определить среднее время нахождения транзитных вагонов с переработкой (в ч), описывать действие лимитирующих элементов по формуле

$$t_{\text{пер}} = t_{\text{обр}} + t_{\text{ож}}^{\text{р}} + t_{\text{г}} + t_{\text{нак}} + t_{\text{ож}}^{\text{ф}} + t_{\text{ф}} + t_{\text{обр}} + t_{\text{ож}}^{\text{о}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{обр}}$ – время обработки состава в парке приема, ч; $t_{\text{ож}}^{\text{р}}$ – время ожидания расформирования состава, ч; $t_{\text{г}}$ – горочный интервал, ч; $t_{\text{нак}}$ – время простоя вагонов под накоплением, ч; $t_{\text{ож}}^{\text{ф}}$ – время ожидания окончания формиро-

Моделирование работы станции

Параметры | График | Журнал

Поезда

Общее число поездов в сутки: 30

Число пригородных поездов в сутки (6:00-10:00): 0

Число пассажирских поездов в сутки: 0

Доля поездов, поступающих в расформирование: 20

Доля поездов со сменой локомотива: 30

Доля поездов со сменой локомотивной бригады: 50

Время ожидания/обработки, мин

Время обработки поездов, поступающих в расформирование: 80

Время обработки поездов со сменой локомотива: 50

Время обработки поездов со сменой локомотивной бригады: 30

Время ожидания поездного локомотива: 10

Время на расформирование: 30

Коэффициенты вариации (от 0 до 1)

Коэффициент вариации времени обработки: 0,15

Коэффициент вариации времени ожидания поездного локомотива: 0,20

Коэффициент вариации времени ожидания горочного локомотива: 0,10

Прочее

Количество суток: 1

Параметр Эрланга: 2

Минимальный интервал между поездами, мин: 8

Станция

Число ПОП в парке: 5

Число бригад ПТО в парке: 3

Количество испытаний: 30

Перейти к графику движения

Перейти к журналу регистрации

Применить параметры

Выполнить

Закреть приложение

Рис. 2. Окно «Параметры», программы «Моделирование работы станции»

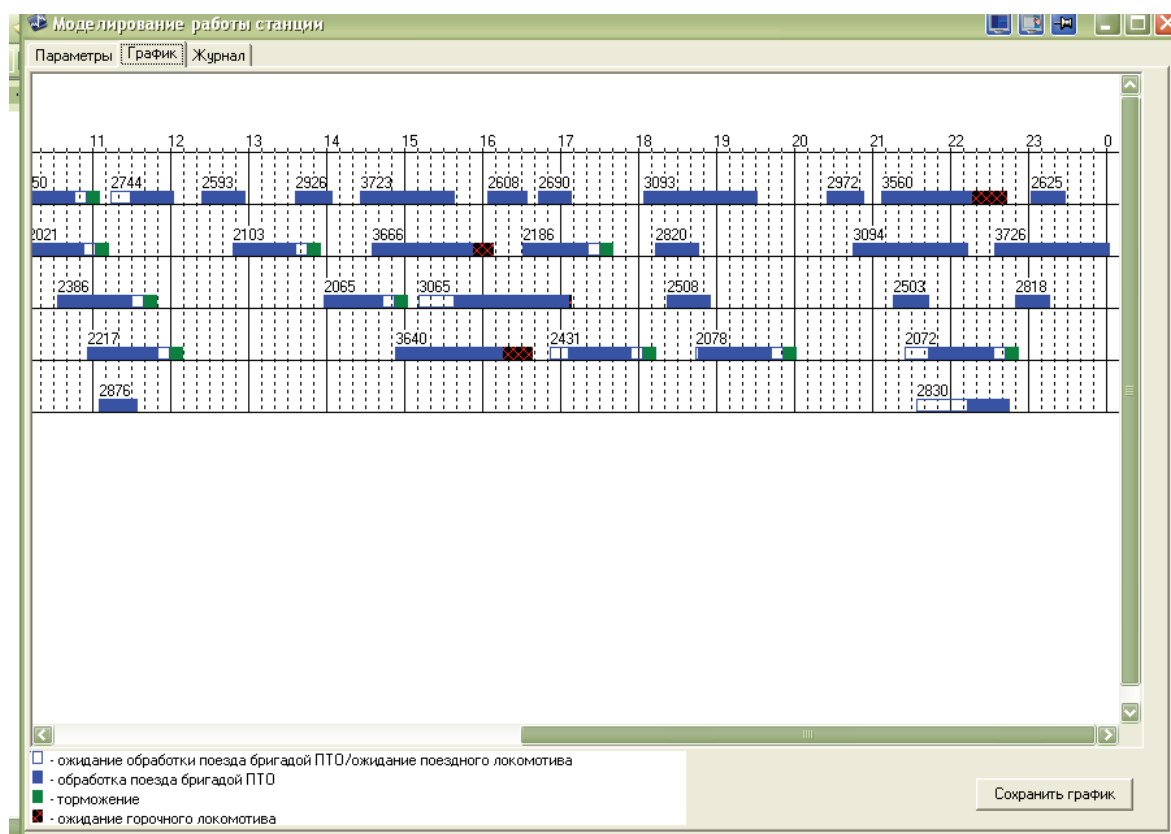


Рис. 3. График обработки грузовых поездов в парке прибытия

Моделирование работы станции

Параметры | График | Журнал

№ сужок	№ поезда	время прибытия	время отправления	итоговое время	время ожидания	вр.ож.бригады ПТО	вр.ож.гор.лок-ва
1 сужок	2447	09:45	10:59	01:14	00:20	00:00	00:00
1 сужок	2407	10:47	11:53	01:06	00:20	00:00	00:00
1 сужок	2561	10:55	11:26	00:31	00:00	00:00	00:00
1 сужок	2137	11:03	12:31	01:28	00:43	00:23	00:00
1 сужок	3023	11:11	12:57	01:46	00:22	00:22	00:00
1 сужок	3772	11:26	13:42	02:16	00:45	00:45	00:00
1 сужок	3956	12:15	14:12	01:57	00:43	00:42	00:01
1 сужок	2659	14:05	14:31	00:26	00:00	00:00	00:00
1 сужок	3161	14:13	15:40	01:27	00:00	00:00	00:00
1 сужок	2056	14:29	15:48	01:19	00:22	00:02	00:00
1 сужок	2939	15:27	15:56	00:29	00:01	00:01	00:00
1 сужок	3399	15:56	17:20	01:24	00:00	00:00	00:00
1 сужок	2091	16:57	17:26	00:29	00:00	00:00	00:00
1 сужок	2340	17:05	18:37	01:32	00:35	00:15	00:00
1 сужок	2911	17:25	17:53	00:28	00:01	00:01	00:00
1 сужок	2012	17:33	18:21	00:40	00:20	00:20	00:00
1 сужок	2522	17:49	18:46	00:57	00:28	00:28	00:00
1 сужок	2944	20:23	20:52	00:29	00:00	00:00	00:00
1 сужок	3509	20:55	22:17	01:22	00:00	00:00	00:00

Введите имя Excel файла: _____ Среднесуточное значение: 32:58 06:54 03:53 00:01

Журнал Экспортировать в Excel Среднее время: 01:06 00:14 00:08 00:00

Рис. 4. Протокол работы модели, отображаемый на вкладке «Журнал»

вания составов, ч; t_{ϕ} – время окончания формирования составов и перестановку их в парк отправления, ч; $t_{обр}$ – время обработки состава в парке отправления, ч; $t_{ож}^0$ – время ожидания отправления, ч.

Вместе с тем в формуле (1) не учтено влияние таких элементов как ожидание обработки состава по прибытию и по отправлению, ожидание перестановки готовых составов в парк отправления, ожидание поездного локомотива в парке отправления. Эти и другие элементы описываются средним временем ожидания

$$t_{ож} = \frac{\psi^2 \cdot (1 + v_{обсл}^2)}{2 \cdot r \cdot (1 - \psi)}, \quad (2)$$

здесь ψ – коэффициент загрузки входного канала; $v_{обсл}^2$ – коэффициент вариации длительности обслуживания; r – среднечасовая интенсивность поступления составов.

В работе [14] среднее время ожидания обслуживания в подсистемах станции находится следующим образом:

$$t_{ож} = \frac{\psi^2 \cdot (v_{вх}^2 + v_{обсл}^2)}{2 \cdot \mu \cdot (1 - \psi) \cdot [1 - v_{вх} \cdot (1 - \psi)]}, \quad (3)$$

где $v_{вх}$ – коэффициент вариации входящего потока; $v_{обсл}$ – коэффициент вариации длительности обслуживания; μ – интенсивность обслуживания.

Г. С. Васильев [15] предложил для вычисления межоперационного ожидания вагонов на станциях эмпирическую формулу

$$t_{ож}^p = y \times \frac{n_{пр}^{пс} \cdot (8,1 \cdot \gamma_{гор}^2 - 8,65 \cdot \gamma_{гор} + 2,35)}{n_{ож}}, \quad (4)$$

в которой y – числовой коэффициент; $\gamma_{гор}$ – загрузка горки; $n_{пр}^{пс}$ – суточное число пассажирских и грузовых поездов; $n_{ож}$ – средняя длина очереди в ожидании обслуживания.

Таким образом, несмотря на единство подходов и принципов определения времени нахождения вагонов на станциях, используемая параметрическая база весьма различна.

На практике время нахождения транзитного вагона с переработкой (в ч) отражается в аналитической справке о работе сортировочных станций и включает в себя параметры

$$t_{с/п} = t_{пп} + t_{расф} + t_{сп} + t_{по}, \quad (5)$$

где $t_{пп}$ – время нахождения вагона в парке прибытия от момента прибытия до начала расформирования состава, ч; $t_{расф}$ – время расформирования составов, ч; $t_{сп}$ – время нахождения вагона в сортировочном парке, ч; $t_{по}$ – время нахождения вагона в парке отправления от окончания формирования состава или перестановки его в парк отправления до отправления поезда, ч.

Кроме этого, каждый параметр времени нахождения вагона в парке подразделяется на элементы.

В парке прибытия параметр $t_{пп}$ (в ч) состоит из таких элементов:

$$t_{пп} = t_{зак.огр} + t_{ож}^{обр} + t_{обр} + t_{ож}^{расф}, \quad (6)$$

здесь $t_{зак.огр}$ – время на закрепление и ограждение состава в парке приема (от момента прибытия на станцию до установки ограждения состава), ч; $t_{ож}^{обр}$ – время ожидания обработки (от установки ограждения до начала обработки состава), ч; $t_{обр}$ – время обработки состава (от начала обработки состава до ее окончания), норматив времени зависит от производящих обработку по прибытию служб, количества исполнителей, технологии проведения обслуживания и параллельности выполнения операций, ч; $t_{ож}^{расф}$ – время ожидания расформирования (от окончания обработки составов до прицепки маневрового локомотива для надвига на сортировочную горку), ч.

В сортировочном парке параметр $t_{сп}$ (в ч) включает следующие элементы:

$$t_{сп} = t_{нак} + t_{ож}^{фор} + t_{фор.пер}, \quad (7)$$

где $t_{нак}$ – время накопления (от момента окончания роспуска состава до окончания накопления на сортировочном пути парка), норматив

времени зависит от мощности назначения, установленного планом формирования, ч; $t_{ож}^{фор}$ – время ожидания формирования (от окончания накопления до заезда маневрового локомотива на путь сортировочного парка для формирования состава), ч; $t_{фор.пер}$ – время формирования и перестановки (от момента заезда маневрового локомотива на путь сортировочного парка для формирования состава до окончания перестановки состава или формирования состава в сортировочно-отправочном парке), ч.

В парке отправления параметр $t_{по}$ (в ч) под-
разделяется на элементы

$$t_{по} = t_{зак.огр} + t_{ож}^{обр} + t_{обр} + t_T + t_{об.торм} + t_{ож}^{отп}, \quad (8)$$

где $t_{зак.огр}$ – время на закрепление и ограждение состава в парке отправления (от перестановки состава или до окончания формирования состава в сортировочно-отправочном парке до установки ограждения), ч; $t_{ож}^{обр}$ – время ожидания обработки (от установки ограждения до начала обработки состава), ч; $t_{обр}$ – время обработки состава (от начала до ее окончания), норматив времени зависит от производящих обработку по отправлению служб, количества исполнителей, технологии проведения обслуживания и параллельности выполнения операций, ч; t_T – время обеспечения поезда тягой (от окончания обработки состава до прицепки поездного локомотива), ч; $t_{об.торм}$ – время обеспечения поезда тормозами (от момента обеспечения поезда тягой до готовности поезда к отправлению), ч; $t_{ож}^{отп}$ – время ожидания отправления (от окончания обеспечения поезда тормозами до отправления поезда со станции), ч.

Определенные по формулам (2)–(8) данные сводятся в форму ДО-24 ВЦ [3]. Использование ее параметров для анализа среднего времени нахождения вагона на станции, включая составляющие их элементы, расширяет возможности поиска непроизводительных потерь времени и последующего устранения причин их появления.

Результаты моделирования непроизводительных потерь для станции Чукурсай

Время нахождения транзитных вагонов с переработкой на реальной станции определяется с учетом принятой технологии обработки транзитных вагонов с переработкой для сортировочных станций (рис. 5). Пунктирными линиями отражены блоки межоперационных ожиданий, сплошными – блоки технологических операций.

Время нахождения транзитных вагонов с переработкой на станции Чукурсай устанавливалось методом графического моделирования путем построения суточного планграфика, который является технологическим документом, определяющим основные показатели работы станции:

- нормы времени нахождения транзитных вагонов без переработки и с нею в общем и с расчленением по элементам, время нахождения местных вагонов под одной грузовой операцией;
- коэффициент сдвоенных операций;
- коэффициенты использования маневровых локомотивов по времени и их производительность в вагонах;
- показатели надежности на работу станции и основных элементов и т. д.

В ходе моделирования проанализировано фактическое значение времени нахождения транзитных вагонов с переработкой. Определены доли непроизводительных потерь времени путем сравнения с плановыми значениями.

На рис. 6, а, б представлены результаты анализа непроизводительных потерь времени транзитного вагона с переработкой. Из них можно сделать вывод, что непроизводительные потери практически зависят от рассматриваемого временного периода. Проведенный анализ времени нахождения транзитных вагонов с переработкой по элементам простоя на станции Чукурсай показал, что фактическое время их нахождения на станции намного превышает запланированное:

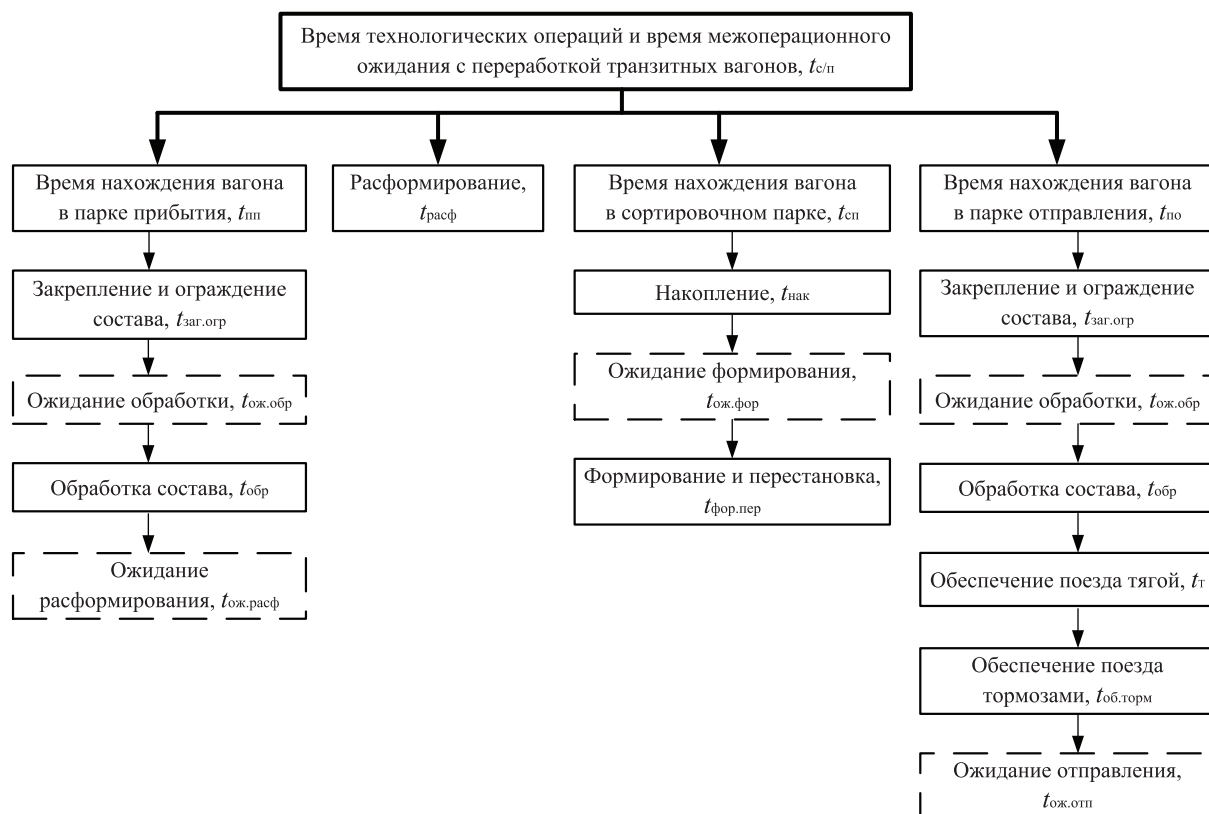


Рис. 5. Нахождение транзитного вагона с переработкой на сортировочной станции

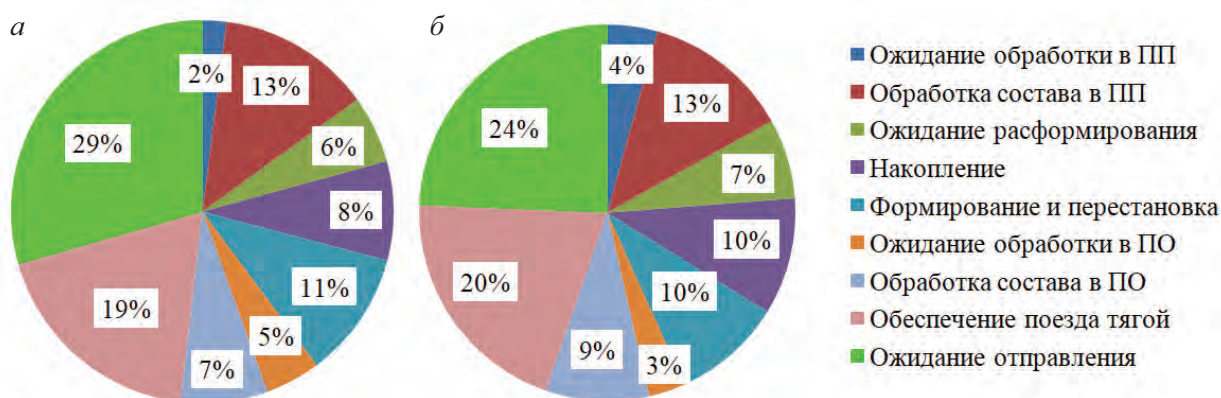


Рис. 6. Структура среднесуточных (а) и среднемесячных (б) непроизводительных потерь в работе станции Чукурсай

- среднесуточные в парке приема превышают планируемые на 34,2%, в сортировочном парке – на 9,6%, в парке отправления – на 46,9%;

- среднемесячные в парке приема превышают планируемые на 37%, в сортировочном парке – на 11%, в парке отправления – на 51%.

С точки зрения экономики непроизводительные потери времени измеряются в денежном эквиваленте. Рассчитаем их с помощью метода расходных ставок.

Из рис. 7, а, б можно сделать вывод, что экономические потери станции одного вагона составляют: среднесуточные – 1023 тыс. сум, среднемесячные – 36 030 тыс. сум.

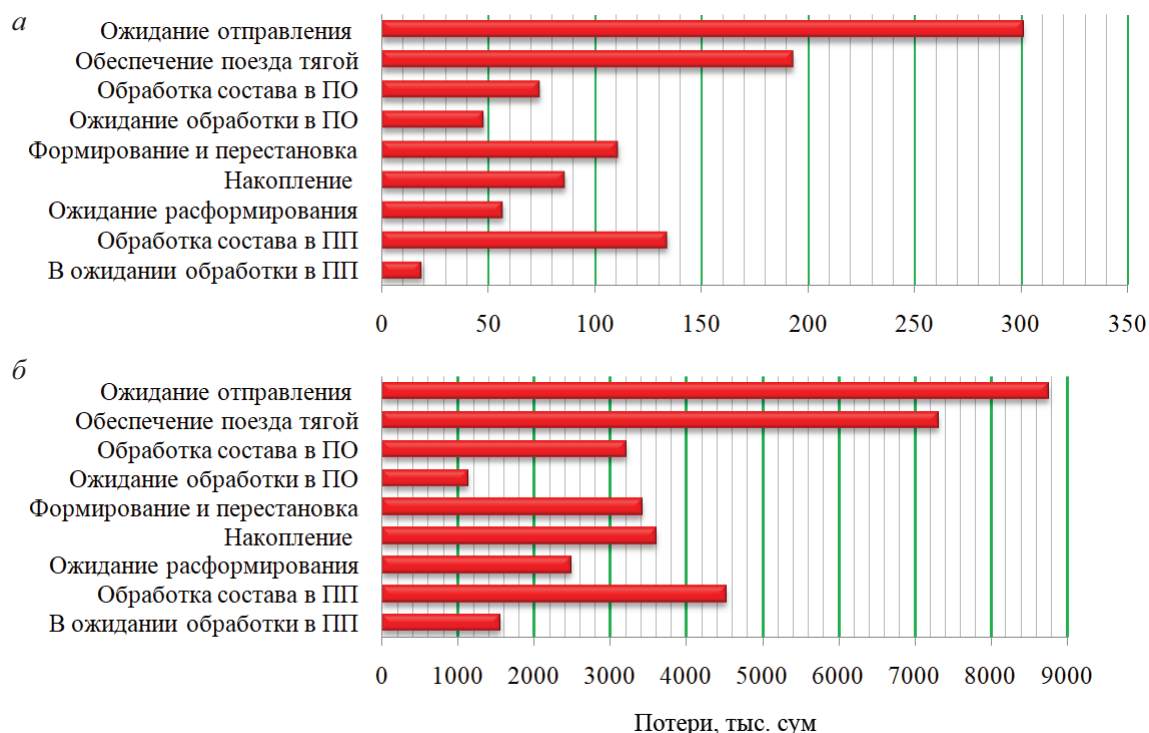


Рис. 7. Среднесуточные (а) и среднемесячные (б) потери в работе станции Чукурсай

В ходе моделирования установлено, что достоверные результаты возможно получить лишь при графическом моделировании работы станции, которое проводим для целого ряда нетипичных суток (в данном исследовании выбрано дней с 1 по 5, с 11 по 15 и с 27 по 31) с последующим усреднением результатов на месяц. Это, как показала оценка результатов, приводит к погрешностям порядка 18–23 %.

Заключение

Одним из основных видов непроизводительных потерь при перевозке грузов железнодорожным транспортом является простой на сортировочных станциях в ожидании выполнения технологических операций.

Достоинства и недостатки существующих методов анализа межоперационного простоя показывают, что наилучшим для оценки непроизводительных потерь сортировочной станции служит имитационное моделирование.

Моделированием времени нахождения вагонов на сортировочных станциях занимались

многие исследователи, однако наборы использованных ими параметров существенно отличаются друг от друга. Поэтому для анализа времени нахождения вагонов на станциях в данной работе использовались параметры формы отчетности ДО-24 ВЦ, применяемой в настоящее время на железных дорогах стран СНГ.

На основе графического моделирования работы сортировочной станции Чукурсай дана оценка среднесуточным и среднемесячным значениям (потери в ожидании обработки и обработки в парке приема и отправления, ожидание расформирования, накопление, формирование и перестановка, в обеспечении поезда тягой и ожидание отправления по паркам станции). Основным недостатком такого метода заключается в том, что достоверные результаты получаются лишь при моделировании ряда нетипичных суток с последующим усреднением, при этом ошибка составляет примерно 18–23 %. Это обуславливает необходимость применения имитационного моделирования для дальнейшей оценки непроизводительных потерь в работе сортировочной станции Чукурсай.

Библиографический список

1. Бородин А. Ф. Технология работы сортировочных станций : учеб. пособие / А. Ф. Бородин, Г. М. Биленко, О. А. Олейник, Е. В. Бородина ; под ред. А. Ф. Бородина. – М. : РГОТУПС, 2002. – 192 с.
2. Типовой технологический процесс работы сортировочной станции. – М. : Транспорт, 2003. – 192 с.
3. Инструктивные указания о порядке автоматизированного ведения внутренней формы статистической отчетности ДО-24 ВЦ «Отчет о работе сортировочных станций» и ДО-24а ВЦ «Отчет о работе грузовых станций». – М. : ОАО «РЖД», 2016. – 45 с.
4. Концепция применения технологий бережливого производства в ОАО «РЖД». – М. : ОАО «РЖД», 2010. – 63 с.
5. Калинина Д. В. Картирование процессов как инструмент организации производства / Д. В. Калинина, Л. В. Будченко // Мир транспорта. – 2015. – № 1. – С. 126–137.
6. Методические рекомендации по оптимизации трудозатрат работников железнодорожных станций при внедрении бережливого производства. – Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 23.04.2012 г. № 805р. – М. : ОАО «РЖД», 2012. – 76 с.
7. Методическое руководство по применению бережливого производства на станциях от 25.06.2012 г. № 1254р М ЦД 2.10.009. – М. : ОАО «РЖД», 2012. – 44 с.
8. Игольников Б. В. Методы сокращения непроизводительных затрат / Б. В. Игольников, Е. Б. Бабошин, М. И. Климчук // Мир транспорта. – 2012. – № 5. – С. 68–71.
9. Уварова О. В. Предложения по внедрению элементов «бережливого производства» на железнодорожной станции Московка / О. В. Уварова, Ю. А. Колосова // Экономика железных дорог. – 2015. – Вып. 1. – С. 87–94.
10. Александров А. Э. Использование моделей при расчете и оптимизации систем железнодорожного транспорта / А. Э. Александров // Наука и техника транспорта. – 2008. – Вып. 2. – С. 54–56.
11. Бобровский В. И. Функциональное моделирование работы железнодорожных станций : монография / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко,

Р. В. Вернигора, В. В. Малашкин. – Днепропетровск : Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. транспорта им. акад. В. Лазаряна, 2015. – 269 с.

12. Котельников С. С. Имитационное моделирование работы станций / С. С. Котельников // Современные проблемы транспортного комплекса России : межвуз. сб. науч. трудов. – Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2011. – С. 82–86.

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

14. Акулиничев В. М. Определение межоперационных простоев вагонов на сортировочных станциях / В. М. Акулиничев, В. И. Бодюл, Г. Е. Казшин // Труды МИИТ. – 1974. – Вып. 379. – С. 3–32.

15. Васильев Г. С. Нормы для расчета плана формирования поездов / Г. С. Васильев // Вестн. ВНИИЖТ. – 1964. – № 8. – С. 51–54.

References

1. Borodin A. F., Bilenko G. M., Oleynik O. A. & Borodina E. V. *Tekhnologiya raboty sortirovochnykh stantsiy* [Marshalling yards operation method]. Ed. by A. F. Borodin. Moscow, RGOTUPS Publ., 2002, 192 p. (In Russian)
2. *Tipovoy tekhnologicheskii protsess raboty sortirovochnoy stantsii* [Standard technical operating process of marshalling yard operation]. Moscow, Transport Publ., 2003, 192 p. (In Russian)
3. *Instruktivniye ukazaniya o poryadke avtomatizirovannogo vedeniya vnutrenney formy statisticheskoy otchetnosti DO-24 VTs "Otchet o rabote sortirovochnykh stantsiy" i DO-24a VTs "Otchet o rabote gruzovich stantsii"* [Instructional directions on the order of automated accounting of in-house statistical reporting form DO-24 CC "A report on operation of marshalling yards" and DO-24a CC "A report on operation of station yards"]. Moscow, ОАО "RZhD" Publ., 2016, 45 p. (In Russian)
4. *Kontseptsiya primeneniya tekhnologiy berezhlivogo proizvodstva v ОАО "RZhD"* [Lean production technologies application concept in ОАО "RZhD"]. Moscow, ОАО "RZhD" Publ., 2010, 63 p. (In Russian)
5. Kalinina D. V. & Budchenko L. V. *Kartirovaniye protsessov kak instrument organizatsii proizvodstva*

[Process mapping – a tool for industrial engineering]. *Mir transporta* [The world of transport], 2015, no. 1, pp. 126–137. (In Russian)

6. *Metodicheskiye rekomendatsii po optimizatsii trudozatrata rabotnikov zheleznodorozhnykh stantsiy pry vnedrenii berezhlivogo proizvodstva* [Guidelines on labor cost optimization for railroad personnel when implementing lean production]. Utv. rasporyazheniyem OAO “RZhD” ot 23.04.2012 g., no. 805r [Approved by OAO “RZhD” order dated 23.04.2012, N 805p]. Moscow, OAO “RZhD” Publ., 2012, 76 p. (In Russian)

7. *Metodicheskoye rukovodstvo po primeneniyu berezhlivogo proizvodstva na stantsiyakh ot 25.06.2012 g. no. 1254r M TsD 2.10.009* [Guidelines on the application of lean production at stations dated 25.06.2012 N 1254r M TsD 2.10.009]. Moscow, OAO “RZhD” Publ., 2012, 44 p. (In Russian)

8. Igolnikov B. V., Baboshin E. B. & Klimchuk M. I. *Metody sokrashcheniya neproizvoditelnykh zatrat* [Reduction methods of wasteful expenditures]. *Mir transporta* [The world of transport], 2012, no. 5, pp. 68–71. (In Russian)

9. Uvarova O. V. & Kolosova Y. A. *Predlozheniya po vnedreniyu elementov “berezhlivogo proizvodstva” na zheleznodorozhnoy stantsii Moskovka* [Propositions on implementation of “lean production” elements at Moskovka railway station]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [Railroad economy], 2015, issue 1, pp. 87–94. (In Russian)

10. Aleksandrov A. E. *Ispolzovaniye modeley pry raschete i optimizatsii system zheleznodorozhnogo transporta* [Application of models in computation and

optimization of railroad transport systems]. *Nauka i tekhnika transporta* [Transport Science and Technology], 2008, issue 2, pp. 54–56. (In Russian)

11. Bobrovskiy V. I., Kozachenko D. N., Vernigora R. V. & Malashkin V. V. *Funktsionalnoye modelirovaniye raboty zheleznodorozhnykh stantsiy* [Functional modeling of yard service]. Dnepropetrovsk, Academician V. Lazaryan Dnepropetrovsk National University of Railway Transport Publ., 2015, 269 p. (In Russian)

12. Kotelnikov S. S. *Imitatsionnoye modelirovaniye raboty stantsii* [Yard service simulation modeling]. *Sovremennyye problem transportnogo kompleksa Rossii* [Modern issues of the Russian transport system]. Mezhdvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov [Interuniversity coll. of research papers]. Magnitogorsk, G. I. Nosov Magnitogorsk State Tech. University Publ., 2011, pp. 82–86. (In Russian)

13. Shabalin N. N. *Optimizatsiya protsessa pererabotki vagonov na stanstiyakh* [Optimization process of yard operation]. Moscow, Transport Publ., 1973, 184 p. (In Russian)

14. Akulinichev V. M., Bodyul V. I. & Kazshin G. E. *Opredeleniye mezhoperatsionnykh proshtoyev vagonov vagonov na sortirovochnykh stantsiyakh* [Determination of in-process car detention at marshalling yards]. *Trudy MIIT* [MIIT Proceedings], 1974, issue 379, pp. 3–32. (In Russian)

15. Vasiliev G. S. *Normy dlya rascheta plana formirovaniya poyezdov* [Design norms for train composition]. *Vestnik VNIIZhT* [VNIIZhT Proceedings], 1964., no. 8, pp. 51–54. (In Russian)

*БУТУНОВ Дилмурод Баходирович – аспирант, dilmurodpugs@mail.ru; КОТЕНКО Алексей Геннадьевич – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, kotenko@pgups.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 620.179.12

А. В. Курков, И. А. Смирнов, А. Д. Шубин, С. С. Пушкин**ВЫЯВЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ ТРЕЩИН В ГРЕБНЯХ БАНДАЖЕЙ
ЛОКОМОТИВНЫХ КОЛЕС¹**

Дата поступления: 11.10.2018

Решение о публикации: 17.10.2018

Аннотация

Цель: На основе характеристик шумовых сигналов ультразвуковой поверхностной волны в бездефектных бандажах локомотивных колес и характеристик эхо-сигналов от реальных и искусственных трещин определить параметры контроля для выявления поперечных трещин в гребнях бандажей локомотивных колес. **Методы:** Изготовлена модель трещины в виде пропила в гребне цельнокатаного колеса, измерены амплитуды эхо-сигналов ультразвуковой поверхностной волны от модели трещины, реальных трещин, а также амплитуды шумовых сигналов этой волны на бездефектных бандажах локомотивных колес. **Результаты:** Определены характеристики шумовых сигналов ультразвуковой поверхностной волны и эхо-сигналов от реальных и искусственных трещин в бандажах локомотивных колес. Разработана методика по выявлению поперечных трещин в бандажах локомотивных колес. **Практическая значимость:** Внедрение описанной методики позволит выявлять поперечные трещины бандажей локомотивных колес на ранней стадии их развития, что предотвратит излом бандажа и, как следствие, возможное крушение поезда.

Ключевые слова: Трещина, бандаж, гребень, колесо, неразрушающий контроль, сортировочная горка, методика, ультразвуковой контроль.

Alexander V. Kurkov, Cand. Eng. Sci., associate professor, a.v.kurkov-spb@mail.ru; ***Ivan A. Smirnov**, student, ivan.18smirnoff@gmail.com; **Alexander D. Shubin**, student, shubin.sasha.28.01.98@gmail.com; **Sergey S. Pushkin**, student, Pushkin.sergey97@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) DETECTION OF TRANSVERSE CRACKS IN FLANGES OF LOCOMOTIVE WHEELS

Summary

Objective: To determine control parameters for the detection of transverse cracks in flanges of locomotive wheels based on characteristics of noise signals of an ultrasonic surface wave in defect-free flanges of locomotive tires as well as characteristics of return signals from real and artificial cracks. **Methods:** A crack model was designed in the form of a sawcut made in the flange of a solid wheel. Amplitudes of return signals of an ultrasonic surface wave were measured from a crack model, real cracks, as well as amplitudes of noise signals of the wave on defect-free flanges of locomotive tires. **Results:** Characteristics of noise signals of an ultrasonic surface wave and return signals from real and artificial cracks in flanges of locomotive tires were determined. The procedure of detecting transverse cracks in flanges of locomotive tires was developed. **Practical importance:** The implementation of the procedure in question will make it possible to detect transverse cracks in flanges of locomotive tires at an early stage of their development. The latter will prevent flange rupture and, therefore, possible train crash.

Keywords: Crack, binding band, flange, wheel, nondestructive control, gravity yard, procedure, ultrasonic check.

¹ Данная статья написана при поддержке Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» инициативных научных работ, выполняемых студенческими научными коллективами.

Введение

В настоящей статье предлагается методика выявления поперечных трещин в гребнях бандажей колес локомотивов.

Впервые подобные поперечные трещины были обнаружены при обточке бандажей локомотивных колес. Бандаж – это деталь составного колеса, имеющая специальный профиль, который обеспечивает его контакт с рельсом и задаваемые условия контакта. Во время проведения такой процедуры происходил откол кусков гребня, что приводило к его непригодности. Данные трещины наиболее часто встречаются на гребнях колес ЧМЭЗ [1] на сортировочных горках при выполнении маневровых работ [2] в условиях низких температур. Возможно, это явление связано с большим перепадом температур из-за торможения локомотивом состава с разомкнутыми тормозными магистралями. Поскольку вагоны, которые спускают с горки, тормозятся только за счет локомотива, то места прижатия тормозных колодок сильно нагреваются [3]. В условиях низких температур происходит их последующее резкое охлаждение. В результате на гребнях бандажей образуются термические трещины или трещины напряжения [4].

Это дефект поверхности, представляющий собой разрыв металла, идущий вглубь под прямым углом к поверхности, который возникает вследствие напряжений, связанных со структурными превращениями или неравномерным нагревом и охлаждением.

Визуальным методом контроля [5] выявлять данные трещины весьма затруднительно, поскольку их размеры слишком малы, а также из-за состояния поверхности гребня и отсутствия доступа ко всей поверхности колеса. На рис. 1 представлен внешний вид трещины на гребне бандажа. Видно, что заметить такую трещину возможно, но вероятность пропуска дефекта очень велика.

Постановка задачи

Цель настоящего исследования – определить метод и основные параметры контроля, который бы мог с большой достоверностью выявлять данные дефекты, а также разработать методику, опираясь на которую дефектоскописты смогли бы оперативно проводить контроль. В работе участвовал студенческий научный коллектив кафедры «Методы и приборы неразрушающего контроля» ПГУПС.



Рис. 1. Внешний вид трещины гребня бандажа

Поскольку методику необходимо создать для контроля бандажей локомотивных колес при текущем обслуживании локомотивов или их ремонте, она должна быть встроена в технологический процесс депо, на котором будет проводиться контроль. Соответственно к ней выдвигается ряд требований:

- контроль под локомотивом (отсутствие доступа ко всей поверхности колеса);
- использование уже существующего оборудования;
- малозатратность по времени (7–10 мин на колесо);
- надежное выявление трещин глубиной 1 мм и более.

Опираясь на данные требования, следует выбрать подходящий метод контроля. Рекомендуется проводить контроль тремя методами: ультразвуковой, магнитопорошковый и оптический. Также в локомотивном хозяйстве применяется капиллярный метод контроля.

Выбор метода контроля

Использование капиллярного метода контроля осложнено тем, что для выявления поверхностных дефектов нужно объект контроля покрыть специальным веществом – пенетрантом [6]. Исходя из первого требования к методике, данный метод не подойдет, так как полностью покрыть поверхность гребня колеса пенетрантом невозможно при отсутствии доступа ко всей поверхности колеса.

Магнитопорошковый метод требует как полного доступа к поверхности объекта контроля, так и полного его намагничивания [7]. Его нельзя применить, ссылаясь на первое требование к методике, так как для полного намагничивания необходима выкатка колесной пары из-под локомотива, что недопустимо.

Ультразвуковой метод контроля, в свою очередь, удовлетворяет всем требованиям к методике. В его основе лежит использование колебаний звуковой волны как источника информации о наличии дефекта [8]. Для проведения контроля таким методом следует

провести предварительную настройку оборудования по эталонам – установить необходимую чувствительность и другие параметры контроля. Для удовлетворения всех требований к методике контроля было принято решение применить преобразователь релеевских (поверхностных) волн на частоту 1,25 МГц.

Измерения

Для подбора чувствительности и оценки контролепригодности [9] бандажей локомотивных колес важно снять их характеристики шумовых сигналов. Измерения проводились в локомотивных депо «Санкт-Петербург–Пасажирский–Московский», «Санкт-Петербург–Витебский–Сортировочный», Вологда и Агрыз (Татарстан).

Параметры сигналов от реальных трещин измерялись в локомотивном депо Агрыз. В гребне цельнокатаного колеса, находящегося в лаборатории кафедры «Методы и приборы неразрушающего контроля», была выполнена модель трещины – пропилен глубиной 1 мм.

После снятия и обработки измерений анализируются характеристики шумовых сигналов бездефектных колес, которые представлены в виде нижней группы кривых на рис. 2, сигналов от реальных и искусственных дефектов в гребнях – в виде верхней группы.

Методика

В работе [10] охарактеризована методика по проведению ультразвукового контроля гребней бандажей локомотивных колес. В ней подробно описано, как настраивать прибор перед проведением контроля. Схему настройки браковочного уровня ультразвукового контроля (УЗК) на стандартных образцах СО-2 и СО-3Р иллюстрирует рис. 3, *а–в*.

Для контроля гребней бандажей необходимо использовать схему установки датчика в соответствии с рис. 4.

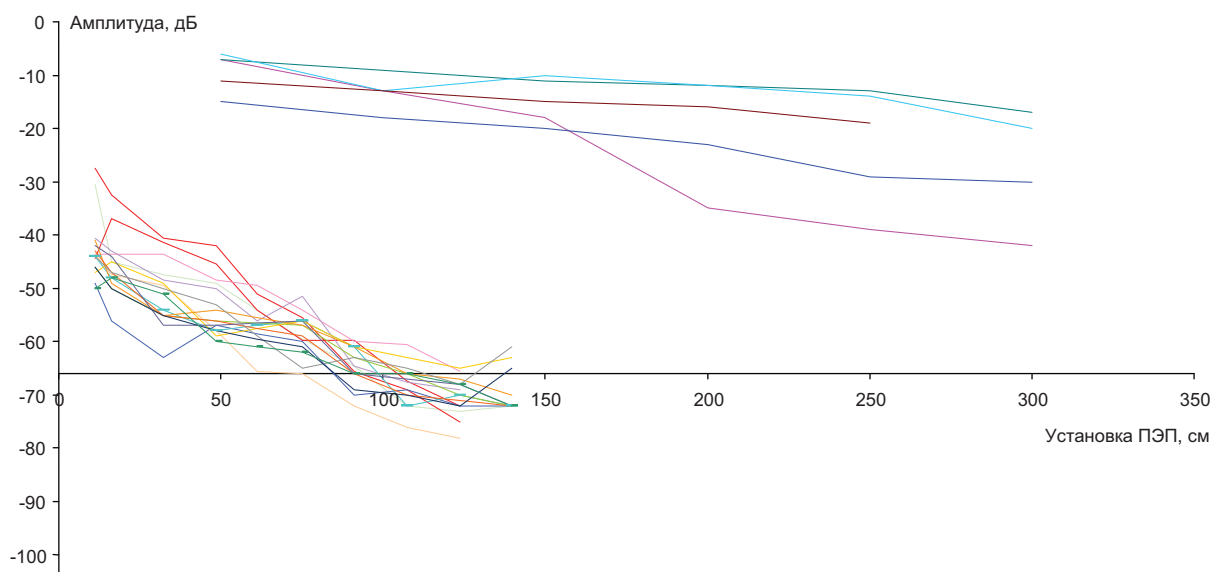
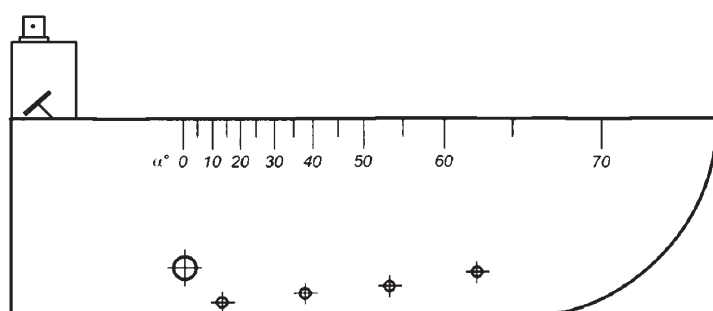
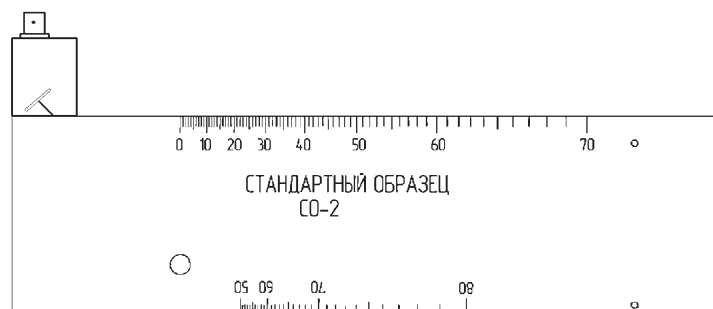


Рис. 2. Зависимость амплитуды сигнала от реальных трещин в гребнях бандажей (верхняя группа кривых) и амплитуды шума в бездефектных гребнях (нижняя группа) при удалении от места установки преобразователя (ПЭП) по окружности колеса

а



б



в

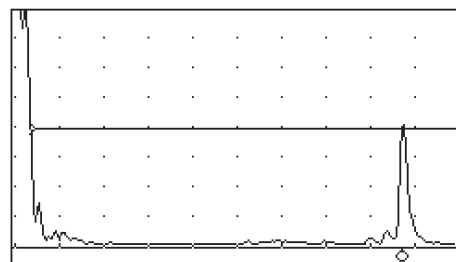


Рис. 3. Настройка браковочного уровня УЗК вершины гребня бандажей локомотивных колес на стандартных образцах СО-3 Р (а), СО-2 (б) и на экране дефектоскопа (в)

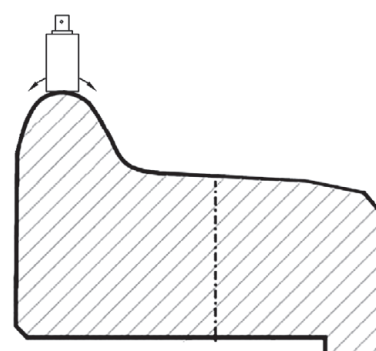


Рис. 4. Установка датчика на контролируемый бандаж

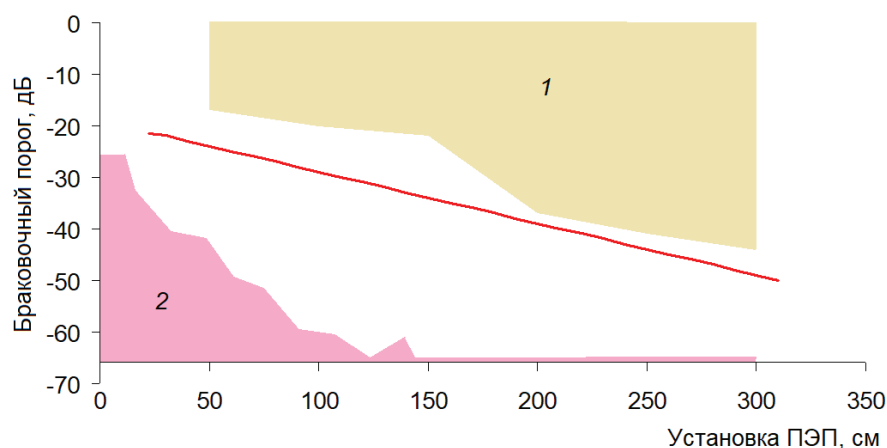


Рис. 5. Браковочный порог, настраиваемый по ТИ 07.185–2018:

1 – область сигналов от трещин; 2 – область шумов в бездефектных бандажах при удалении от места установки ПЭП по окружности колеса

На рис. 5 показан браковочный порог, уровень которого установлен согласно результатам проведенных исследований.

Заключение

Описанная методика была испытана как на модели дефекта в виде пропила на гребне цельнокатаного колеса, так и на гребнях локомотивных колес, бездефектных и с реальными трещинами. Для испытаний использовались колесные пары локомотивов ЧМЭЗ, ВЛ10, 2 ТЭ10, ТЭП70, ЭП2 К. В настоящее время проводится внедрение методики в технологический процесс локомотивных депо российских железных дорог.

Библиографический список

1. Нотик З. Х. Тепловозы ЧМЭЗ, ЧМЭЗТ, ЧМЭЗЭ. – 2-е изд., перераб. и доп. / З. Х. Нотик. – М. : Транспорт, 1996. – 444 с.
2. Луговцов М. Н. Сортировочные станции / М. Н. Луговцов. – Гомель : БелГУТ, 2009. – 248 с.
3. Крылов В. И. Тормоза подвижного состава. – 2-е изд. / В. И. Крылов, Е. В. Клыков, В. Ф. Ясенцев. – М. : Транспорт, 1980. – 76 с.
4. Расшупкин В. П. Дефекты металла / В. П. Расшупкин, М. С. Корытов. – Омск : Изд-во СибАДИ, 2006. – 37 с.

5. Ключев В. В. Неразрушающий контроль : в 8 т. Т. 1. Визуальный и измерительный контроль / В. В. Ключев. – М. : Машиностроение, 2008. – 560 с.

6. Прохоренко П. П. Физические основы и средства капиллярной дефектоскопии / П. П. Прохоренко, Н. П. Мигун. – Минск : ИПФ, 1998. – 37 с.

7. Шелихов Г. С. Магнитопорошковая дефектоскопия деталей и узлов / Г. С. Шелихов. – М. : Эксперт, 1995. – 251 с.

8. Кретов Е. Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении / Е. Ф. Кретов. – СПб. : СВЕН, 2014. – 392 с.

9. Ключев В. В. Неразрушающий контроль : в 8 т. Т. 3. Ультразвуковой контроль / В. В. Ключев. – М. : Машиностроение, 2008. – 864 с.

10. ТИ 07.185–2018. Технологическая инструкция по ультразвуковому контролю вершины гребня бандажей колесных пар локомотивов при выполнении сервисного обслуживания / сост.: А. В. Шевелев, А. В. Курков. – СПб. : НИИ мостов, 2018. – 23 с.

References

1. Notik Z. Kh. *Teplovozy ChMEZ, ChMEZT, ChMEZE* [Diesel locomotives ChMEZ, ChMEZT, ChMEZE]. 2nd ed., rev. and enlarged. Moscow, Transport Publ., 1996, 444 p. (In Russian)
2. Lugovtsov M. N. *Sortirovochniye stantsii* [Marshalling yards]. Gomel, BelGUT (Belarusian State University of Transport) Publ., 2009, 248 p. (In Russian)

3. Krylov V. I., Klykov E. V. & Yasentsev V. F. *Tor-moza podvizhnogo sostava* [Rolling stock brake]. 2nd ed. Moscow, Transport Publ., 1980, 76 p. (In Russian)
4. Rasshchupkin V. P. & Korytov M. S. *Defekty metalla* [Metal defects]. Omsk, SibADI Publ., 2006, 37 p. (In Russian)
5. Klyuyev V. V. *Nerazrushayushchiy control* [Non-destructive control]. In 8 vol. Vol. 1. *Vizualniy i izmeritelniy control* [Visual test and control by measurement]. Moscow, Mashinostroyeniye [Mechanical engineering] Publ., 2008, 560 p. (In Russian)
6. Prokhorenko P. P. & Migun N. P. *Fizicheskiye osnovy i sredstva kapillyarnoy defektoskopii* [Physics and means of liquid penetrant inspection]. Minsk, IPF (Institute of Applied Physics) Publ., 1998, 37 p. (In Russian)
7. Shelikhov G. S. *Magnitoporoshkovaya defektoskopiya detaley i uzlov* [Magnetic particle testing of parts and assemblies]. Moscow, Ekspert Publ., 1995, 251 p. (In Russian)
8. Kretov E. F. *Ultrazvukovaya defektoskopiya v energomashinostroyenii* [Ultrasonic testing in power-plant engineering]. Saint Petersburg, SVEN Publ., 2014, 392 p. (In Russian)
9. Klyuyev V. V. *Nerazrushayushchiy control* [Non-destructive control]. In 8 vol. Vol. 3. *Ultrazvukovoy control* [Ultrasonic inspection]. Moscow, Mashinostroyeniye [Mechanical engineering] Publ., 2008, 864 p. (In Russian)
10. Shevelev A. V. & Kurkov A. V. *TI 07.185–2018. Tekhnologicheskaya instruktsiya po ultrazvukovomu kontrolyu vershiny grebnya bandazhey kolesnykh par lokomotivov pry vypolnenii servisnogo obsluzhivaniya* [TI 07.185–2018. Process message on ultrasonic control of a wheel flange top for locomotive set of wheels while performing service maintenance]. Saint Petersburg, NII Mostov (Research and Development Department of Bridges) Publ., 2018, 23 p. (In Russian)

КУРКОВ Александр Валентинович – канд. техн. наук, доцент, a.v.kurkov-spb@mail.ru; *СМИРНОВ Иван Александрович – студент, ivan.18smirnoff@gmail.com; ШУБИН Александр Дмитриевич – студент, shubin.sasha.28.01.98@gmail.com; ПУШКИН Сергей Сергеевич – студент, Pushkin.sergey97@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 625.7

П. А. Пегин, Г. В. Иголкин

**ОБОСНОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬСТВА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЛИНИИ
МЕЖДУ АЭРОПОРТОМ И ЦЕНТРОМ ГОРОДА**

Дата поступления: 06.07.2018

Решение о публикации: 17.10.2018

Аннотация

Цель: Определить критерии эффективной перевозки пассажиров из аэропортов в центр города на основе международного опыта и статистики, спрогнозировать развитие и применение инновационных подходов в сфере транспорта для решения данной задачи. **Методы:** Использованы методы количественного и сегментационного анализов пассажиропотока. **Результаты:** Разработан метод оценки пропускной способности пассажиропотока от аэропорта к центру города. **Практическая значимость:** Полученные результаты позволяют установить тренды развития и практическую эффективность в области строительства линий железнодорожного транспорта, легкорельсового трамвая, метро и магнитолевитационных аэроэкспрессов от центра до аэропортов в крупных городах и упрощают принятие инвестиционных решений. Предложенный метод оценки открывает широкие перспективы для проведения дальнейших исследований в области интеграции линий инновационного транспорта в городскую транспортную сеть.

Ключевые слова: Пассажиропоток, сегментация пассажиропотока, аэропорт, аэроэкспресс, метро, маглев.

Pavel A. Pegin, D. Eng. Sci., associate professor; **Georgiy V. Igolkin**, postgraduate student, igolkin.georgii@gmail.com (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) JUSTIFICATION OF AIRPORT – CITY CENTRE HIGH-SPEED RAILWAY CONSTRUCTION

Summary

Objective: To determine the criteria of efficient passenger carriage from airports to the city center on the basis of the international experience and statistics. To prognosticate the development and application of innovative approaches in the sphere of transport for the solution of the task in question. **Methods:** The methods of qualitative and segmentation analyses of passenger traffic flow were applied. **Results:** Evaluation procedure of passenger traffic flow capacity from an airport to the city center was developed. **Practical importance:** The obtained results make it possible to establish development trends and practical efficiency in construction of lines for railways, light trams, subways and maglev trains from the city center to airports in big cities as well as to take investment decisions. The introduced evaluation procedure opens up new vistas for further research conduct in the sphere of innovative transport railways integration in urban transport network.

Keywords: Passenger traffic flow, segmentation of passenger traffic flow, airport, airport rail link train, subway, maglev train.

Введение

Городская среда – это комплекс жилых, торговых, офисных центров и массивов. В этом

многообразии можно выделить характерные точки притяжения – места, которые по тем или иным причинам аккумулируют большое количество людей. К точкам притяжения це-

ленаправленно движутся транспортные потоки. К таким точкам в городах относятся аэропорты, главной отличительной особенностью которых является расположение за пределами города.

Анализ мирового опыта решения проблем увеличивающегося пассажиропотока

В большинстве крупных городов среднее расстояние от аэропорта до центра составляет от 14 до 30 км. При подобном удалении точки притяжения подавляющая доля транспортного потока, движущегося по трассам, проходящим вблизи от аэропорта, составлена из пассажиров самолетов и провожающих. Мировая практика показывает, что при достижении высокого уровня пассажиропотока в транспортном узле – традиционного решения по доставке людей, представленного автомобильным транспортом: автобусы, маршрутные такси, такси, каршеринг и личный транспорт – не достаточно. На трассах в направлении аэропор-

тов в таких случаях наблюдаются серьезные пробки.

Поэтому решение данной проблемы требует строительства дополнительных стационарных линий транспорта, способных перераспределить и аккумулировать значительную долю пассажиропотока в направлении аэропорта. Решениями подобных линий являются скоростные поезда, аэроэкспрессы/электрички, магнитолевитационные шаттлы, линии метро, трамвайные линии.

В табл. 1 приведены данные применения различных видов стационарных линий, дополняющих автомобильный транспорт в ведущих городах России и мира [1–3].

Использование стационарных линий в аэропорт является отличительной особенностью крупных городов и общепринятой мировой практикой. Строительство стационарной линии в аэропорт приводит к существенной трансформации структуры пассажиропотока, в которой подавляющая часть отходит на аэроэкспресс, благодаря чему удается значительно улучшить транспортную ситуацию на автомобильных дорогах. Примером такого пере-

ТАБЛИЦА 1. Анализ применения дополнительных стационарных трасс в городах мира

Город	Аэропорт	Пассажиропоток, чел. в год	Расстояние от центра города, км	Типы стационарных линий	Время в пути, мин
Москва	Шереметьево	39 641 443	31	Аэроэкспресс	36
	Домодедово	30 657 854	41		35
	Внуково	18 138 865	40		33
Санкт-Петербург	Пулково	16 125 520	17	—	—
Токио	Ханэда	85 408 975	15	Монореельс Hamamatsucho	18
Лондон	Хитроу	78 000 000	22	Heathrow Express	25
				Метро	45
Барселона	Эль-Прат	44 100 000	14	Поезд RENFE	25
Шанхай	Пудун	35 000 000	30	Маглев Transrapid	15

распределения служит сегментация пассажиропотока в аэропорт Домодедово (рис. 1) [4].



Рис. 1. Распределение пассажиропотока в аэропорт Домодедово по различным типам транспорта

При этом на долю сегментации в пользу аэроэкспресса значительно влияют скорость и частота отправления. Так, поезд в аэропорт Осло аккумулировал 40 % всего пассажиропотока, благодаря скорости поезда 160 км/ч и интервалу движения в 15 мин [5].

Основополагающими критериями рентабельности строительства стационарных линий являются:

- достаточный уровень пассажиропотока свыше 20 млн пассажиров в год (без учета трансфертных пассажиров);
- соотношение цены/качество предоставляемой услуги;
- удаленность аэропорта – более 14 км от центра города;
- конкурентоспособность по сравнению с другими альтернативами.

В Санкт-Петербурге нет стационарной линии, вследствие чего пассажирам приходится пользоваться услугами автобусного маршрута для пересадки от станции метро, поэтому в рамках настоящего исследования необходимо ответить на вопрос – является ли данное положение закономерностью из-за меньшего параметра пассажиропотока или это существенный и до сих пор не устранимый недостаток городской среды.

Аэропорт Пулково отличает низкая доля транзитного пассажиропотока – всего 3 % [6], при этом в Домодедово доля транзитных пассажиров составляет 27 % [7]. Это означает, что при значительно более высоких показателях общего пассажиропотока московские аэропорты генерируют сопоставимое количество пассажиров, направляющихся в город.

По прогнозам к 2020 г. пассажиропоток в Пулково возрастет до 25 млн человек в год [8]. В Санкт-Петербурге существует острая потребность в строительстве линии между аэропортом и центром города.

Вопросы строительства аэроэкспресса вызвали интерес в Санкт-Петербурге достаточно давно. В 2014 г. предлагалось построить на основе государственно-частного партнерства (ГЧП) линию легкорельсового транспорта, интегрированную в городскую сеть, но у инвесторов возникли сомнения в эффективности данного направления и сроков возврата инвестиций, вследствие чего строительство было отменено.

В 2017 г. был согласован проект строительства линии аэроэкспресса от Витебского вокзала до Пулково, реализация проекта намечена на 2021 г. Целесообразность подобного традиционного решения вызывает вопросы. К основным недостаткам аэроэкспрессов, основанных на технологии «колесо–рельс», относятся:

- высокий уровень цен перевозок;
- большая стоимость строительства;
- низкая конкурентоспособность с такси и каршерингом для семейных путешественников;
- отсутствие уникального торгового предложения и инновационности решения;
- высокий уровень шума;
- ухудшение экологии.

Анализ применения инновационных решений

Таким образом, ключевым фактором решения возрастающего пассажиропотока в аэро-

порты является его сегментация по большому количеству вариантов перемещения. При этом существующие типы стационарных линий имеют значительный потенциал для применения новых решений. Уменьшение интервалов движения и увеличение скоростей транспортного средства положительно влияют на предпочтения пассажиров в пользу более инновационного вида транспорта.

В эпоху Четвертой промышленной революции [9] у традиционных проблем современных мегаполисов возникают новые возможности решения.

В настоящее время существует ряд технических инноваций, обладающий техническими характеристиками, которые позволят качественно трансформировать сложившуюся сегментацию перевозок [10, 11]. При организации прямых маршрутов от аэропортов до центра города возможно достигнуть более высоких маршрутных скоростей. В Шанхае магнитолевитационный поезд движется в аэропорт Пудун со средней маршрутной скоростью 223 км/ч (при максимальном значении 430 км/ч).

Также магнитолевитационные поезда обеспечивают:

- более комфортное ускорение и торможение;
- более низкие показатели расхода энергии [12];
- меньшие значения индукции магнитного поля [12];

- меньшие выбросы CO_2 [13];
- снижение показателей износа инфраструктуры за счет отсутствия прямого контакта между поездом и рельсом [14];
- минимальное влияние динамических эффектов на мостовые сооружения [15, 16].

При этом практика показывает, что стоимость строительства магнитолевитационных линий ниже, чем трасс под высокоскоростное железнодорожное движение (табл. 2).

Возможности нового вида транспорта способны значительно трансформировать городскую транспортную сеть и даже открыть дорогу новому типу туризма. Воспользовавшись магнитолевитационным аэроэкспрессом, пассажир сможет за 15 мин оказаться в центре города – осмотреть достопримечательности, совершить покупки и отправиться обратно на вечерний рейс. Использование магнитолевитационного транспорта между центром города и аэропортом способно привести к появлению совершенно новой концепции туризма.

Наиболее перспективное направление оптимизации пассажиропотока лежит в выявлении потребностей конкретных аэропортов в строительстве подобных веток. Например, в Москве задолго до Шанхая – в 1993 г. – был разработан магнитолевитационный аэроэкспресс в аэропорт Внуково (рис. 2).

В России есть возможность и потенциал разработки отечественной технологии при предоставлении государством условий раз-

ТАБЛИЦА 2. Стоимость строительства высокоскоростных железных дорог

Страна	Трасса	Стоимость 1 км полотна, млн долл. США
Италия	«TVA» Неаполь–Рим	42,00
Корея	«КТХ»	40,00
Германия	«ICE» Франкфурт–Кёльн	30,00
Тайвань	«Shinkansen Taiwan»	46,00
США	California High Speed Rail	60,00
КНР	Маглев «SMT» Шанхай–Пудонг	24,00
Россия	Проект железнодорожного аэроэкспресса в Пулково	40,00

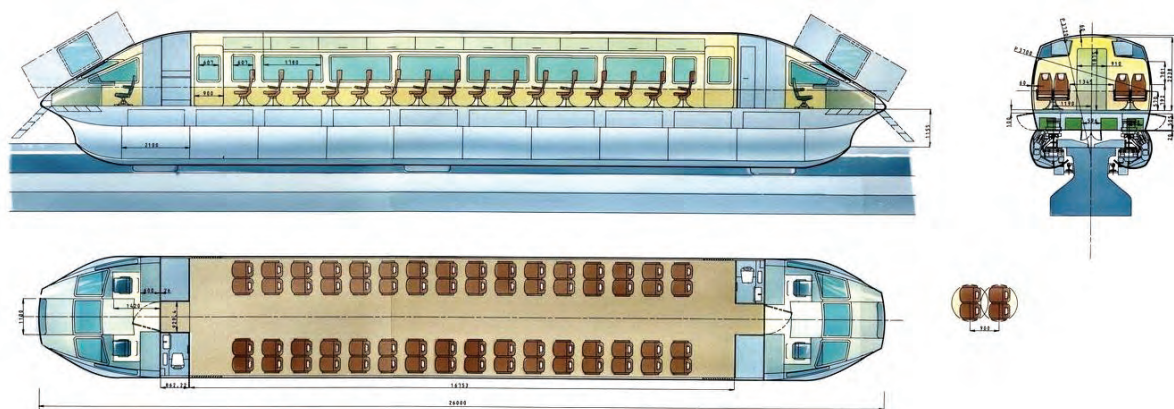


Рис. 2. Отечественный проект аэроэкспресса в аэропорт Внуково В-250 в 1991–1993 гг.

вития подобного бизнеса в виде согласований на строительство и льготной налоговой базы на начальном периоде развития и реализации проектов в форме ГЧП.

Заключение

Анализ пропускной способности пассажиропотока установил наиболее эффективный способ решения проблем доставки пассажиров из современного аэропорта крупного города (табл. 3).

Разработанный метод и выведенные закономерности применимы для определения концепции развития крупных городов. Этот ме-

тод не является универсальным, для каждого конкретного случая требуется корректировка на основании дополнительных индивидуальных данных местности – расстояние от аэропорта до центра города, взаимозависимости аэропорта с другими точками притяжения и др.

Библиографический список

1. Росавиация. Объемы перевозок через аэропорты России. – URL : <http://www.favt.ru/deyatelnost-ajeroporty-i-ajerodromy-osnovnie-proizvodstvennie-pokazateli-aeroportov-obyom-perevoz> (дата обращения : 05.07.2018).

ТАБЛИЦА 3. Виды решения проблемы перевозки пассажиров в зависимости от пассажиропотока

Пассажиропоток (без учета транзит- ных пассажиров), млн чел. в год	Решение	Типы транспорта
0–15,0	Автомобильный транспорт	Автобус, личный транспорт, каршеринг, такси
15,0–20,0	Строительство одной дополнительной стационарной ветки	Аэроэкспресс/поезд/скоростной трамвай
Свыше 20,0	Строительство нескольких стационарных веток. Снижение интервалов движения, увеличение скорости/строительство высокоскоростной линии (маршрутная скорость – свыше 200 км/ч)	Поезд + метро/высокоскоростной поезд (маглев)

2. Jingmei Gu. Time-dependent vehicle routing of free pickup and delivery service in flight ticket sales companies based on carbon emissions / Jingmei Gu, Chao Liu // *Journal of Advanced Transportation*. – 2017. – N 30. – P. 1–14.
3. Balcerzak T. Innovation of airports and aerodromes in transport policy of the European Union / T. Balcerzak, R. Fellner // *Scientific Journal of Silesian University of Technology-Series Transport*. – 2017. – N 90. – P. 7–15.
4. Число пассажиров «Аэроэкспресса» в 2016 году снизилось на 10,6%. – URL : <https://www.rbc.ru/business/15/02/2017/58a42e419a794728a42899e1> (дата обращения : 05.07.2018).
5. Интервью с главой ООО «Аэроэкспресс». – URL : <http://www.the-village.ru/village/city/transport/124813-aeroekspress-intervyu> (дата обращения : 05.07.2018).
6. Аэропорт Пулково запускает систему привлечения трансфертных пассажиров. – URL : https://www.dp.ru/a/2017/09/29/Pulkovo_zapuskayet_siste (дата обращения : 05.07.2018).
7. Исследование мирового опыта по предоставлению услуг трансферным пассажирам. – URL : http://studbooks.net/2388397/tehnika/issledovanie_mirovogo_opyta_predostavleniyu_uslug_transfernym_passazhiram (дата обращения : 05.07.2018).
8. Воздушные ворота Пулково взлетают все выше. – URL : <https://www.kommersant.ru/doc/3540005> (дата обращения : 05.07.2018).
9. Шваб К. Четвертая промышленная революция / К. Шваб ; пер. с англ. АНО ДПО «Корпоративный университет Сбербанка». – М. : Эксмо, 2016. – 230 с.
10. Антонов Ю. Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / Ю. Ф. Антонов, А. А. Зайцев. – СПб. : Физматлит, 2014. – 476 с.
11. Иголкин Г. В. Формирование понятия инновационных систем высокоскоростного наземного транспорта в модели современной экономики / Г. В. Иголкин, П. А. Пегин // *Вестн. гражданских инженеров*. – 2018. – Вып. 4. – С. 181–188.
12. Han W. T. A novel hybrid suspension electromagnet for middle-low speed maglev train / W. T. Han, J. J. Sun, X. K. Liu, H. X. Guo, J. S. Wang // *Journal of Magnetism*. – 2017. – Vol. 22. – P. 463–471.
13. Maglev. Social and environmental benefits. – URL : <https://maglevinnovation.weebly.com/social-and-environmental-benefits.html> (дата обращения : 05.07.2018).
14. Иголкин Г. В. Оптимизация параметров пролетного строения под магнитолевитационный транспорт, предназначенный для контейнерных перевозок / Г. В. Иголкин, И. О. Потапова // *Транспорт : проблемы, идеи, перспективы : сб. трудов LXXXVI Всерос. науч.-технич. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. – СПб. : ПГУПС, 2016. – С. 155–162.
15. Иголкин Г. В. Особенности динамического взаимодействия магнитолевитационного высокоскоростного транспорта и мостовых сооружений / Г. В. Иголкин, Л. К. Дьяченко, В. Н. Смирнов, П. А. Пегин // *Бюл. результатов науч. исследований*. – 2018. – Вып. 1. – С. 111–118.
16. Shi Jin. Dynamic response analysis of single-span guideway caused by high speed maglev train / Jin Shi, Ying-Jie Wang // *Latin American Journal of Solids and Structures*. – 2011. – N 8. – P. 213–228.

References

1. Rosaviatsiya. Obyemy perevozok cherez aeroporty Rossii [Federal Air Transport Agency. Airport traffic in Russia]. – URL : <http://www.favt.ru/deyatelnost-ajeroporty-i-ajerodromy-osnovnie-proizvodstvennie-pokazateli-aeroportov-obyom-perevoz/> (accessed: 05.07.2018). (In Russian)
2. Jingmei Gu & Chao Liu. Time-dependent vehicle routing of free pickup and delivery service in flight ticket sales companies based on carbon emissions. *Journal of Advanced Transportation*, 2017, no. 30, pp. 1–14.
3. Balcerzak T. & Fellner R. Innovation of airports and aerodromes in transport policy of the European Union. *Scientific Journal of Silesian University of Technology-Series Transport*, 2017, no. 90, pp. 7–15.
4. Chislo passazhirov "Aeroekspressa" v 2016 godu snizilos na 10,6% [The number of "Aeroexpress" passengers decreases by 10,6% in 2016]. – URL : <https://www.rbc.ru/business/15/02/2017/58a42e419a794728a42899e1> (accessed: 05.07.2018). (In Russian)

5. *Intervju s glavoy OOO "Aeroekspress"* [Interview with CEO of OOO "Aeroexpress"]. – URL: <http://www.the-village.ru/village/city/transport/124813-aeroekspress-intervyu> (accessed: 05.07.2018). (In Russian)
6. *Aeroport Pulkovo zapuskaet sistemy privlecheiya transfernykh passazhirov* [Pulkovo Airport launches the system of attracting transfer passengers]. – URL: https://www.dp.ru/a/2017/09/29/Pulkovo_zapuskaet_siste (accessed: 05.07.2018). (In Russian)
7. *Issledovaniye mirovogo opyta po predostavleniyu uslug transfernym passazhiram* [The study of international experience in providing transfer passengers with services]. – URL: http://studbooks.net/2388397/tehnika/issledovanie_mirovogo_opyta_predostavleniyu_uslug_transfernym_passazhiram (accessed: 05.07.2018). (In Russian)
8. *Vozdushniye vorota Pulkovo vzletatyet vsye vyshе* [Air gate: Pulkovo flies up and up]. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3540005> (accessed: 05.07.2018). (In Russian)
9. Schvab K. *Chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya* [The forth industrial revolution]. Tr. from Eng. ANO DPO "Korporativniy universitet Sberbanka" (ANO CPE "Sberbank Corporate University"). Moscow, Eksmo Publ., 2016, 230 p. (In Russian)
10. Antonov Y. F. & Zaitsev A. A. *Magnitolevitatsionnaya transportnaya tekhnologiya* [Maglev transport technology]. Saint Petersburg, Physmatlit Publ., 2014, 476 p. (In Russian)
11. Igolkin G. V. & Pegin P. A. Formirovaniye ponyatiya innovatsionnykh system vysokoskorostnogo nazemnogo transporta v modeli sovremennoy ekonomiki [Innovative systems of high-speed surface transport in modern economy model: concept generation]. *Vestnik grazhdanskykh inzhenerov* [Bulletin of civil architects], 2018, issue 4, pp. 181–188. (In Russian)
12. Han W. T., Sun J. J., Liu X. K., Guo H. X. & Wang J. S. A novel hybrid suspension electromagnet for middle-low speed maglev train. *Journal of Magnetism*, 2017, vol. 22, pp. 463–471.
13. *Maglev. Social and environmental benefits*. – URL: <https://maglevinnovation.weebly.com/social-and-environmental-benefits.html> (accessed: 05.07.2018).
14. Igolkin G. V. & Potapova I. O. Optimizatsiya parametrov proleznogo stroeniya pod magnitolevitatsionniy transport, prednaznachenniy dlya konteynernykh perevozok [Parameter optimization of bridge superstructures for maglev transport, designed for container service]. *Transport: problemy, ideyi, perspektivy* [Transport: problems, ideas, prospects]. Sbornik trudov LXXVI Vserossiyskoy Nauchno-tehnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh [Coll. papers of LXXVI All-Russian Research and technical conference of students, postgraduate students and young scholars]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2016, pp. 155–162. (In Russian)
15. Igolkin G. V., Dyachenko L. K., Smirnov V. N. & Pegin P. A. Osobennosti dinamicheskogo vzaimodeystviya magnitolevitatsionnogo vysokoskorostnogo transporta i mostovykh sooruzheniy [Dynamic interaction features of high-speed maglev transport and bridgework]. *Byulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of Scientific Research Results], 2018, issue 1, pp. 111–118. (In Russian)
16. Shi Jin & Ying-Jie Wang. Dynamic response analysis of single-span guideway caused by high speed maglev train. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2011, no. 8, pp. 213–228.

ПЕГИН Павел Анатольевич – д-р техн. наук, доцент; *ИГОЛКИН Георгий Владимирович – аспирант, igolkin.georgii@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).



УДК 625.721

Ию. Аль-Дамлахи

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НА ОСНОВЕ ГИС И САПР ДЛЯ ТРАССИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ В РАЙОНАХ ТВЕРДОГО ГРУНТА

Дата поступления: 02.10.2018

Решение о публикации: 17.10.2018

Аннотация

Цель: Разработать методику трассирования автомобильной дороги между двумя точками (началом и концом) дороги на основе технологии геоинформационных систем (ГИС) и систем автоматизированного проектирования (САПР) для нахождения наилучшей трассы дороги по основному критерию минимального объема земляных работ в районах скального или твердого грунта, где стоимость строительства автомобильной дороги зависит в основном от объемов земляных работ. Рассматривается, как можно достичь эту цель с помощью платформ ГИС, обладающих возможностями нахождения трассы дороги между двумя точками с критерием минимальных уклонов поверхности земли, что в итоге позволяет проектировать трассу дороги с минимальными объемами земляных работ с учетом этой полученной трассы на основе ГИС и в то же время кратчайшую длину трассы. **Методы:** Использован экспериментальный метод. Определены основные важные критерии, по которым проектируется и трассируется автомобильная дорога: длина трассы дороги, прохождение трассы дороги с критических точек, уровень безопасности движения и т. д. Обсуждается, как можно учесть эти критерии в программах ГИС при нахождении наилучшей трассы дороги. **Результаты:** Была проектирована предлагаемая автомобильная дорога на юге Сирии, где почва местности является базальтом. Сначала использована платформа ArcGIS для установления наилучшей трассы по данным критериям, затем с помощью программы Civil 3D построена такая трасса для того, чтобы она соответствовала критериям трассирования дорог в СНиП. Были проектированы поперечные профили, продольный профиль и вычислены объемы выемки и насыпи для принятого варианта трассы дороги на основе ГИС и Civil 3D. **Практическая значимость:** С помощью предлагаемой методики был сокращен объем выемки грунта до значительной степени. Для сопоставления с другими вариантами трасс дороги проектирован второй вариант трассы дороги, более короткий, вычислены объемы земляных работ для него и проведено сравнение с первым вариантом трассы. Даже в этом случае получены хорошие результаты, что доказывает эффективность этой методики.

Ключевые слова: ГИС, САПР, программа ArcGIS, Civil 3D, уклоны поверхности земли, объемы земляных работ, рациональная трасса дороги.

Yo. Al-Damlakhy, postgraduate student, youssef.d-86@mail.ru (Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO)) DEVELOPMENT OF GIS AND CAD-BASED METHOD FOR ROAD TRACING IN STIFF SOIL AREAS

Summary

Objective: To develop the procedure of road tracing between two points (beginning and end) of the road based on geographic information systems technology (GIS) and Computer Aided Design (CAD) in order to find optimal road trace according to principal criterion of minimum volume of ground works in areas with stiff and rocky soil. In this case the construction cost of a road depends generally on the volume of ground works (excavation and filling). To consider the issue of achieving the set goal by means of GIS platforms, having the possibility to find road route between the two points with criterion of minimum ground slope. The latter makes it possible to design road trace with minimum volume of ground works taking into the account the obtained GIS-based road trace and at the same time the shortest trace length. **Methods:** Experimental method was used. Surely, the main criteria according to which road routing is fulfilled are the following: trace length, passing of the trace from critical points, traffic safety level, etc. The ways to take the criteria in question into the account in GIS programs in the process of finding the best trace were examined. **Results:** The suggested road trace was designed in the south of Syria, where the soil consists of basalt. At first ArcGIS platform is used in order to find out whether the road in question best meets the given criteria, then by means of Civil 3D the road is designed to satisfy the SNiP criteria (Construction Rules and Regulations) road routing criteria. Cross sections, longitudinal profile were designed and the volumes of excavation and filling were calculated for the adopted road route based on GIS and Civil 3D. **Practical importance:** The volume of ground levelling was considerably reduced with the help of the suggested procedure. The second variant of the road – a shorter one, was designed in order to compare it with other alternatives of road alignment. The volume of ground levelling was calculated and compared with the first variant of trace was conducted. Nevertheless, positive results were obtained even in this case which proves the efficiency of the suggested procedure.

Keywords: GIS, CAD, ArcGIS, Civil 3D, ground slopes, earthwork, rational road alignment.

Геоинформационные системы (ГИС) широко распространены не только в области городского и гражданского планирования, но и в других областях, даже тех, которые не связаны с инженерной сферой. Одними из наиболее важных видов являются планирование дорог, транспорта и управление движением. После появления и распространения интеллектуальных систем дорог в развитых странах началось внедрение ГИС. В дорожном хозяйстве они используются для решения широкого круга инженерных и управленческих задач [1, 2].

В последние 10 лет после разработки новых технологий в области проектирования и трассирования дорог появились развивающиеся и способные программные обеспечения для решения наиболее распространенных задач, связанных с проектированием и трассированием автомобильных дорог, в первую очередь программа Civil 3D, которая для этого обладает неограниченными возможностями. На самом деле один из важных и критических

этапов проектирования автомобильной дороги является проложение трассы дороги, т. е. выбор оптимальной трассы, удовлетворяющий всем критериям и в то же время имеющий наименьшие затраты на построение дороги. При этом критерии трассирования дороги, варианты проложения трассы дороги варьируются в зависимости от многих факторов, таких как назначение автомобильной дороги, категория дороги, тип почвы территории, критические точки, от которых дорога должна проходить, и т. д. Раньше на стадии трассирования и выбора трассы автомобильной дороги с помощью традиционных методов рассматривалось различное количество вариантов и подвариантов направления трассы и осуществлялось их сопоставление по весьма ограниченному числу показателей (длина трассы, число углов поворота, минимальные радиусы кривых в плане, количество малых водопропускных сооружений, условия пересечения крупных водотоков, ориентировочные объемы земляных работ и т. д.). При этом сравнение

вариантов вынужденно производят или при практическом отсутствии или остром недостатке таких видов информации как почвенно-грунтовые, инженерно-геологические, гидро-геологические условия проектирования, экономические условия и другие виды важнейшей информации; составляют календарный график и сметы на производство проектно-изыскательских работ и заключают договора с заказчиком и субподрядными проектными организациями на выполнение отдельных разделов и подразделов проекта [3]. Поэтому во многих случаях при получении и принятии окончательной трассы, удовлетворяющей поставленным критериям, можно было найти другой вариант, отвечающий всем критериям, но с меньшими затратами на строительство.

Указанный вопрос имеет большое значение, когда речь идет о строительстве автомобильной дороги в районах скального грунта, где объемы земляных работ в основном определяют ее стоимость. Отсюда важно спроектировать трассу дороги, удовлетворяющей критериям и дающей минимальные объемы земляных работ. По этой причине необходимы внедрение ГИС наряду с программами проектирования автомобильной дороги, с одной стороны, чтобы преодолеть их недостатки, и с другой – для автоматизирования процесса выбора наилучшей трассы, чтобы избежать ошибок, допускаемых при традиционных и ручных методах проложения трассы автомобильной дороги [4]. В данной статье в качестве примера был выбран участок местности, расположенный на юге Сирии, где грунт представлен базальтовой почвой. Была спроектирована автомагистральная дорога первой категории между двумя предполагаемыми точками, используя программные обеспечения ArcGIS и Civil 3D.

Рассмотрим подробно методику нахождения наилучшей трассы в районах скального грунта на основе ГИС с учетом основных критериев трассирования дороги и с наименьшими затратами или стоимостью строительства дороги (Min C).

К этим критериям относятся:

- 1) длина трассы (L);
- 2) уклоны поверхности земли (I);
- 3) объемы земляных работ (V);
- 4) прохождение трассы дороги с критических точек (K);
- 5) уровень безопасности движения (S).

Длина трассы (L)

Длина трассы является важным фактором, определяющим стоимость строительства дороги, поэтому, по возможности выполняя различные рекомендации по трассированию, следует стремиться к сокращению длины дороги, т. е. к приближению ее к воздушной линии – прямой, соединяющей заданные пункты. Но выбор направления трассы между заданными пунктами определяется категорией дороги, особенностью рельефа местности, гидрологическими и топографическими условиями [5]. Однако, во-первых, эти факторы ограничивают возможность трассирования дороги с прямой трассой и, во-вторых, нужно соблюдать требования геометрического трассирования: длины прямых в плане следует ограничивать в соответствии с категорией дороги и особенностями местности. Например, в пересеченной местности допустимое значение длины прямых составляет 2000–3000 м для автомобильных дорог первой категории (см. табл. 5.20 [6]). Поэтому нельзя проложить трассу по прямой длиннее, чем 3 км, для данной категории описываемого примера.

В дополнение к этому иногда при проложении прямой трассы могут возникнуть некоторые препятствия или обнаруживаемые участки местности с высокими отметками, которые приводят к увеличению объемов выемки, т. е. их часто нужно избегать и изменять направление трассы.

Уклоны поверхности земли (I)

Уклоны поверхности земли участка дороги влияют на многие факторы при трас-

сировании автомобильной дороги, в первую очередь на объемы земляных работ, которые, следовательно, будут наименьшими при минимальных уклонах. Вместе с тем проектирование продольного профиля дороги с малыми продольными уклонами увеличивает уровень безопасности движения и снижает количество аварийных ситуаций на дороге. С помощью программ ГИС можно найти трассу дороги между заданными точками с минимальными уклонами поверхности. Для данного примера, благодаря программному обеспечению ArcGIS, была спроектирована трасса между пунктами начала и конца предполагаемой дороги с минимальными уклонами поверхности земли. После этого была проанализирована полученная трасса по программе ArcGIS, чтобы обнаружить недостатки и улучшить ее.

После внедрения технологии ГИС в проектирование дорог недостатки и ошибки при выборе наилучшей трассы стали редкими, особенно при участии экспертов, специализированных в области ГИС и геодезии, наряду с проектировщиками автомобильных дорог. Но поскольку программные обеспечения ГИС работают с помощью алгоритма [7–9] и выдают наилучшую трассу между пунктами начала и конца дороги, иногда выявляются некоторые недостатки в полученной трассе, которые надо внимательно рассматривать, исправлять или избегать. Поэтому в многих случаях даже с использованием ГИС для определения наилучшей трассы по минимальным уклонам поверхности земли геодезисты и картографы вынуждены проверить, проанализировать и исправить трассу из программ ГИС, для того чтобы выявить самый ближайший к оптимальному вариант трассы дороги. Далее будут выделены основные недостатки и известные случаи при получении наилучшей трассы из ГИС по минимальным объемам земляных работ для их избегания и исправления.

Первый случай, с которым можно столкнуться, – появление небольших препятствий (маленькие участки с незначительными значениями высоты или с крутыми уклонами по-

верхности земли в ЦМР), которые не влияют сильно на объемы земляных работ, потому что программа, работающая по алгоритму, будет избегать эти участки. Таким образом, во многих случаях получаются трассы, содержащие резкие изменения в плане, требуется вмешательство проектировщиков, которые должны обнаружить такие участки, проанализировать цифровую модель рельефа и вручную отредактировать трассу в том случае, если эти небольшие участки с резкими уклонами не оказывают сильного влияния на объем земляных работ, при этом требуются редактирование и модификация построенной трассы в программах ГИС.

В настоящей работе с помощью программы ArcGIS и ее инструментов была найдена наилучшая трасса между пунктами начала и конца предполагаемой дороги (рис. 1).

На рис. 2 показана часть такой трассы, выделенная красной линией часть местности; она представляет участок, соответствующий вышеуказанному недостатку.

Очевидно, что трасса обходит часть местности, окруженной синей линией (рис. 2), потому что она содержит крутые уклоны. Но на самом деле после анализа этого участка местности установлено, что он включает средние уклоны (не очень крутые и не малые), а также небольшую площадь, так что объем выемки не будет огромным. Однако, если сравнить объем земляных работ со стоимостью строительства дороги в результате обхода рассматриваемой местности, то экономически стоимость обхода будет выше, чем прохождение через данный участок местности. Поэтому будет выгодно пройти через такую небольшую часть. В результате была изменена и исправлена трасса и было решено, что она будет проходить через выделенную часть местности (рис. 3).

Следует отметить, что наличие таких участков в результате попыток обойти их приводит к возникновению резких поворотов на трассе дороги, что ведет к необходимости вводить кривые с небольшими или маленькими радиусами, которые не удовлетворяют критериям геометрического трассирования в СНиП. Например, наименьший радиус кривой в плане

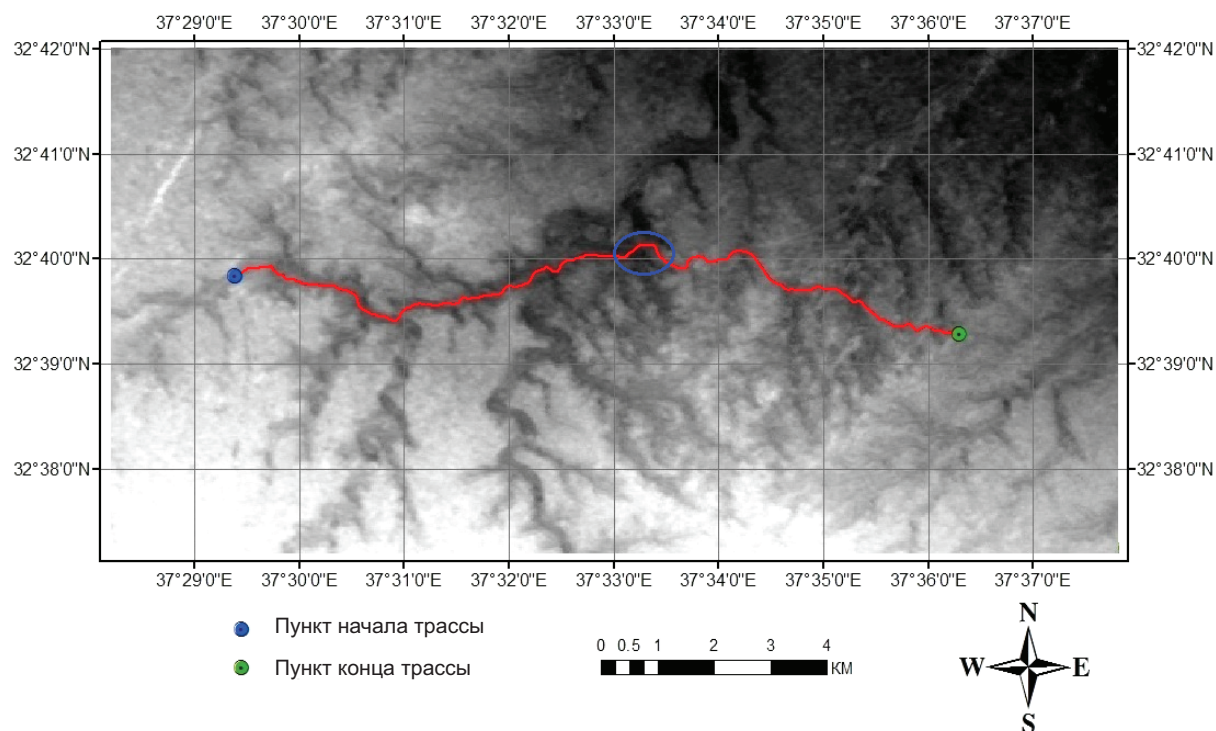


Рис. 1. Наилучшая трасса по минимальным уклонам поверхности земли, полученная с помощью ArcGIS

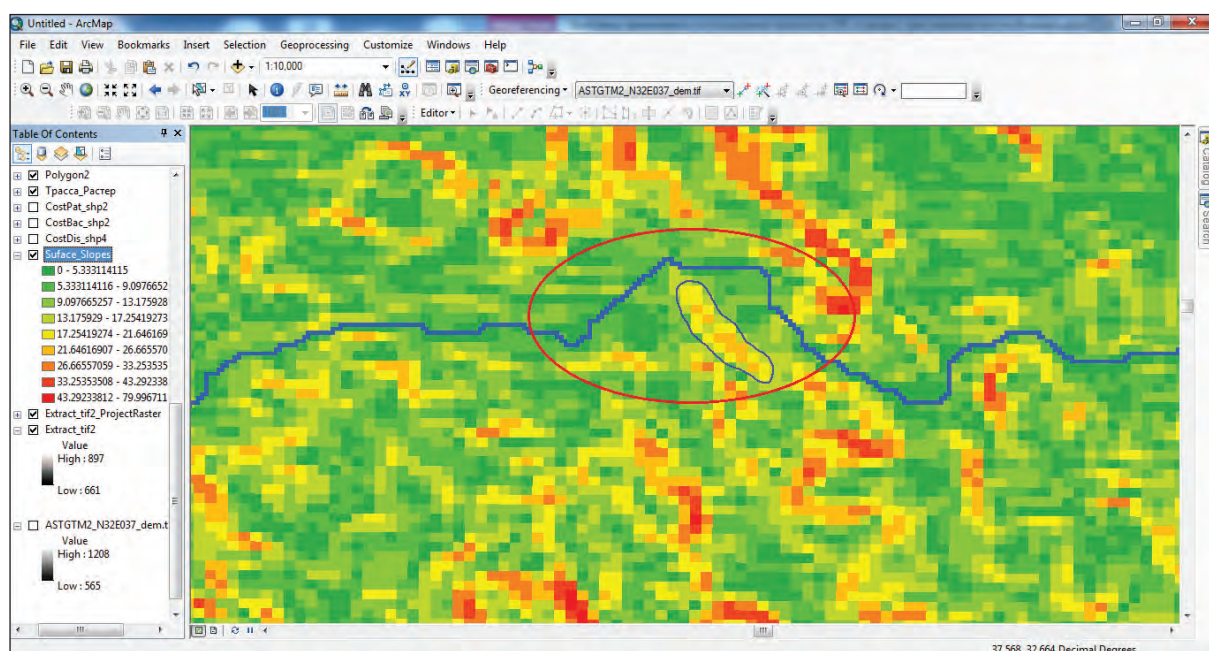


Рис. 2. Часть трассы, полученная в программе ArcGIS

для первой категории дороги 1А (скорость 150 км/ч) равен 1200 м в случае использования переходных кривых в плане [6]. Поэтому после получения трассы в программах ГИС

надо внимательно рассматривать и анализировать ее, и если обнаружено, что на ней есть такие участки, то нужно их анализировать и сравнивать экономическую стоимость зем-

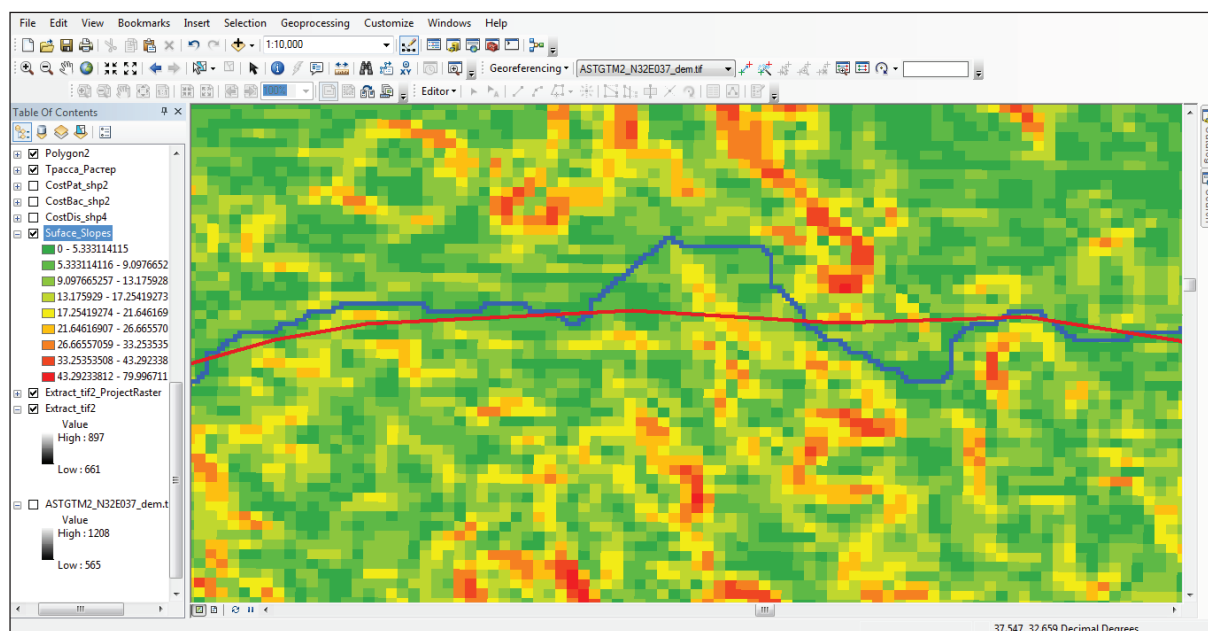


Рис. 3. Представление оптимальной трассы

ляных работ и строительства дороги в случае как прохождения трассы дороги через такие участки, так и их обхода и принимать наиболее экономичное решение.

Вместе с тем, с одной стороны, в многих случаях получение трассы дорог в программах ГИС с минимальными уклонами поверхности земли не соответствует критериям ландшафтного трассирования. С другой стороны, когда эти трассы интерполируются в программах ГИС (либо в программах САПР, таких как Civil 3D), следует использовать малые радиусы кривых, вводить на них виражи и переходные кривые. А это в большинстве случаев не позволяет учитывать критерии ландшафтного трассирования, что можно считать самой главной трудностью при нахождении наилучшей трассы по минимальным уклонам поверхности земли в программах ГИС.

Объемы земляных работ (V)

Стоит заметить, что на первой стадии выполнения проекта строительства автомобильной дороги сначала проводятся земляные работы, включающие устройство выемок и насыпей, т. е. то, что называется работами

нивелирования местности автомобильной дороги. Их стоимость составляет большую часть от общей стоимости проекта, особенно, если речь идет о местности, где есть твердые грунты, например скалистые или каменистые, и где стоимость выемки земли значительно выше в сравнении с глинистыми грунтами. Поэтому на стадии трассирования автомобильной дороги в плане и в продольном профиле необходимо обратить внимание на то, как спроектировать наилучшую трассу, которая, с одной стороны, будет соответствовать критериям геометрического трассирования в СНиП [6], а с другой, учитывать цифровую модель местности, располагаясь таким образом, чтобы объемы земляных работ были минимальны. Также стоит добавить, что один из показателей удачного трассирования – это получение трассы, в которой объемы выемки и насыпи примерно равны [4].

Прохождение трассы дороги с критических точек (K)

При трассировании автомобильной дороги вначале выбирают контрольные точки, через которые должна пройти или которые должны

обойти трассу. Контрольными точками трассы могут быть места пересечения больших и средних рек, переходы болот в узких местах, населенных пунктов, ценных земель, неустойчивых грунтов и др. Например, пересечения автомобильных и железных дорог, как правило, осуществляются прямыми и на прямых участках, и острый угол пересекающихся дорог должен быть не менее 45° . Пересечения и примыкания автомобильных дорог в одном уровне, а также пересечения ими водотоков рекомендуется выполнять под углом, близким к прямому. Потому этот критерий – один из важных, определяющих направление трассы дорог при прокладывании. В программе ArcGIS можно выделить критические точки, с которых трасса должна пройти, и также можно задать точки или участки местности, которые нужно обойти при проведении наилучшей трассы при заданных условиях (минимальные уклоны поверхности земли). Для исключения каких-то участков местности из процесса трассирования следует удалить эти площади из слоя раstra в программе ArcGIS, которая предоставляет уклоны поверхности земли, так что значения пикселей будут «нет данных» (Pixel value = NoData). В таком случае алгоритм нахождения трассы по минимальным уклонам в программе ArcGIS поможет обойти данный участок (рис. 4).

Уровень безопасности движения (*S*)

На безопасность дорожного движения оказывает влияние множество факторов как объективных (конструктивные параметры и состояние дороги, интенсивность движения транспортных средств и пешеходов, обустройство дорог сооружениями и средствами регулирования, время года, суток), так и субъективных (состояние водителей и пешеходов, нарушение ими установленных правил) [10].

Таким образом, на дорогах существует сложная динамическая система, включающая в себя совокупность элементов «человек», «автомобиль», «дорога», функционирующих в определенной «среде». Эти элементы единой дорожно-транспортной системы связаны друг с другом и образуют определенную целостность.

Основными мероприятиями для обеспечения безопасности движения на кривых в плане, не считая обустройства дороги, являются:

- 1) устройство виражей на кривых с радиусами менее 3000 м на дорогах первой категории и с радиусами менее 2000 м на дорогах других категорий;
- 2) уширение проезжей части на кривых в плане при радиусах 1000 м и менее;

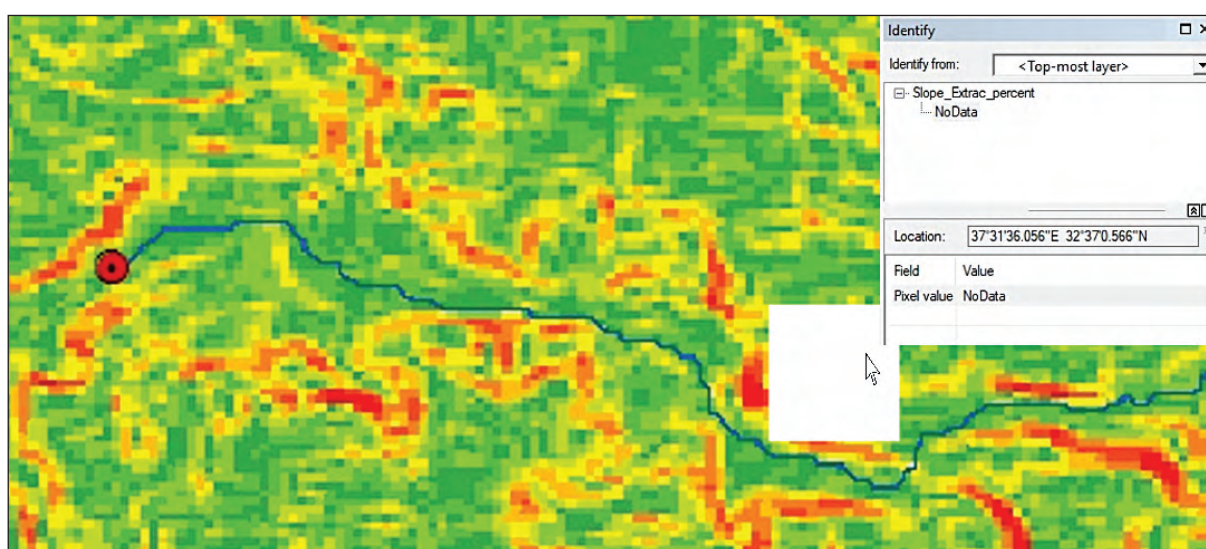


Рис. 4. Часть трассы дороги при избегании участка местности (белый прямоугольник)

3) устройство переходных (клотоидных) кривых при радиусах в плане 2000 м и менее.

При проектировании клотоидной трассы обязательно соблюдение требования согласования дороги с ландшафтом [11–16]. Задачей ландшафтного проектирования является обеспечение плавного включения дороги в ландшафт местности, в результате чего улучшаются удобство и безопасность движения, лучше раскрывается перед едущими красота природы. Пространственная плавная дорога, вписанная в ландшафт, обеспечивает постоянный или плавно переменный режим движения, способствует работоспособности водителей и создает хорошее настроение у проезжающих. По нормам СНиП [6] вертикальные кривые должны устраиваться в местах перелома проектной линии продольного профиля при алгебраической разности уклонов 5 % и более на дорогах первой, второй категорий, 10 % и более – третьей категории, 20 % и более – четвертой-пятой категорий.

При этих критериях можно определить следующую функцию, связывающую стоимость строительства дороги в таких местностях:

$$C = F(L, I, V, K, S),$$

где L – длина варианта трассы автомобильной дороги; I – уклоны поверхности земли участка

трассы дороги; V – объем земляных работ для варианта трассы дороги; K – прохождение варианта трассы от критических точек; S – уровень безопасности движения для варианта трассы дороги.

После получения наилучшей трассы дороги по минимальным уклонам поверхности земли по минимальным объемам земляных работ сначала была проверена трасса и уточнена для исправления недостатков, далее интерполирована эта трасса. На рис. 4 красная линия представляет собой трассу, получаемую при интерполяции рациональной трассы по минимальным уклонам поверхности земли в программе ArcGIS, синяя – проектируемую трассу при учете интерполируемой. После этого была спроектирована трасса дороги в программе Civil 3D с учетом получаемой трассы из ГИС и критериев трассирования в СНиП. Все элементы принятой трассы дороги (прямые линии и кривые) в плане показаны на рис. 5.

Также был спроектирован продольный профиль дороги в соответствии с критериями трассирования продольного профиля для первой категории дороги с насыпью и выемкой (рис. 6, а, б).

Для сравнения полученной трассы дороги с другим вариантом дороги, который может оказаться короче, чем принятое решение, был выбран второй вариант трассы дороги с учетом критериев трассирования (рис. 7), но без

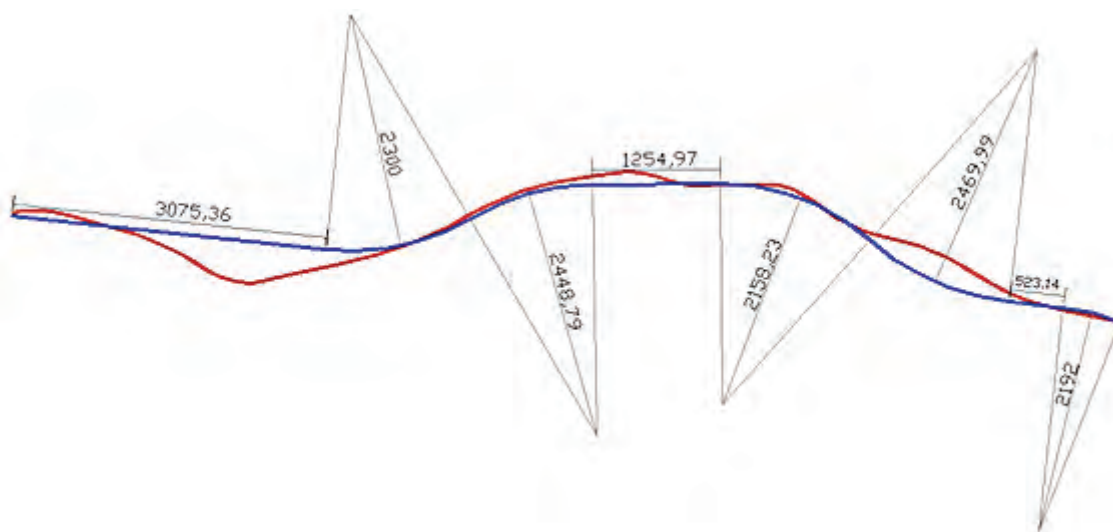


Рис. 5. Интерполируемая и проектируемая трассы дороги

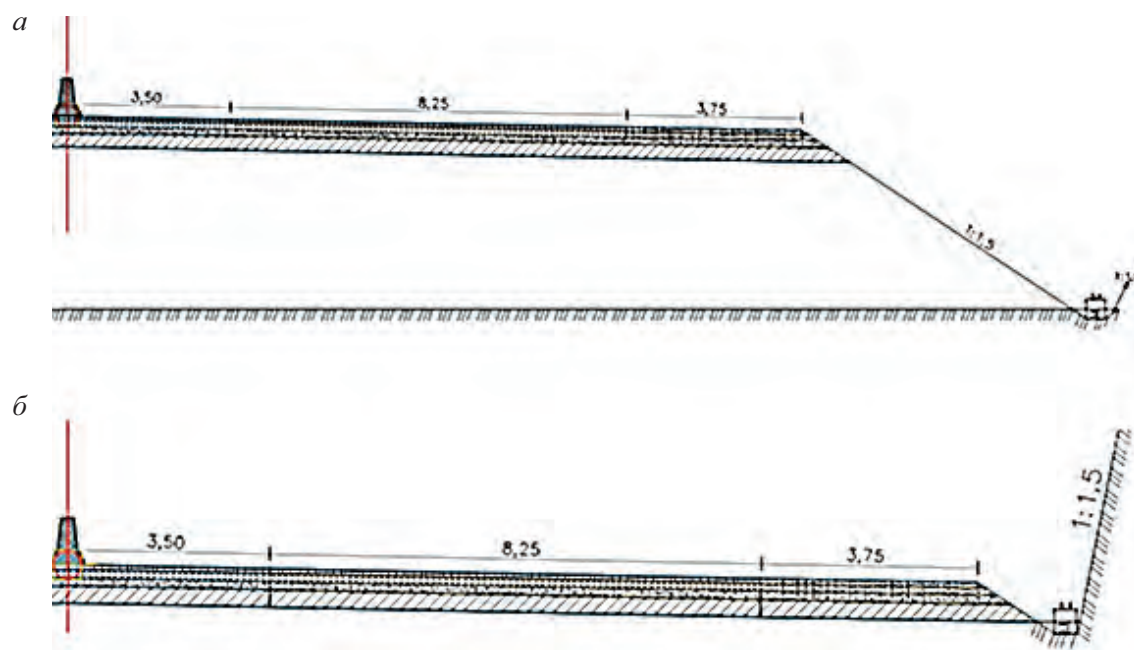


Рис. 6. Поперечный профиль с насыпью (а) и выемкой (б)

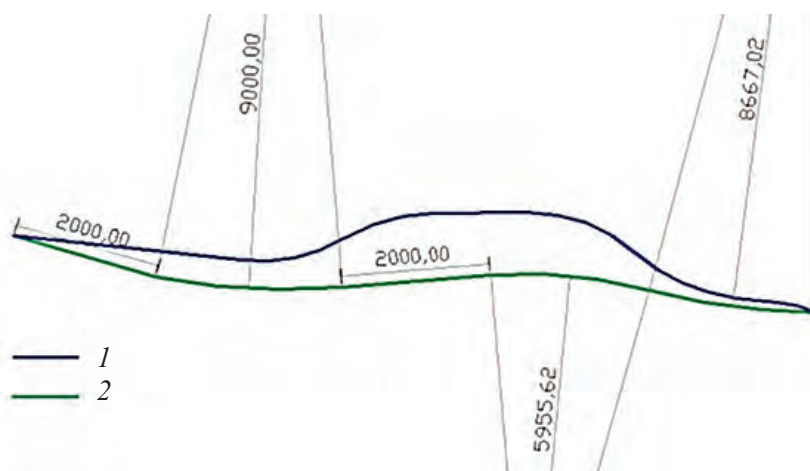


Рис. 7. Сравнение варианта трассы дороги на основе ГИС (1) со вторым вариантом (трасса 2) и его элементы в плане (2), проектируемая в программе Civil 3D без учета ГИС

учета технологии ГИС для выбора трассы дороги по минимальным уклонам поверхности земли.

После этого было вычислены объемы земляных работ для каждого варианта трассы (рис. 8).

Имя	2D площадь...	Выемка(скор...	Насыпь(скор...	Чистый(скорректированный)(Куб. м)	График разности объем...
☒ Объем_Трасса_1	470475.13	1284766.83	756927.84	527838.99<Выемка>	
☒ Объем_Трасса_2	470932.77	3524491.90	606410.74	2918081.16<Выемка>	

Рис. 8. Объем земляных работ (выемки и насыпи) для обоих вариантов трассы дороги

Сравним эти варианты трассы дороги:

Вариант трассы:	Длина трассы, м	Объем выемки, м ³	Объем насыпи, м ³
первый (с ГИС)	11 246,3	1 249 185,71	754 167,93
второй (без ГИС)	10 949,9	3 532 952,57	617 477,95
Разница	296,4	–2 283 766,86	+ 136 689,98

Из приведенных данных следует, с одной стороны, что уменьшились объемы выемки у трассы, получаемой на основе ГИС, на 2 283 767 м³ (35,4% от общих объемов). С другой стороны, понизились объемы насыпи только на 136 690 м³. А это составляет малую долю. Хотя второй вариант длиннее, чем первый, на 296,4 м, но сокращение объемов выемки велико, поэтому стоимость строительства удлинения трассы, получаемой на основе ГИС, меньше, и, очевидно, что вариант с ГИС сокращает огромную стоимость.

Из всего вышесказанного можно заметить, что применение технологии ГИС для нахождения трассы автомобильной дороги по минимальным объемам земляных работ, особенно объемам выемки, имеет большое значение по сравнению с выбором трассы дороги без использования ГИС.

Заключение

Можно суммировать, что, с одной стороны, важнейшим условием проектирования трассы дороги при ее трассировании является либо владение проектировщиком знаниями в областях геодезии и картографии, либо предоставление возможности участвовать в процессе трассирования картографам или геодезистам, которые смогут проанализировать и оценить ЦМР, а также предоставить наилучшие варианты трассирования, соответствующие всем требованиям проектирования автомагистралей в СНиП, но с минимальными финансовыми затратами строительства дороги. С другой стороны, метод трассирования автомагистралей с помощью технологий ГИС можно применять в холмистых, горных местностях или в райо-

нах скальных грунтов, где важно учитывать объемы земляных работ. Поскольку этот метод ограничивает гибкость выбора желательных радиусов кривых трассы дороги в плане, он не всегда будет эффективным в районах глинистых грунтов, где стоимость выемки играет второстепенное значение от общей стоимости строительства дороги. Однако его можно применять и анализировать результаты, для того чтобы искать и получать наилучшую трассу.

Необходимо отметить, что процесс нахождения оптимальной трассы по определенным критериям сложный и трудоемкий, поэтому на стадии проектирования дороги с целью анализа ЦМР и дальнейшего автоматического нахождения оптимальной трассы следует использовать технологию ГИС. В противном случае игнорирование данного требования ведет к увеличению материальных затрат при строительстве автодороги.

Библиографический список

1. Скворцов А. В. Геоинформационные системы в дорожной отрасли / А. В. Скворцов, П. И. Поспелов, С. П. Крысин. – М. : МАДИ, 2005. – 375 с.
2. Скворцов А. В. Геоинформатика в дорожной отрасли : учеб. пособие для вузов по специальности «Автомобильные дороги и аэродромы» / А. В. Скворцов, П. И. Поспелов, А. А. Котов. – М. : МАДИ, 2005. – 249 с.
3. Arc Map. Оптимальный путь. – URL : <https://studopedia.info/2-109739.html> (дата обращения : 01.10.2018).
4. Аль-Дамлахи И. Необходимость внедрения геоинформационных систем в процесс трассирова-

ния автомобильных дорог / И. Аль-Дамлахи // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2016. – № 2 (7). – С. 70–75.

5. Сайт с учебными материалами для студентов, обучающихся по профилю «Автомобильные дороги». – URL : http://road-project.okis.ru/file/road-project/KP/3_Plan_trassy.pdf (дата обращения : 01.10.2018).

6. СНиП 2.05.02–85. Автомобильные дороги. – М. : Министерство регионального развития Российской Федерации, 2012. – 111 с.

7. Arc Map. Стоимостное направление. – URL : <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/cost-back-link.htm> (дата обращения : 01.10.2018).

8. Arc Map. Стоимостное расстояние. – URL : <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/cost-distance.htm> (дата обращения : 01.10.2018).

9. Arc Map. Оптимальный путь. – URL : <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/cost-path.htm> (дата обращения : 01.10.2018).

10. Федотов Г. А. Изыскания и проектирование автомобильных дорог. Кн. 1 / Г. А. Федотов, П. И. Пospelov. – М. : МАДИ, 2009. – 648 с.

11. Федотов Г. А. Изыскания и проектирование автомобильных дорог. Кн. 2 / Г. А. Федотов, П. И. Пospelov. – М. : МАДИ, 2010. – 519 с.

12. Earth explorer. – URL : <http://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения : 01.10.2018).

13. Chandio Imtiaz Ahmed. Computer application in routing of road using least-cost path analysis in Hillside Development / Imtiaz Ahmed Chandio, Abd Nasir B. Matori, Khamaruzaman B. WanYusof, Mir Aftab Hussain Talpur, Shabir Hussain Khahro, Munirah Radin Mohd Mokhtar // Research Journal of Environmental and Earth Sciences. – 2012. – Vol. 4 (10). – P. 907–911.

14. Gorr W. L. GIS 1 : Tutorial Basic Workbook / W. L. Gorr, K. S. Kurland. – Redlands, California : ESRI Press, 2016. – 462 p.

15. Allen D. W. GIS 3 : Advanced Workbook / D. W. Allen, J. M. Coffey. – Redlands, California : ESRI Press, 2016. – 462 p.

16. Бойков В. Н. Автоматизированное проектирование автомобильных дорог на примере Indor-

CAD/Road / В. Н. Бойков, Г. А. Федотов, В. И. Пуркин. – М. : МАДИ, 2005. – 224 с.

References

1. Skvortsov A. V., Pospelov P. I. & Krysin S. P. *Geoinformatsionnye sistemy v dorozhnoy otrasly* [Geographic information systems in road industry]. Moscow, MADI Publ., 2005, 375 p. (In Russian)

2. Skvortsov A. V., Pospelov P. I. & Kotov A. A. *Geoinformatika v dorozhnoy otrasly* [Geoinformatics in road industry]: college tutorial specialized in “Automobile roads and airdromes”. Moscow, MADI Publ., 2005, 249 p. (In Russian)

3. Arc Map. Optimal put [Optimal way]. URL: <https://studopedia.info/2-109739.html> (accessed: 01.10.2018). (In Russian)

4. Al-Damlakhy Yo. Neobkhodimost vnedreniya geoinformatsionnykh system v protsess trassirovaniya avtomobilnykh dorog [The necessity to implement geographic information systems in the process of highway setting out]. *SAPR i GIS avtomobilnykh dorog* [CAD and GIS of automobile roads], 2016, no. 2 (7). (In Russian)

5. Sait s uchebnimi materialami dlia studentov po profilii “Avtomobilnye dorogi” [Sait with educational materials for students, which learning on profile “Automobile roads”]. URL: http://road-project.okis.ru/file/road-project/KP/3_Plan_trassy.pdf (accessed: 01.10.2018). (In Russian)

6. *Avtomobilniye dorogi* [Automobile roads]. *SNiP 2.05.02–85* [SNiP Construction Rules and Regulations 2.05.02–85]. Moscow, Ministry for Regional Development of the Russian Federation Publ., 2012, 111 p. (In Russian)

7. Arc Map. Stoimostnoye napravlenie [Valuing direction]. URL: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/cost-back-link.htm> (accessed: 01.10.2018). (In Russian)

8. Arc Map. Stoimostnoye rasstoianie [Valuing distance]. URL: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/cost-distance.htm> (accessed: 01.10.2018). (In Russian)

9. Arc Map. Optimal put [Optimal way]. URL: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/cost-path.htm> (accessed: 01.10.2018). (In Russian)

10. Fedotov G. A. & Pospelov P. I. *Izyskaniya i proektirovaniye avtomobilnykh dorog* [Examination and design of roads]. Bd 1. Moscow, MADI Publ., 2009, 648 p. (In Russian)
11. Fedotov G. A. & Pospelov P. I. *Izyskaniya i proektirovaniye avtomobilnykh dorog* [Examination and design of roads]. Bd 2. Moscow, MADI Publ., 2010, 519 p. (In Russian)
12. Earth explorer. URL: <http://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed: 01.10.2018).
13. Chandio Imtiaz Ahmed, Matori Abd Nasir B., Wan Yusof Khamaruzaman B., Talpur Mir Aftab Hussain, Khahro Shabir Hussain & Mokhtar Munirah Radin Mohd. Computer application in routing of road using least-cost path analysis in hillside development. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 2012, vol. 4 (10), pp. 907–911.
14. Gorr W. L. & Kurland K. S. *GIS 1: Tutorial Basic Workbook*. Redlands, California, ESRI Press, 2016, 462 p.
15. Allen D. W. & Coffey J. M. *GIS 3: Advanced Workbook*. Redlands, California, ESRI Press, 2016, 462 p.
16. Boikov V. N., Fedotov G. A. & Purkin V. I. *Avtomatizirovannoye proektirovaniye avtomobilnykh dorog na primere IndorCAD/Road* [Automated road design by the example of IndorCAD/Road]. Moscow, MADI Publ., 2005, 224 p. (In Russian)

АЛЬ-ДАМЛИАХИ Июссеф – аспирант, youssef.d-86@mail.ru (Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (ИТМО)).

УДК 69

А. В. Кабанов, К. С. Малышев, Д. Н. Васильев**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЩЕБЕНОЧНЫХ
КАРЬЕРОВ НА ОСНОВЕ ОПТИМАЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФРОНТОВ
БАЛЛАСТИРОВОЧНЫХ РАБОТ**

Дата поступления: 17.10.2018

Решение о публикации: 22.10.2018

Аннотация

Цель: Создание теоретически обоснованной методологии расчета параметров транспортно-перегрузочного процесса и повышение эффективности работы щебеночных карьеров на основе оптимального обеспечения фронтов балластировочных работ. **Методы:** Методами математической статистики и корреляционного анализа технико-экономических и организационно-технологических показателей исследована работа щебеночных балластных карьеров и балластировочных комплексов. **Результаты:** Установлены области эффективного взаимодействия балластных карьеров и балластировочных комплексов. Оптимизированы величины продолжительности операций следования вертушек со строительными материалами между пунктами погрузки и выгрузки. Определены эффективные значения массы вертушек. В табличной и графической формах представлены результаты. **Практическая значимость:** Для практического применения в подрядных строительных организациях рекомендована область эффективных значений стоимости балластировочных материалов. Повышена рентабельность поставок из щебеночных карьеров при обеспечении фронтов балластировочных работ, разработаны методические рекомендации по балластировке путей на железнодорожных станциях и перегонах и введения нормативов для Октябрьской железной дороги.

Ключевые слова: Повышение эффективности работы щебеночных карьеров, балластировочные работы, балластировочные комплексы, балластировка путей, вертушки со строительными материалами.

***Alexander V. Kabanov**, Cand. Eng. Sci., associate professor, avkabanov07@inbox.ru; **Konstantin S. Malyshev**, postgraduate student; **Danil N. Vasiliev**, postgraduate student, vasiliev.danil@gmail.com (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) THE IMPROVEMENT OF BALLAST QUARRY OPERATIONAL EFFICIENCY ON THE BASIS OF OPTIMAL PROVISION OF BALLASTING JOB OPERATION FIELDS

Summary

Objective: To develop a theoretically justified methodology for transshipping process parameters determination as well as to improve ballast quarry operational efficiency on the basis of optimal provision of ballasting job operation fields. **Methods:** Operation of crushed quarries and ballasting facilities was studied through the methods of mathematical statistics as well as correlation analysis of technical and economic as well as organizational process parameters. **Results:** Areas of effective interaction of ballast quarries and ballasting facilities were determined. Operation lengths of shuttle-service trains running with engineering materials from loading terminal to detraining point were optimized. Effective load values of shuttle-service trains were estimated. The results are presented in table and graphic forms. **Practical importance:** Effective cost value area for ballast materials is recommended in contractors for practical application. Profitability of deliveries from crushed quarries was improved by providing

ballasting job operation fields; guidelines on bedding of lines at railway stations and station blocks were developed as well as standards for October railway were introduced.

Keywords: The improvement of ballast quarry operational efficiency, ballasting job, ballasting facilities, bedding of lines, shuttle-service trains with engineering materials.

Совершенствование и использование производительных сил путевого хозяйства во многом предопределяет результативность железнодорожного транспорта в целом [1, 2]. Одним из таких направлений является решение проблемы эффективного формирования и функционирования производительных сил, обеспечивающих балластировку пути.

Цель поставленной проблемы состоит в поиске варианта распределения по фронтам работ строительства и капитального ремонта железных дорог щебеночного балласта, при котором конечная стоимость балластировки пути оказалась бы минимальной. Разрешение

подобной проблемы по существу сводится к обоснованию оптимального по суммарному расходу денежных средств варианта формирования и использования производительных сил по обеспечению щебеночным балластом путевого хозяйства железной дороги.

В настоящее время потребность в щебне кубовидной формы из изверженных пород оценивается только для ремонта железнодорожных путей (балласт размером 25–60 мм) в 20 млн м³ в год (рис. 1), для строительства автодорог (верхнее дорожное покрытие, фракции 5–10, 10–15 и 15–20 мм) – около 10 млн м³, т. е. около 1/3 произведенного щебня. В авто-

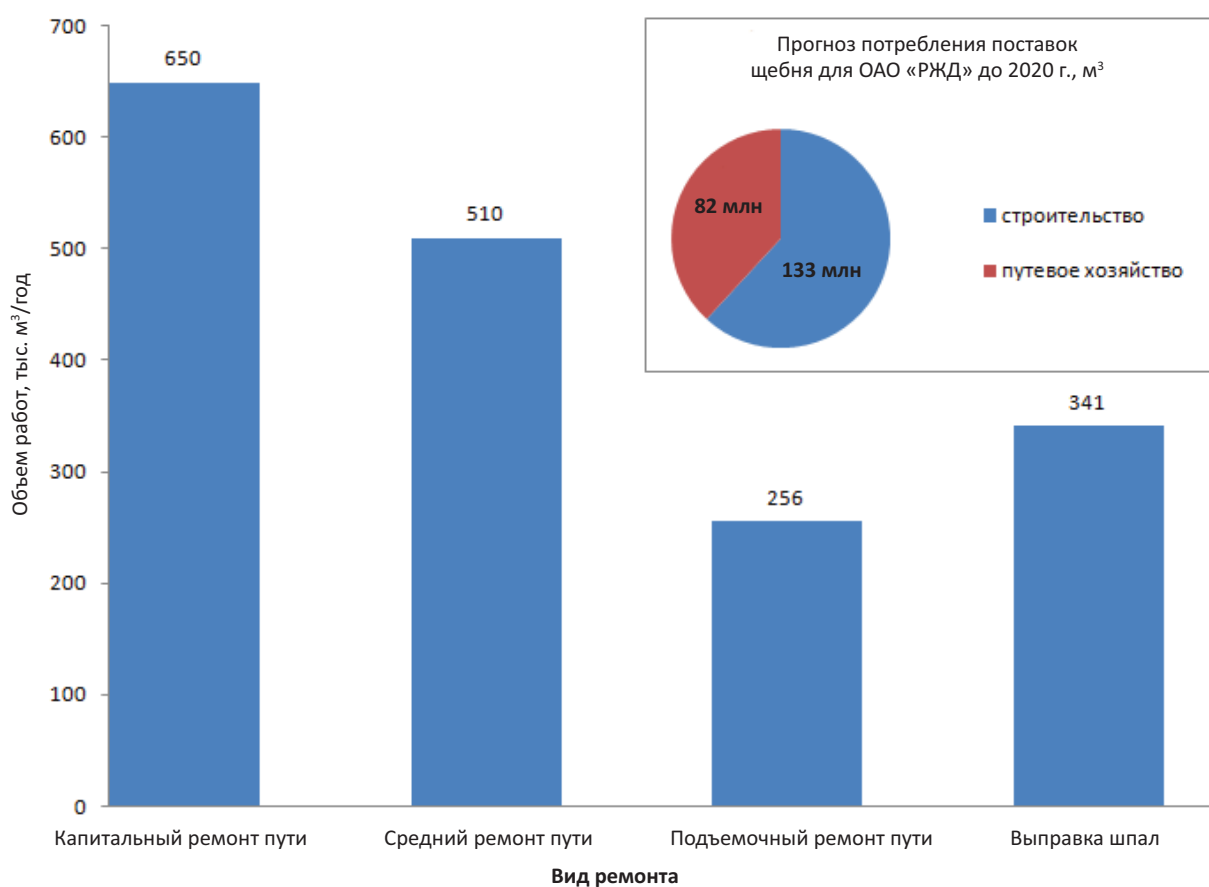


Рис. 1. Среднегодовые потребности Октябрьской железной дороги в щебеночном балласте на различные виды работ

дорожном строительстве кубовидный щебень используется для верхних слоев дорожного покрытия и качество дорог зависит прежде всего от качества щебня, поэтому к нему предъявляются высокие требования. В соответствии с президентской программой «Дороги России – XXI век» потребность в щебне узких фракций по расчетам составила 11 млн м³, а к 2020 г. достигнет 517 млн м³. При таких соотношениях расчеты показывают, что применение современных методик оптимальных маршрутов транспортировки щебеночного материала к месту укладки балласта снижают стоимость работ на 20–30%.

Для решения данной задачи необходимо знать потребность участков дороги в щебеночном балласте. Годовая потребность отдельного участка дороги в балласте обусловлена зависимостью

$$Q_j = \sum L_{sj} q_s,$$

где L_{sj} – годовой объем s -го вида путевых работ на j -м участке дороги, км/год; q_s – удельный расход балласта при s -м виде работ, м³/км.

В свою очередь, годовой объем s -го вида путевых работ обусловлен характеристикой пути на j -м участке, структурой ремонтного цикла участка и нормативной базой планирования путевых работ. Так, например, двухпутный участок (рис. 2), имеющий протяженность $L_{A-B} = 100$ км, грузонапряженность $\Gamma = 50$ млн ткм бр./(км в год) и скорость движения пассажирских поездов $v_{п} = 121$ –140 км/ч и грузовых $v > 80$ км/ч, согласно действующим «Техническим условиям на работы по ремонту и планово-предупредительной выправке пути» (ТУ, 1998), имеет первый класс, группу Б, категорию 1 и обозначается 1Б1, а поэтому должен быть бесстыковым с рельсами Р65, железобетонными шпалами и щебеночным балластом.

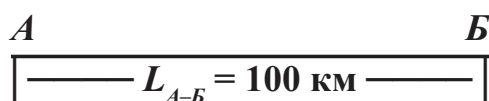


Рис. 2. К расчету годового объема балластировочных работ

Для такого пути наработка до капитального ремонта по нормам составляет $T_{ук} = 700$ млн т прошедшего груза, при структуре ремонтного цикла по ТУ: УК, В, С, В, УК.

При указанных данных межремонтный период и удельный объем усиленного капитального ремонта УК составят соответственно $t_{ук} = 700/50 = 14$ лет и $L_{ук} = 2 \cdot 100/14 = 14,3$ км/год, а объемы среднего ремонта и планово-предупредительной выправки: $L_c = 1 \cdot L_{ук} = 14,3$ км/год и $L_b = 2 \cdot L_{ук} = 28,6$ км/год. Согласно ТУ (1998 г., с. 149), при глубокой (до 40 см) очистке щебня, если грохот с размерами нижних ячеек 25×25 см, добавляется в путь нового балласта при капитальном и среднем ремонтах $q_{ук} = q_c = 440$ м³/км и при выправке $q_b = 100$ м³/км. При грохоте с размерами ячеек нижних 40×40 см и верхних 70×70 см объем добавляемого щебня возрастает до 880 м³/км. Всего для рассмотренного участка годовая потребность в щебеночном балласте определится равной $Q_{A-B} = (14,3 + 14,3) \cdot 440 + 28,6 \cdot 100 = 15\,445$ м³/год.

Объемы щебеночного материала и технологические процессы его укладки в железнодорожный путь должны быть сбалансированы с объемами добычи, переработки, транспортировки и перегрузки строительных материалов (которые также проходят сложные технологические циклы, состоящие из множества этапов) [3–7].

Исследования оптимальных параметров доставки щебня «карьер–фронт балластировочных работ» производилось:

- с учетом системы функционально-технологических связей насыщения фронтов балластировочных работ (рис. 3);
- с разработкой организационно-технологических моделей (графики технологических процессов и циклограммы балластировки пути) производства балластировочных работ.

Разработка организационно-технологической модели эффективной работы щебеночных карьеров включает:

- исследование работы балластных карьеров и комплексов;

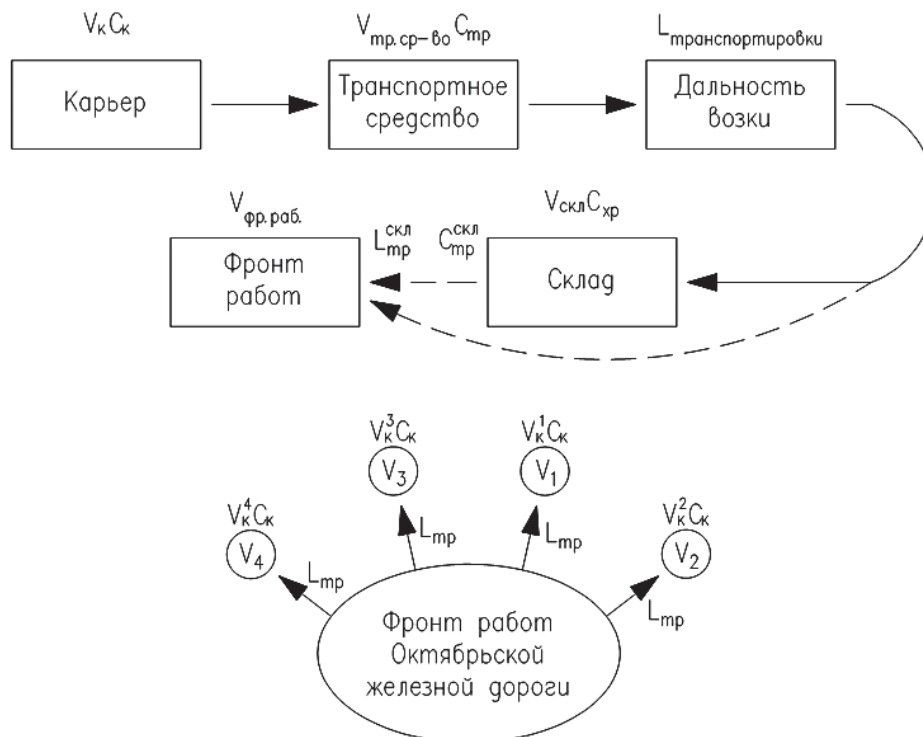


Рис. 3. Система функционально-технологических связей насыщения фронтов балластировочных работ:

V_k – объем щебеночного балласта, добываемого в карьере, m^3 ; C_k – удельная стоимость добычи балласта в карьере, руб./ m^3 ; $V_{тр.ср-во}$ – объем рабочего поезда (вертушки) по транспортировке балласта, m^3 ; $C_{тр}$ – удельная стоимость транспортировки, руб./ m^3 ; $L_{транспортировки}$ – расстояние (плечо) доставки щебеночного балласта к фронту балластировочных работ или до места временного складирования, км; $V_{скл}$ – объем временного склада, m^3 ; $C_{хр}$ – удельные затраты на складирование, руб./ m^3 ; $L_{скл.тр}$ – расстояние доставки балласта от склада до фронта работ, км; $C_{тр.скл}$ – удельная стоимость транспортировки балласта от склада до фронта работ; $V_{фр.раб}$ – потребность в щебеночном балласте на фронте балластировочных работ, m^3 ; V_1, V_2, V_3, V_4 – множество объемов фронтов балластировочных работ железной дороги; $V_{к1-4}C_k$ – стоимость доставки балласта на соответственно каждый (с 1-й по 4-й) из фронтов работ

- определение технико-экономических и организационно-технологических показателей балластных комплексов;

- установление областей эффективного взаимодействия балластных карьеров и балластировочных комплексов;

- разработку методических рекомендаций для разработки ППР по балластировке путей на железнодорожных станциях и перегонах;

- решение задачи обеспечения фронтов балластировочных работ поставками из щебеночных карьеров.

Прямые затраты на комплекс балластировочных работ (СБР) рассчитывались по формуле

$$C_{бр} = C_{сэ} + C_k + C_{тб} + C_6,$$

здесь $C_{сэ}$ – строительно-эксплуатационные расходы в карьере, отнесенные на 1000 m^3 щебня; C_k – эксплуатационные расходы на производство 1000 m^3 щебня; C_6 – затраты на механизированные или ручные балластировочные работы;

$$C_{тб} = C_{пс} + E_n K_{пс} + 1 \text{ пчд} * L / V_{ср} + 1 \text{ пчс} T_{прив},$$

где $C_{пс}$ – единовременные затраты на подвижной состав, тыс. руб.; E_n – нормативный коэффициент сравнительной экономической эффективности капитальных вложений; $K_{пс}$ – ка-

питательные вложения в подвижной состав, тыс. руб.; 1 пчд^* – расходная ставка на 1 поезд-час передвижения балластной вертушки со средней скоростью, руб.; L – суммарный пробег балластной вертушки от карьера до фронта работ, км; $V_{\text{ср}}$ – средняя скорость движения рабочего поезда, км/ч; 1 пчс – расходная ставка на 1 поезд-час на простои при погрузке, выгрузке, руб.; $T_{\text{прпв}}$ – суммарное время простоев рабочего поезда под погрузкой, выгрузкой, ч.

Эффективность рейса вертушки в расчете на единицу перевезенного груза рассчитывается в зависимости от ее массы, состава операций, расстояния перевозки, времени оборота, состояния механизации и автоматизации работ, принятых методов организации труда и других факторов [2, 8]. Воздействуя на перечисленные факторы, можно управлять эффективностью рейса, что возможно при их знании и обоснованном учете. Изучение графиков исполненного движения вертушек свидетельствует о том, что продолжительности операций для разных рейсов носят вероятностный характер. Отсюда транспортно-перегрузочный процесс со строительными материалами должен рассматриваться как стохастический, требующий привлечения методов статистических исследований.

Для систематизации статистического материала целесообразно график движения вертушки, соответствующий одному рейсу или обороту, расчленив на ряд элементов по числу транспортных и перегрузочных операций: ожидание погрузки – $t_{\text{оп}}$, погрузка – $t_{\text{п}}$, ожидание отправки с грузом – $t_{\text{по}}$, нахождение в пути следования с грузом – $t_{\text{ср}}$, ожидание выгрузки – $t_{\text{ов}}$, выгрузка – $t_{\text{в}}$, ожидание отправки после выгрузки – $t_{\text{во}}$, нахождение в пути следования порожняком – $t_{\text{сп}}$. Каждый элемент графика имеет определенную специфику и от рейса к рейсу приобретает разные значения, отображаемые, как будет показано далее, гистограммой либо кривой распределения или корреляционной зависимостью от определяющих факторов. Процесс исследований следует начинать с систематизации и обработки статистических данных [9, 10]. Для надежного

и достоверного описания значений элементов графика прежде всего обосновывается размер выборки статистических данных по следующему условию:

$$n \geq \delta^2 / 4\varepsilon^2,$$

где δ – число, принимаемое по намечаемой достоверности результата $P = f(\delta)$:

$P = f(\delta)$	0,8	0,85	0,9	0,95	0,99,
δ	1,29	1,44	1,65	1,96	2,58;

ε – требуемая точность исследований.

При часто принимаемых $P = f(\delta) = 0,95$ и $\varepsilon = 0,05$ необходимо принимать размер выборки $n \geq 385$.

Проанализированы исполнительные графики оборота «вертушек» и определены:

1) математическое ожидание (теоретическое среднее значение) продолжительности операций

$$M(t_{\text{оп}}) = \sum t_{\text{оп}i} P(t_{\text{оп}i}),$$

2) среднее квадратическое отклонение

$$\sigma(t_{\text{оп}}) = \sqrt{D(t_{\text{оп}})},$$

3) коэффициент вариации

$$V(t_{\text{оп}}) = \sigma(t_{\text{оп}}) / M(t_{\text{оп}}),$$

которые составили соответственно $\sigma(t_{\text{оп}}) = 3,45$ и $V(t_{\text{оп}}) = 3,45 / 3,18 = 1,08$.

Для получения статистических данных используются графики исполненного движения вертушек со строительными материалами. Они сосредотачиваются в диспетчерских подразделениях и в вычислительных центрах дорог в форме документов, в которых отмечены номера рейсов (маршрутов), характер операций (ожидание, погрузка, следование, ...), их место выполнения (название станции), время начала и конца операций, количество вагонов в вертушках, масса груза, его отправители и получатели. Формирование и обработка статистических данных производится отдельно по каждой операции в виде таблицы, охватывающей

всю выборку рейсов, так, для операции «ожидание погрузки» систематизация и обработка статистических данных – выборку из более 385 наблюдений (рейсов). В ней продолжительность операции характеризуется распределением статистической и теоретической вероятностей в численном измерении (рис. 4, 5). По данным этих граф на рис. 4 представлено графическое отображение распределения вероятности продолжительности операции «ожидание погрузки» ($t_{оп}$) в виде гистограммы, ломаной линии (статистической вероятности) и кривой (теоретической вероятности). Ломаная линия, соединяющая середины верхних сторон прямоугольников гистограммы и называемая многоугольником распределения, указывает на возможность описания статистического распределения вероятности времени $t_{оп}$ экспоненциальным (показательным) законом, который на рис. 4 представлен теоретической линией регрессии.

Согласованность теоретического и статистического распределений вероятностей случайной величины оценивается критерием Пирсона $\sum \chi^2$, величина которого обусловлена отношением

$$\sum \chi_i^2 = \sum [P^1(t_{оп})_i - P(t_{оп})_i]^2 \cdot 100 / P(t_{оп})_i.$$

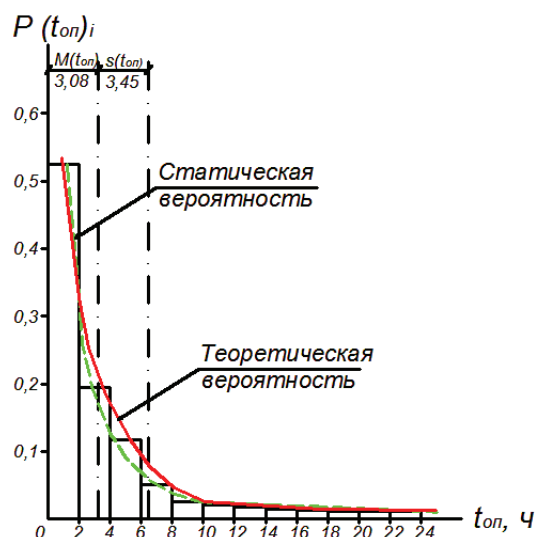


Рис. 4. Распределение вероятности продолжительности операции «ожидание погрузки» ($t_{оп}$)

Порядок расчета критерия $\sum \chi^2$ показан в следующей форме на примере шести строк данных $P = f(\delta)$ и δ (см. с. 540):

№ п/п	1	2	3	...
$P^1(t_{оп}) - P(t_{оп})$	0,07	-0,0468	-0,01	...
χ_i^2	1,02	0,878	0,977	...

№ п/п	10	11	12
$P^1(t_{оп}) - P(t_{оп})$	0,0031	0,0015	0,0018
χ_i^2	0,686	0,32	0,81

и получим $\sum \chi_i^2 = 5,2$.

При числе разрядов или строк наблюдений, равном $r = 12$, и одной переменной рассмотренное распределение вероятностей будет иметь число степеней свободы: $R = r - 1 = 11$. Тогда, согласно номинальным значениям [11] критерия Пирсона, принятому для $t_{оп}$ закону распределения, можно доверять с вероятностью 0,92, т.е. с достаточно высокой надежностью.

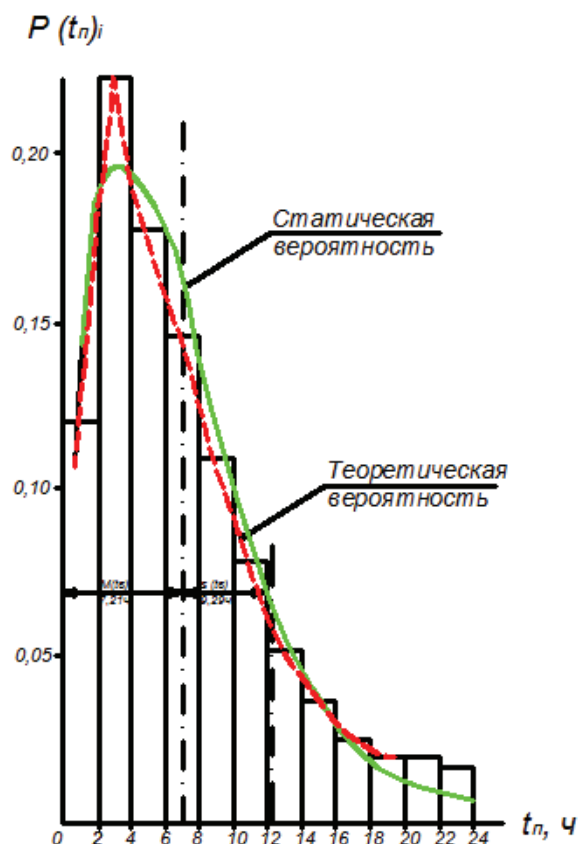


Рис. 5. Распределение вероятности продолжительности операции «погрузка» (t_n)

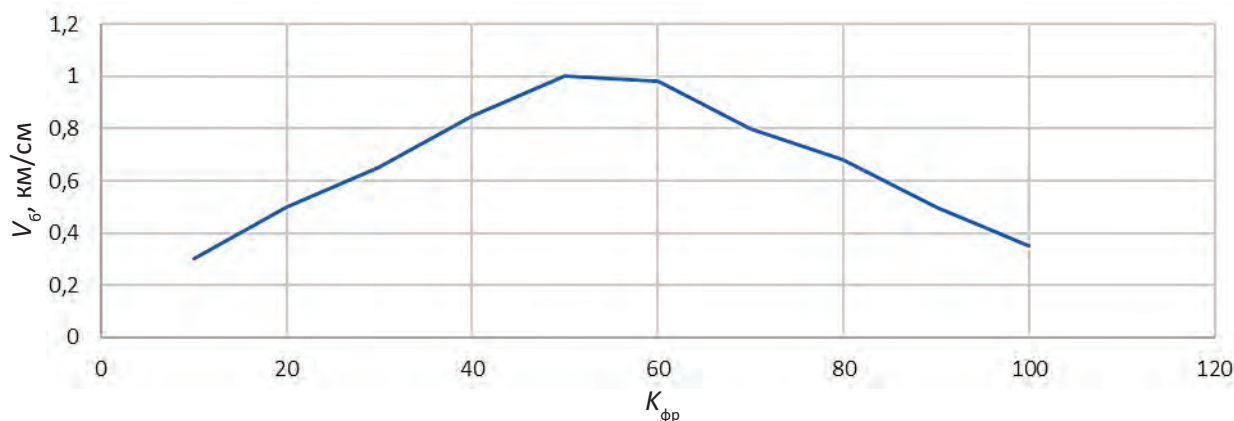


Рис. 6. Изменение темпа балластировки (V_6) от величины коэффициента готовности фронта балластировочных работ ($K_{фр}$)

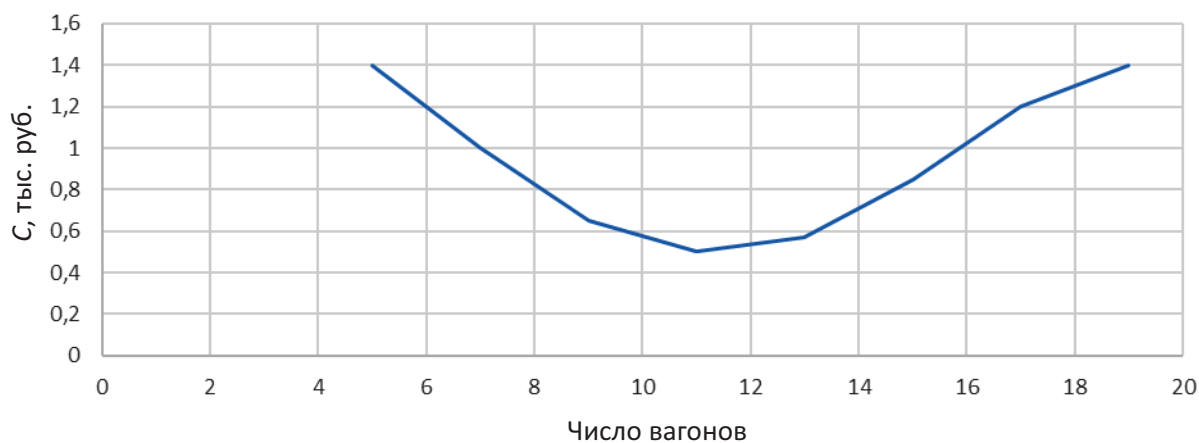


Рис. 7. Зависимость стоимости транспортировки балласта от емкости вертушки

Результаты исследований позволили обосновать зависимость продолжительности следования вертушек в порожнем состоянии от дальности рейса: $t_{сн} = 0,67 + 0,0507L_i$. Она представлена показателями регрессионных зависимостей – $\sigma(L) = 93,5$ км, $\sigma(t_{сн}) = 4,91$ ч и $r = 0,965$. Суммирование математических ожиданий продолжительностей всех операций транспортно-перегрузочного процесса позволило определить вероятную величину времени оборота вертушки. При средневзвешенной дальности следования 195 км наиболее вероятный график оборота вертушки имеет вид, показанный на рис. 6, 7, и, как свидетельствуют результаты расчетов, на долю худших реализаций приходится примерно 10% всех рейсов. Они возникают из-за недостатков в организации транспортно-перегрузочного процесса,

аварийных ситуаций и других причин. Такие реализации, увеличивающие время оборота, должны исключаться из практики перевозочного процесса. Повысить эффективность транспортировки балластировочных материалов позволяет увеличение массы вертушек. Иногда вместо вертушки из 23 платформ формируется сдвоенная вертушка из 46 платформ. Расчеты позволили определить (рис. 7) рациональные объемы таких поездов применительно к средневзвешенным размерам фронтов работ.

Функционально-технологические связи «карьер–фронт балластировочных работ» в Северо-Западном регионе характеризуется наличием в системе взаимодействия предприятий большого количества вероятностных факторов, управление которыми повышает эффективность железнодорожного строительства.

Использование методических рекомендаций на основе положений данной статьи позволяет реализовать экономико-математические модели, учитывающие эти факторы, и оптимизировать процесс производства.

Библиографический список

1. Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года (основные положения). – Дата офиц. опубли. на <http://doc.rzd.ru> : 16.04.2014 (дата обращения : 18.08.2018).
2. Распоряжение ОАО «РЖД» от 02.05.2012 г. № 857р «Об утверждении и введении в действие Положения о системе ведения путевого хозяйства ОАО «Российские железные дороги»». – М. : ОАО «РЖД», 2012.
3. Казак А. А. Организация маневровой работы на сортировочной станции / А. А. Казак // Труды Всерос. науч.-практич. конференции профессорско-преподавательского состава «Транспорт–2004». Ч. 1. – Ростов н/Д. : Изд-во РГУПС, 2004. – С. 42–43.
4. Карасёв С. В. Программа для оптимизации решения транспортных задач линейного программирования «Математическое моделирование–транспортные задачи» / С. В. Карасёв // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». – 2014. – Т. 1, № 2 (57). – С. 37.
5. Колос А. Ф. Оценка воздействия вибродинамической нагрузки на путевой щебень / А. Ф. Колос, Д. С. Николайтис, А. А. Морозова // Современные методы проектирования транспортных магистралей как элементов природно-технической системы : Материалы науч.-практич. конференции, посвященной 100-летию со дня рождения заслуженного деятеля наук РСФСР доктора технических наук, профессора А. К. Дюнина. – СПб. : ПГУПС, 2015. – С. 59–63.
6. Ларин Н. С. Управление технико-экономическими показателями карьеров нерудных строительных материалов на основе аналогового метода оценки затрат / Н. С. Ларин // Горн. информ.-аналит. бюл. (науч.-технич. журн.). – 2015. – № 5. – С. 108–112.
7. Попович М. В. Моделирование уплотнения балласта путевой машиной / М. В. Попович, Б. Г. Волковойнов, А. В. Атаманюк // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 3. – С. 6–8.

8. Акиншина И. М. Автоматизированный учет поставок щебня для нужд железных дорог / И. М. Акиншина, В. Н. Трифонов // Экономика железных дорог. – 2015. – № 6. – С. 86–93.

9. Фомин С. И. Прогнозирование рыночных цен на щебень при определении оптимальной производительности карьера / С. И. Фомин, Н. С. Ларин // Маркшейдерия и недропользование. – 2015. – № 6 (80). – С. 9–12.

10. Карпов Ю. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 / Ю. Карпов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 400 с.

11. Устьянов В. Б. Керамический щебень для дорог и очистки стоков / В. Б. Устьянов, В. В. Иващенко // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2014. – № 3 (182). – С. 18–19.

References

1. *Strategiya razvitiya kholdinga "RZhD" na period do 2030 goda (osnovniye polozheniya)* [“RZhD” holding company development strategy for the period up to 2030 (main principles)]. The date of official publication on <http://doc.rzd.ru>: 16.04.2014 (accessed: 18.08.2018). (In Russian)
2. *Rasporyazheniye OAO "RZhD" ot 02.05.2012 no. 857p "Ob utverzhdenii i vvedenii v deistviye Polozheniya o sisteme vedeniya putevogo khozyaistva OAO "Rossiyskiye zhelezniye dorogi"* [OAO “RZhD” order dated 02.05.2012 N 857r “On approval and implementation of the Regulation on the system of OAO “Russian railways” track facilities management]. Moscow, OAO “RZhD” Publ., 2012. (In Russian)
3. Kazak A. A. Organizatsiya manevrovoy raboty na sortirovochnoy stantsii [Shunting operation management at marshalling yard]. *Trudy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava "Transport–2004"* [Proceedings of All-Russian research and training conference for higher-education teaching personnel “Transport–2004”]. Pt 1. Rostov-on-Don, RGUPS Publ., 2004, pp. 42–43. (In Russian)
4. Karasyev S. V. Programma dlya optimizatsii resheniya transportnykh zadach lineinogo programmirovaniya “Matematicheskoye modelirovaniye–

transportniye zadachy” [Software designed to optimize the solution of transport linear programming problems “Mathematical simulation–transport problems”]. *Khroniky obyedinennogo fonda elektronnykh resursov “Nauka i obrazovaniye”* [The news of Science and Education electronic resources joint fund], 2014, vol. 1, no. 2 (57), 37 p. (In Russian)

5. Kolos A. F., Nikolaitist D. S. & Morozova A. A. Otsenka vozdeistviya vibrodinamicheskoy nagruzky na putevoy shcheben [Impact assessment of vibrodynamic load on crushed ballast]. *Sovremenniy metody proyektirovaniya transportnykh magistralей kak elementov prirodno-tekhnicheskoy sistemy* [Modern design methods of traffic arteries as elements of natural engineering system]. Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya zaslužennogo deyatelya nauk RSFSR doktora tekhnicheskikh nauk, professora A. K. Dyunina [Proceedings of research and training conference dedicated to centenary of the birth of an honored RSFSR scientist, Doctor of Engineering Sciences, professor A. K. Dyunin]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2015, pp. 59–63. (In Russian)

6. Larin N. S. Upravleniye tekhniko-ekonomicheskimi pokazatelyami karyerov nerudnykh stroitelnykh materialov na osnove analogovogo metoda otsenki zhatrat [Pit performance management of aggregates based on analog cost estimation procedure]. *Gorniy informatsionno-analicheskiiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiiy zhurnal)* [Mining information-analytical bulletin (scien-

tific and technical journal)], 2015, no. 5, pp. 108–112. (In Russian)

7. Popovich M. V., Volkovoinov B. G. & Atamanyuk A. V. Modelirovaniye uplotneniya ballasta putevoy mashinoy [Modeling of ballast consolidation by track machine]. *Put i putevoye khozyaistvo* [Track and track facilities], 2016, no. 3, pp. 6–8. (In Russian)

8. Akinshina I. M. & Trifonov V. N. Avtomatizirovaniy uchet postavok shchebnya dlya nuzhd zheleznykh dorog [Automatized account of railway ballast supply]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [Railroad economics], 2015, no. 6, pp. 86–93. (In Russian)

9. Fomin S. I. & Larin N. S. Prognozirovaniye rynochnykh tsen na shcheben pry opredelenii optimalnoy proizvoditelnosti karyera [Prediction of market prices on ballast when determining the mining pit optimum performance]. *Marksheideriya i nedropolzovaniye* [Mine surveying and mineral resources management], 2015, no. 6 (80), pp. 9–12. (In Russian)

10. Karpov Yu. Imitatsionnoye modelirovaniye sistem. Vvedeniye v modelirovaniye s AnyLogic 5 [Simulation modeling of systems. Introduction to modelling with AnyLogic 5]. Saint Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2006, 400 p. (In Russian)

11. Ustyanov V. B. & Ivashchenko V. V. Keramicheskiy shcheben dlya dorog i ochistky stokov [Ceramic crushed stone for roads and sewage treatment]. *Stroitelniye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka* [Construction materials, equipment, technologies of the 21st century], 2014, no. 3 (182), pp. 18–19. (In Russian)

* КАБАНОВ Александр Васильевич – канд. техн. наук, доцент, avkabanov07@inbox.ru; МАЛЫШЕВ Константин Сергеевич – аспирант; ВАСИЛЬЕВ Данил Николаевич – аспирант, vasilev.danil@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 621.313.3

К. К. Ким, М. А. Герасимов, А. А. Смирнов

**АВТОНОМНОЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ РЕЧНЫХ МОСТОВ
И ПРИЛЕГАЮЩИХ К НИМ ОБЪЕКТОВ**

Дата поступления: 27.06.2018

Решение о публикации: 17.10.2018

Аннотация

Цель: Повышение безопасности движения, снижение влияния на экологию, а также экономия электроэнергии при электроснабжении речных мостов. **Методы:** Используя малые гидроэлектростанции (ГЭС), можно получить возобновляемый и вполне рентабельный источник электрической энергии – энергию течения рек. Описан проект по установке малых погружных ГЭС на опоры мостов через Неву в Санкт-Петербурге. **Результаты:** Рассчитаны мощности гидротурбин для каждого моста через Неву, исходя из их энергопотребления и количества возможных мест установки турбин. **Практическая значимость:** Предполагается отдавать выработанную электроэнергию в тяговую сеть электрического транспорта или аккумулировать в накопителях, обеспечивая питание близлежащей инфраструктуры в любое время суток. Помимо этого при использовании системы в черте города за счет дополнительных источников электроэнергии будет обеспечено усиление городской распределительной сети.

Ключевые слова: Малая ГЭС, электроснабжение, речной мост, свободно-поточная ГЭС, безопасность движения, гидрогенерация.

Konstantin K. Kim, D. Eng. Sci., professor, department chair, kimkk@inbox.ru; ***Mikhail A. Gerasimov**, postgraduate student, gma013@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University), **Aleksandr A. Smirnov**, leading specialist, toe@pgups.ru (“TransneftElektrosetServis” Ltd) INDEPENDENT ELECTRICAL POWER SUPPLY OF RIVER BRIDGES AND OBJECTS ADJACENT TO THEM

Summary

Objective: To improve traffic safety, reduce the environmental impact and to save electricity by using the energy of river flows to supply river bridges with power. **Methods:** A renewable and quite cost-effective source of electric energy can be obtained by using small hydroelectric power stations (GES). A project on installation of small submersible GES on the bridge footings over the Neva River in Saint Petersburg is described in the given article. **Results:** The powers of hydraulic turbines for each bridge were calculated based on their energy consumption and the number of possible turbine installation places. **Practical importance:** It is supposed to give generated electric power to the traction network of electric transport or to accumulate it in storages providing power supply of a nearby infrastructure at any time. In addition, strengthening of the present distribution network within the city by means of the additional sources of electricity will be provided.

Keywords: Small hydroelectric power stations, electricity supply, river crossing bridges, free-flow hydroelectric power plant, traffic safety, hydraulic generation.

Такие объекты транспортной инфраструктуры как мосты вне зависимости от габаритов и назначения являются источником повышен-

ной опасности для людей и грузов. Транспортные аварии на мостах, особенно в черте города, влекут за собой множество отрицательных

моментов: пробки, сложные процедуры ликвидации последствий аварии (особенно в случае падения транспорта в воду), не говоря уже о человеческих жертвах. Одним из основных атрибутов сложных транспортных сооружений становится освещение, наличие которого в темное время суток – залог безопасности движения. В Российской Федерации электрооснабжение транспортных объектов внешнее и подвержено перебоям ввиду высокой вероятности аварий во многозвенной системе преобразования и передачи энергии, тогда как непосредственная близость к потребителям энергии течения рек дает возможность внедрения автономного освещения мостов [1].

Извлекать и преобразовывать энергию течения можно с помощью малых гидроэлектростанций (ГЭС), установленных на опорах мостов и прилегающих бережных [2, 3].

В зависимости от способа использования энергии воды малые ГЭС подразделяются на [4]:

1) плотинные: в основу способа создания водного напора положено строительство плотины, от которой по специальному желобу (трубе) потоки воды направляются к турбине;

2) деривационные: при устройстве ГЭС такого типа используется естественный напор воды (быстрые, горные реки), в этом случае часть воды отводится из русла реки и направляется к турбине, после чего вода сбрасывается в основное русло;

3) плотинно-деривационные: в данном типе ГЭС может быть задействован как естествен-

ный напор, так и напор, создаваемый плотинной;

4) свободно-поточные: этот тип ГЭС не предполагает строительства напорных сооружений, кинетическая энергия воды извлекается в ее свободном течении путем установки специальных электрогенерирующих устройств наплавного или погружного вида.

Применение свободно-поточных малых ГЭС (рис. 1) не окажет негативного влияния на экологию, поскольку они могут быть установлены на уже готовые основания (опоры мостов) [5, 6]. Эти ГЭС имеют коэффициент полезного действия (КПД) 92–96 % и не требуют частого сервисного обслуживания [7, 8]. Бесплотинные ГЭС погружного типа широко внедрены в Ирландии, Голландии, Бельгии, Германии, Великобритании и Китае. К сожалению, на данный момент они не популярны на территории Российской Федерации из-за отсутствия инновационных технологий в области малой гидрогенерации.

Для более предметного обоснования применения малых ГЭС рассмотрим Санкт-Петербург, обладающий большим количеством мостов с разной степенью энергопотребления. Крупные мосты города расположены на водной транспортной артерии города – р. Нева (рис. 2). Средний многолетний годовой расход воды в Неве – 78,9 км³ (в среднем 2500 м³/с), что является самым эффективным показателем рек на территории Северо-Западного региона. Площадь собственного бассейна Невы составляет 5 тыс. км², а включая бас-

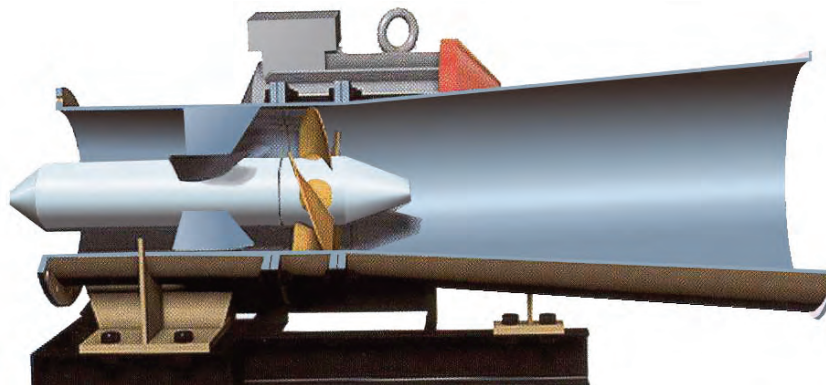


Рис. 1. Погружная турбина малой ГЭС



Рис. 2. Дельта р. Невы

сейн Ладожского озера – 281 тыс. км². На этой территории осадки значительно превышают испарение: на него идет лишь 37,7%, а на суммарный сток реки – 62,3 %.

Высокий расход воды обеспечивает постоянную скорость течения 0,8–1,1 м/с. Благодаря небольшой протяженности реки и ее полноводности, скорость течения в реке практически не зависит от времени года. Из-за равномерного стока воды из Ладожского озера у Невы в течение всего года не бывает весеннего подъема воды и паводков. В ней практически отсутствуют водоросли.

Инфраструктура, построенная на Неве и ее берегах, требует постоянного электроснабжения в целях освещения мостов, набережных, отдачи мощности в тяговую сеть городского электротранспорта, обеспечения питания систем автоматики. В Санкт-Петербурге через Неву построено 13 разводных мостов, являющихся стратегически важными объектами и потребляющих достаточно большое количе-

ство электроэнергии по сравнению с остальными мостами города (см. таблицу). Мосты через Большую и Малую Невки не рассматриваются из-за меньшего расхода воды.

Используя малые ГЭС и энергию течения Невы, можно иметь возобновляемый и самый рентабельный источник электрической энергии. В отличие от Солнца и переменчивого ветра водное течение Невы стабильно и позволяет получать на выходе ГЭС постоянную запланированную мощность [9].

На основании данных, приведенных в таблице, мощность типовой устанавливаемой турбины должна быть не ниже 8,4 кВт [10]. Количество применяемых турбин на каждом мосту будет определено исходя из характеристик предлагаемого оборудования.

В светлое время суток выработанную электроэнергию можно отдавать в тяговую сеть электрического транспорта или аккумулировать в перспективно устанавливаемых батареях под сводами мостов (рис. 3), обеспечивая пи-

Расчет мощности турбин для мостов на р. Нева

Наименование	Суммарная потребляемая осветильниками мощность, Вт	Потребляемая мощность подсветки, Вт	Потребляемая мощность, Вт	Количество возможных мест установки гидротурбин	Минимально необходимая мощность одной гидротурбины, Вт
Володарский мост	31 000	36 190	67 190	8	8399
Мост Александра Невского	34 000	51 700	85 700	16	5356
Мост Петра Великого	4 000	46 800	50 800	8	6350
Литейный мост	12 000	46 000	58 000	16	3625
Троицкий мост	19 500	67 210	86 710	20	4336
Дворцовый мост	7 000	33 605	40 605	12	3384
Благовещенский мост	11 000	29 400	40 400	20	2020
Биржевой мост	5 000	25 400	30 400	16	1900
Тучков мост	5 000	23 000	28 000	8	3500

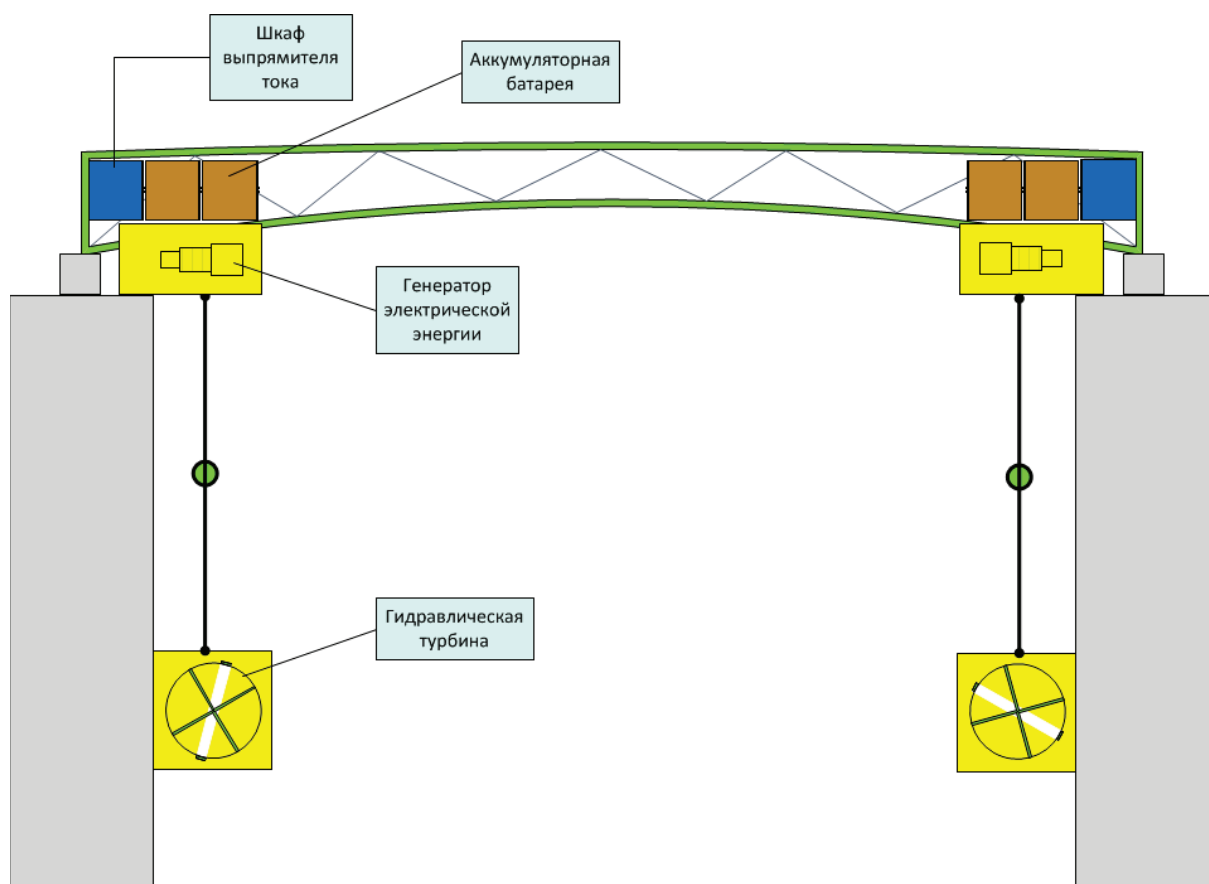


Рис. 3. Блок-схема установки малых ГЭС

тание близлежащей инфраструктуры в любое время суток [11–13]. Мощности, отдаваемой в транспортную сеть каждой дистанции пути в районе мостов, не хватит на обеспечение электроэнергией на 100 %, однако улучшит качество электроэнергии и устранил эффект «просадки» напряжения на дистанции пути в момент пиковой нагрузки.

Срок окупаемости проекта по автономному электроснабжению мостов на примере Санкт-Петербурга будет находиться в районе 4 лет. Вместе с тем возможно обеспечение электроэнергией набережных, подсветки фасадов зданий, пристаней малого судоходства, тяговой сети городского электротранспорта. За счет дополнительных источников электроэнергии произойдет усиление существующей распределительной сети города [13, 14].

Значительным положительным эффектом всего проекта станет создание рынка электроэнергии для малых и средних потребителей, что является одним из ключевых направлений развития электросетевого комплекса Российской Федерации [15].

Библиографический список

1. Бляшко Я. И. Малая гидроэнергетика России. Проблемы и перспективы развития / Я. И. Бляшко // Энергетик. – 2013. – № 6. – С. 101–105.
2. Кривченко Г. И. Гидравлические машины (турбины и насосы) / Г. И. Кривченко. – М. : Энергия, 1978. – 320 с.
3. Соболин Г. В. Проблемы использования малых рек и каналов ирригационных систем в целях развития малой гидроэнергетики / Г. В. Соболин, И. В. Сатункин, Ю. И. Коровин // Изв. ОГАУ. – 2004. – № 1 (2). – С. 32–35.
4. Портал про альтернативную энергию. – URL : <https://alter220.ru/voda/mikro-ges.html> (дата обращения : 02.05.2018).
5. Ким К. К. Анализ влияния конструкционных факторов на надежность герметичных электромеханических преобразователей / К. К. Ким, Д. А. Голоколос, Н. С. Карпова, С. Н. Иванов // Учен. зап. КнАГТУ. – 2013. – № IV-1 (16). – С. 29–34.
6. Глазырин М. В. Перспективы применения генераторных комплексов на основе машины

двойного питания для малых ГЭС / М. В. Глазырин, Р. Х. Диеров // Изв. вузов. Электромеханика. – 2012. – № 6. – С. 78.

7. Кривченко Г. И. Автоматическое регулирование гидротурбин / Г. И. Кривченко. – М. : Энергия, 1964. – 286 с.

8. Эпштейн Р. М. Система регулирования гидроагрегатов / Р. М. Эпштейн, Б. Е. Митрофанов, М. Я. Руденский. – М. : Энергия, 1968. – 189 с.

9. Мустафаев Р. И. Моделирование и исследование режимов работы гидроагрегатов малых ГЭС с машинами двойного питания / Р. И. Мустафаев, Л. Г. Гасанова, М. М. Мусаев и др. // Изв. вузов. Электромеханика. – 2015. – № 4. – С. 59–66.

10. Ким К. К. Основы проектирования гидроэлектродинамических теплогенераторов / К. К. Ким, С. Н. Иванов, С. В. Уханов // Электро. Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность. – 2008. – № 4. – С. 14–16.

11. Ким К. К. Визуализация результатов гидродинамического расчета совмещенных энергетических устройств с использованием CFD технологий / К. К. Ким, О. В. Приходченко, А. А. Просолович // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – № 2. – С. 39–43.

12. Ким К. К. Зависимость степени компенсации реактивности синхронного компенсатора от его параметров / К. К. Ким, А. Ю. Панычев, Л. С. Блажко // Электротехника. – 2017. – № 88 (10). – С. 623–628.

13. Ким К. И. Переходные процессы в асинхронной машине : монография / К. И. Ким, К. К. Ким. – СПб. : ОМ-Пресс, 2013. – 90 с.

14. Ким К. К. Об устойчивости синхронной машины с нульпоточной обмоткой статора по отношению к радиальным возмущениям / К. К. Ким // Электричество. – 1999. – № 11. – С. 23–29.

15. Ким К. И. МГД-генераторы на поршневых потоках : монография / К. И. Ким, К. К. Ким. – М. : Маршрут, 2005. – 300 с.

References

1. Blyashko Ya. I. Malaya gidroenergetika Rossii. Problemy i perspektivy razvitiya [Small hydropower of Russia. Development issues and prospects]. *Energetik [Powerman]*, 2013, no. 6, pp. 101–105. (In Russian)
2. Krivchenko G. I. *Gidravlicheskiye mashyny (turbiny i nasosy)* [Hydraulic engines (turbines and

pumps)]. Moscow, Energiya Publ., 1978, 320 p. (In Russian)

3. Sobolin G. V., Satunkin I. V. & Korovin Yu. I. Problemy ispolzovaniya malykh rek i kanalov irrigatsionnykh system v tselyakh razvitiya maloy gidroenergetiki [Development issues of minor rivers and irrigation system channels aimed at development of small hydropower]. *Izvestiya OGAU [Orenburg State Agrarian University Proceedings]*, 2004, no.1 (2), pp. 32–35. (In Russian)

4. Portal pro alternativnyuyu energiyu [Alternative energy portal]. URL: <https://alter220.ru/voda/mikro-ges.html> (accessed: 02.05.2018). (In Russian)

5. Kim K. K., Golokolos D. A., Karpova N. S. & Ivanov S. N. Analiz vliyaniya konstruktivnykh faktorov na nadezhnost germetichnykh elektromekhanicheskikh preobrazovateley [Impact analysis of constructional factors on reliability of hermetic electromechanical transducers]. *Ucheniye zapiski KnAGTU [Komsomolsk-on-Amur State Technical University bulletin]*, 2013, no. IV-1 (16), pp. 29–34. (In Russian)

6. Glazyrin M. V. & Dierov R. Kh. Perspektivy primeneniya generatornykh kompleksov na osnove mashyny dvoynogo pitaniya dlya malykh GES [Application prospects of power generating complex on the basis of doubly-fed electric machine for small GES]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika [Proceedings of Higher Educational Universities. Electromechanics]*, 2012, no. 6, p. 78 (In Russian)

7. Krivchenko G. I. *Avtomaticheskoye regulirovaniye gidroturbin [Automatic regulation of water turbines]*. Moscow, Energiya Publ., 1964, 286 p. (In Russian)

8. Epshtein R. M., Mitrofanov B. E. & Rudenskiy M. Ya. *Sistema regulirovaniya gidroagregatov [Regulatory system of hydroelectric units]*. Moscow, Energiya Publ., 1968, 189 p. (In Russian)

9. Mustafayev R. I., Gasanova L. G., Musayev M. M. et al. Modelirovaniye i issledovaniye rezhimov raboty gidroagregatov malykh GES s mashinamy dvoynogo pitaniya [Operating regimes of small GES hydraulic units with doubly-fed electric machines: simulation and

analysis]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika [Proceedings of Higher Educational Universities. Electromechanics]*, 2015, no. 4, pp. 59–66. (In Russian)

10. Kim K. K., Ivanov S. N. & Ukhanov S. V. Osnovy proektirovaniya gidroelektrodinamicheskikh teplogeneratorov [Hydro-electrodynamical power generators: principles of design]. *Elektro. Elektrotehnika. Elektroenergetika. Elektrotekhnicheskaya promyshlennost [Electro. Electric engineering, Electrical power engineering. Electrical engineering industry]*, 2008, no. 4, pp. 14–16. (In Russian)

11. Kim K. K., Prihodchenko O. V. & Prosolovich A. A. Vizualizatsiya rezultatov gidrodinamicheskogo rascheta sovmeshchennykh energeticheskikh ustroystv s ispolzovaniyem CFD tekhnologiy [Hydrodynamic calculation data visualization of combined energy devices based on CFD technologies]. *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta [Transport electronics and electrical equipment]*, 2014, no. 2, pp. 39–43. (In Russian)

12. Kim K. K., Panychev A. Yu. & Blazhko L. S. Zavisimost stepeny kompensatsii reaktivnosti sinkhronnogo kompensatora ot yego parametrov [The dependence of synchronous compensator reactivity compensation factor from its parameters]. *Elektrotehnika [Electrical engineering]*, 2017, no. 88 (10), pp. 623–628. (In Russian)

13. Kim K. I. & Kim K. K. *Perekhodnye protsessy v asinkhronnoy mashine [Transient processes in asynchronous machine]*. Saint Petersburg, OM-Press Publ., 2013, 90 p. (In Russian)

14. Kim K. K. Ob ustoichivosty sinkhronnoy mashiny s nulpotochnoy obmotkoy statora po otnosheniyu k radialnym vozmushcheniyam [On stability of synchronous machine with zero-stream stator winding to radial perturbation]. *Elektrichestvo [Electricity]*, 1999, no. 11, pp. 23–29. (In Russian)

15. Kim K. I. & Kim K. K. *MGD-generatory na porshnevnykh potokakh [MHD-generators on piston streams]*. Moscow, Marshrut Publ., 2005, 300 p. (In Russian)

КИМ Константин Константинович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, kimkk@inbox.ru; *ГЕРАСИМОВ Михаил Анатольевич – аспирант, gma013@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); СМЕРНОВ Александр Александрович – канд. техн. наук, ведущий специалист, toe@pgups.ru (ООО «ТранснефтьЭлектросетьСервис»).

УДК 504.054

И. С. Козлов**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ НАСЫПИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МИНЕРАЛЬНОГО ГЕОЭКОЗАЩИТНОГО МАТЕРИАЛА**

Дата поступления: 03.10.2018

Решение о публикации: 17.10.2018

Аннотация

Цель: Получение расчетного обоснования возможности использования минерального геоэкозащитного материала – пенобетона в конструкции железнодорожной насыпи. **Методы:** Применяется метод конечных элементов. **Результаты:** Рассчитано напряженно-деформированное состояние железнодорожной насыпи без пенобетона, а также с плитой из пенобетона различной толщины; даны рекомендации к проектированию геоэкозащитной конструкции в составе железнодорожного земляного полотна. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут быть применены при проектировании новых и реконструкции существующих железных дорог в качестве обоснования возможности внедрения предложенной геоэкозащитной конструкции в составе железнодорожного земляного полотна.

Ключевые слова: Напряженно-деформированное состояние, железнодорожная насыпь, земляное полотно, геоэкозащитный материал, пенобетон.

Ivan S. Kozlov, Cand. Eng. Sci., associate professor, kozlovi.s@yandex.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF RAILWAY EMBANKMENT WITH THE USE OF GEOECOLOGICAL PROTECTIVE MATERIAL

Summary

Objective: To obtain design-based justification of mineral geoeological material applicability, namely the use of foamed concrete in railway embankment design. **Methods:** The method of finite elements was applied in the study. **Results:** Stress-strain behavior of railway embankment was calculated without foamed concrete, as well as with foamed concrete plate of dissimilar thickness. Recommendations on design of geoeological protective construction being a part of railway roadbed were given. **Practical importance:** The obtained results may be applied in design of new and reconstruction of current railroads as implementation possibility justification of the introduced geoeological protective construction being a part of railway roadbed.

Keywords: Stress-strain behavior, railway embankment, subgrade, geoeological protective material, foamed concrete.

Развивая работы [1–8] об использовании геоэкозащитных свойств пенобетона по поглощению ионов тяжелых металлов в строительных конструкциях, в настоящей статье предложено расчетное обоснование (определено напряженно-деформированное состояние)

земляного полотна с применением пенобетонной плиты со средней плотностью 400 кг/м³.

С целью обезвреживания ионов тяжелых металлов, сохранения и сбережения природных ресурсов, а также укрепления основной площадки земляного полотна в конструкцию

насыпи вводится слой из минерального геоэкозащитного материала – пенобетона. Идея использования пенобетона в конструкции железнодорожного земляного полотна вызвала неоднозначную реакцию среди ученых.

Сохранение и сбережение природных ресурсов не требует серьезных доказательств и достигается за счет разности плотности материалов. Плотность предложенного пенобетона – 400 кг/м^3 , а уплотненной песчано-гравийной смеси, на месте которой предусматривается плита, – почти 2000 кг/м^3 . Возникает пятикратная экономия массы материала.

Геоэкологические свойства пенобетона также не вызвали сомнений, а возможность использования его для укрепления земляного полотна потребовалось подтвердить расчетами напряженно-деформированного состояния. Кроме того, возникли вопросы по параметрам пенобетонной плиты, ее ширине и толщине, которые смогли бы обеспечить сразу две функции: геоэкозащитную и укрепляющую. Ширина плиты была принята равной 5 м, для того чтобы обеспечить очистку стекающей (с подвижного состава, рельсошпальной решетки и балласта) воды, загрязненной ионами тяжелых металлов, а также обеспечить более равномерное распределение нагрузки от подвижного состава и верхнего строения пути на большую площадь, что должно снизить напряженно-деформированное состояние нижележащих грунтов.

Для обезвреживания ионов тяжелых металлов на срок службы верхнего строения пути между капитальными ремонтами (в среднем 10–15 лет) [2, 5] достаточно плиты из пенобетона толщиной 10 см.

Чтобы выяснить толщину плиты с наиболее выгодным вариантом напряженно-деформированного состояния, были сделаны четыре серии расчетов: без плиты, с плитой толщиной 10, 20 и 30 см. Деформации оценивались по краю и середине пенобетонной плиты, напряжения – в характерных сечениях: в подрельсовой зоне, где возникает самое большое силовое воздействие, и в горизонтальной плоскости под плитой (в точках под

осью, рельсом и краем) на глубине 40 см для чистоты эксперимента.

Для избегания возможных ошибок при определении исходных параметров и схемы нагружения, а также обеспечения сходимости расчетных значений оцениваемых величин с результатами измеренных в реальных натурных экспериментах исходные данные для расчета взяты из диссертации Г. М. Стояновича [9].

Схема исходной насыпи (без пенобетона) приведена на рис. 1, расчетная ее модель – на рис. 2.

Насыпь трехслойная, состоит из песчано-гравийной смеси, суглинка коричневого и суглинка серого. В основании залегает супесь коричневая. Крутизна откосов насыпи принята стандартная и составляет 1:1,5.

Используемые в расчетах грунты охарактеризованы в табл. 1.

Конструктивную схему насыпи с плитой из пенобетона различной толщины иллюстрирует рис. 3, расчетную ее модель – рис. 4.

Модуль упругости пенобетона и коэффициент Пуассона приняты по справочным данным и составляют 5000 МПа и 0,17 соответственно.

Все расчеты производились методом конечных элементов в сертифицированном программном комплексе FEM-models, разработанном ведущими специалистами компании ООО «ПИ Георекострукция». По данным официального сайта компании FEM-models это единственный в России программный продукт, позволяющий создавать совместную модель проектируемого здания, его фундаментов и основания (массива грунта) таким образом, что их расчет проводится совместно.

Особенно хотелось бы отметить вклад в развитие данного программного комплекса В. Н. Парамонова, технического директора ООО «ПИ Георекострукция», доктора технических наук, профессора Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, члена Технического комитета № 34 «Большие деформации в геотехнике» Международной ассоциации

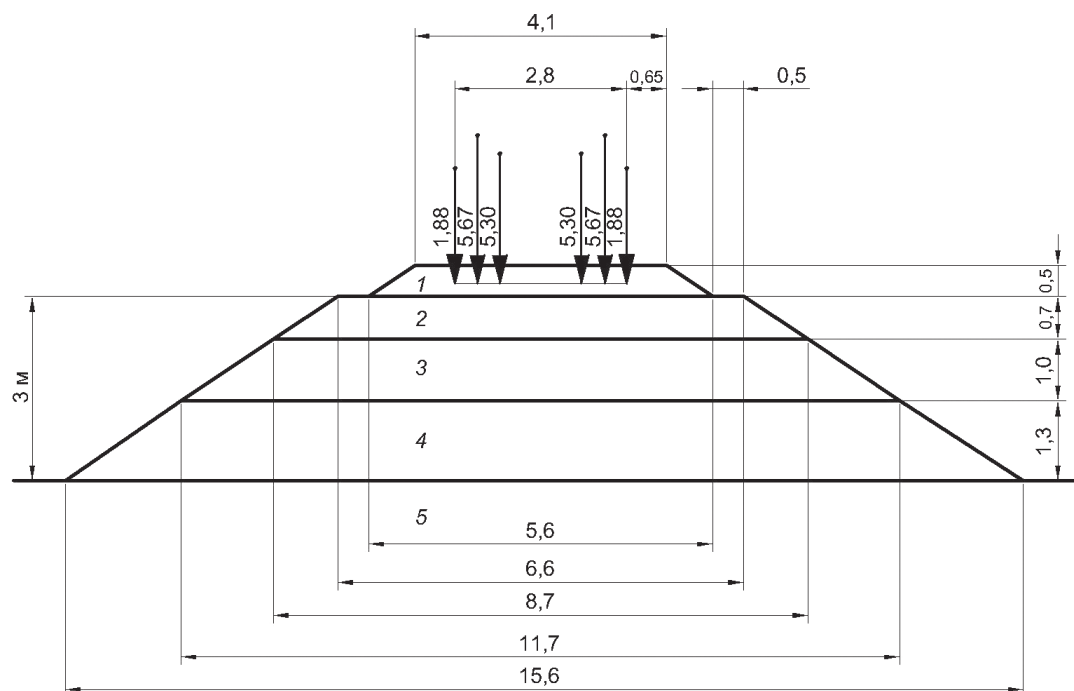


Рис. 1. Расчетная схема исходной насыпи:

1 – щебень; 2 – песчано-гравийная смесь; 3 – суглинок коричневый; 4 – суглинок серый; 5 – супесь коричневая. Величины – в метрах

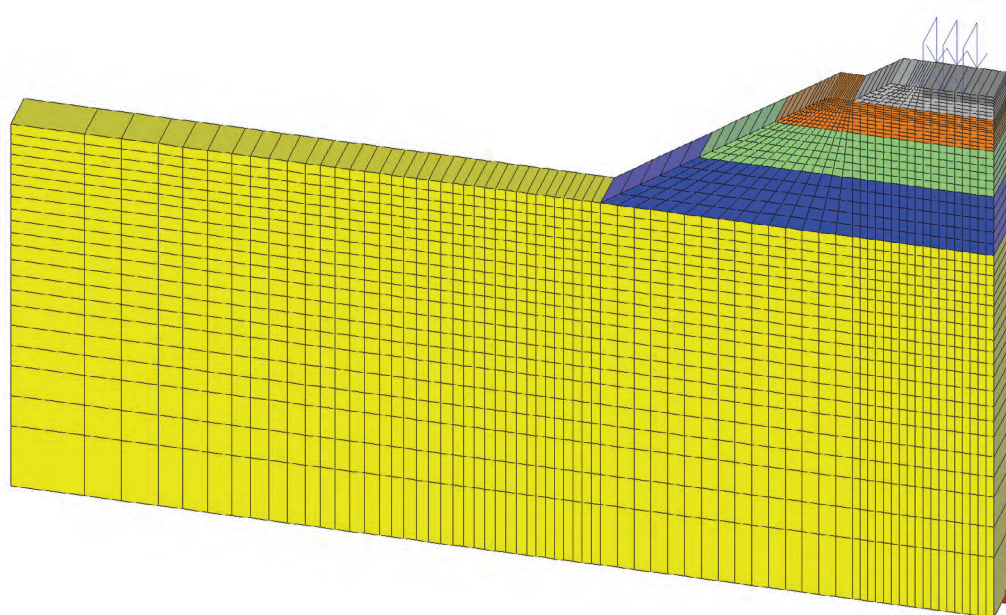


Рис. 2. Расчетная модель исходной насыпи

геотехников ISSMGE, члена Российского общества по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению, члена Президиума РОМГТиФ и Санкт-Петербургской комиссии по основаниям, фундаментам и подземным со-

оружиям. Анализ его работ [10–13] говорит о достоверности полученных результатов.

Расчет вертикальных перемещений основной площадки земляного полотна (табл. 2) показал, что плита при толщине 10 и 20 см

ТАБЛИЦА 1. Физико-механические характеристики материалов, принятые в расчетах

Наименование грунта	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Удельный вес, кН/м ³	Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, град.
Щебень	400	0,23	22	0	40
Песчано-гравийная смесь	120	0,28	19	1	30
Суглинок коричневый	50	0,35	20	28	22
Суглинок серый	50	0,37	20	28	22
Супесь коричневая	45	0,31	20	14	25



Рис. 3. Конструктивная схема насыпи с плитой из пенобетона различной толщины

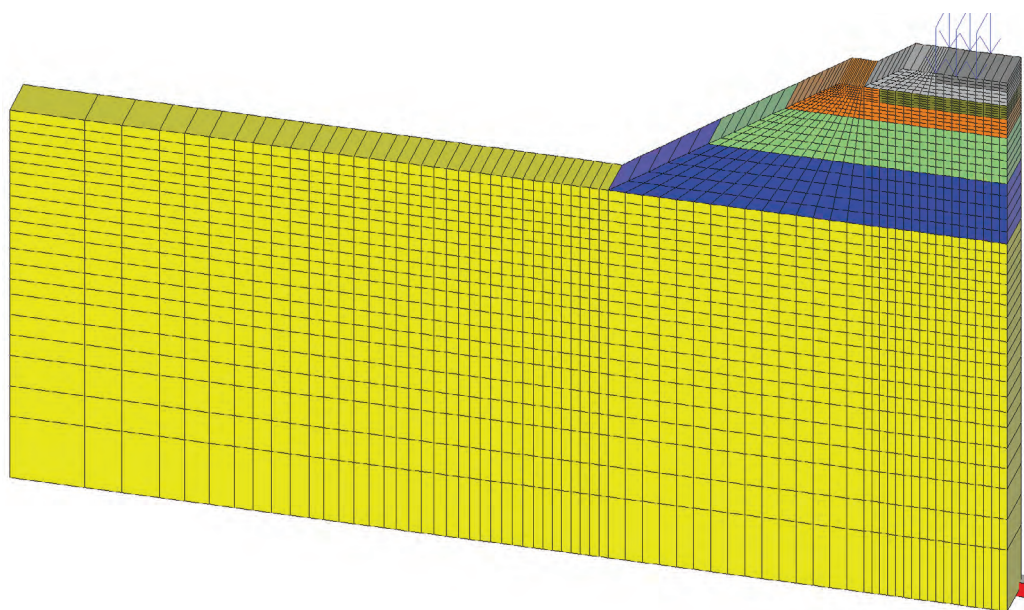


Рис. 4. Расчетная модель насыпи с плитой из пенобетона различной толщины

ТАБЛИЦА 2. Вертикальные перемещения основной площадки земляного полотна (в мм)

Сечение	Без плиты	Толщина плиты, см		
		10	20	30
Край плиты	3,5	4	4	3,7
Середина плиты	6,2	6	6	5,9

оказывает одинаковое незначительное распределяющее (выравнивающее) воздействие, а именно снижает вертикальные перемещения по оси сооружения на 0,2 мм и увеличивает по краю на 0,5 мм. Плита толщиной 30 см работает лучше – снижает вертикальные перемещения по оси сооружения на 0,3 мм и увеличивает по краю всего на 0,2 мм.

Расчет вертикальных напряжений в программе выполняется в два этапа:

- вычисляются напряжения от собственного веса;
- определяются напряжения от собственного веса и нагрузки.

Избыточные напряжения (напряжения, вызванные нагрузкой) являются вычисляемой величиной.

Распределение вертикальных напряжений в горизонтальной плоскости на глубине 40 см от основной площадки земляного полотна приведено в табл. 3.

Анализ табл. 3 и рис. 5 показывает, что пенобетонная плита оказывает значительное распределяющее воздействие по напряжениям в грунтах. Плита толщиной 10 см почти не влияет на уровень напряжений в грунте на глу-

бине 40 см в сечении под серединой конструкции. При этом вертикальные напряжения под краем плиты увеличиваются, а под рельсом уменьшаются. Плиты толщиной 20 и 30 см имеют аналогичную, но более ярко выраженную зависимость распределения. Кроме того, ввиду повышения жесткости конструкции с ее утолщением все большая часть нагрузки передается краям плиты, снижается давление на середину. Как изменяются избыточные вертикальные напряжения, показано в табл. 4.

Максимальное понижение напряжений в грунте земляного полотна под плитой наблюдается в сечении под рельсом и составляет 16,2% при толщине пенобетона 30 см.

Наибольший интерес представляют вертикальные напряжения в сечении под рельсом (табл. 5, рис. 6), потому что именно в этом месте в соответствии с опытом эксплуатации и научными исследованиями напряжения, превышающие 80 кПа, вызывают остаточные деформации земляного полотна и приводят к расстройству пути.

Данные табл. 5 и рис. 6 отражают снижение избыточных вертикальных напряжений в грун-

ТАБЛИЦА 3. Вертикальные напряжения (в кПа) в горизонтальной плоскости на глубине 40 см от основной площадки земляного полотна

Расчет	Вид напряжения	Сечение плиты		
		Край	Под рельсом	Середина
Без плиты	От собственного веса	11,8	15	15,2
	От собственного веса и нагрузки	44,6	97,8	87,6
	Избыточные	32,8	82,8	72,4
С плитой толщиной 10 см	От собственного веса	10,6	13,4	13,7
	От собственного веса и нагрузки	43,6	92	86,1
	Избыточные	33	78,6	72,4
20 см	От собственного веса	9,7	12	12,1
	От собственного веса и нагрузки	45,4	85,9	82,8
	Избыточные	35,7	73,9	70,7
30 см	От собственного веса	9	9,5	10,1
	От собственного веса и нагрузки	48	78,9	77,5
	Избыточные	39	69,4	67,4

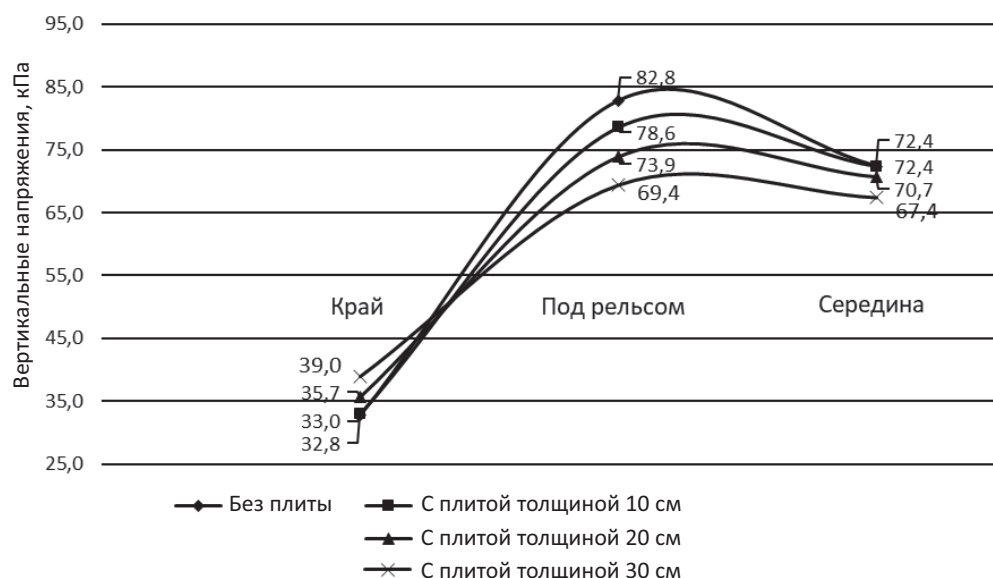


Рис. 5. Вертикальные напряжения в сечении под рельсом на глубине 40 см от основной площадки земляного полотна

ТАБЛИЦА 4. Изменение избыточных вертикальных напряжений (в %) от значений расчета «Без плиты»

Расчет с плитой толщиной, см	Сечение плиты		
	Край	Под рельсом	Середина
10	–0,6	5,1	0,0
20	–8,8	10,7	2,3
30	–18,9	16,2	6,9

Примечание. Знак «–» означает увеличение напряжений, «+» – снижение.

тах в подрельсовой зоне. Значения напряжений несколько завышены для указанной глубины по сравнению с данными реальных измерений, но объясняется это тем, что в расчетах толщина балласта принята 30 см, а результаты экспериментальных замеров напряжений приводятся для нормативной толщины балласта 40–50 см в зависимости от конструктивного решения верхнего строения пути.

Дальнейший анализ избыточных напряжений с сопоставлением их с допускаемой величиной позволил сформулировать следующие основные выводы и рекомендации к проектированию конструкции железнодорожного земляного полотна с плитой из пенобетона для обеспечения геоэкозащитной и укрепляющей

функций, а также экономии материалов (щебня, песчано-гравийной смеси):

1. Для обезвреживания ионов тяжелых металлов на срок службы верхнего строения пути между капитальными ремонтами (в среднем 20–25 лет) требуется плита из пенобетона толщиной 10 см. При этом для обеспечения напряжений в пределах допустимых должна быть обеспечена нормативная толщина щебня в балластной призме.

2. С точки зрения напряженно-деформированного состояния для обеспечения напряжений в грунтах в пределах допустимых может быть использована плита толщиной 20 см. При этом может быть достигнута экономия щебня, так как толщины балластной призмы в 30 см

ТАБЛИЦА 5. Снижение вертикальных напряжений в сечении под рельсом на глубине 40 см от основной площадки земляного полотна

Расчет	Вид напряжения	Вертикальные напряжения, кПа
Без плиты	От собственного веса	8,2
	От собственного веса и нагрузки	94,7
	Избыточные	86,5
С плитой толщиной 10 см	От собственного веса	9,8
	От собственного веса и нагрузки	91,9
	Избыточные	82,1
20 см	От собственного веса	10
	От собственного веса и нагрузки	85,1
	Избыточные	75,1
30 см	От собственного веса	9,5
	От собственного веса и нагрузки	78
	Избыточные	68,5

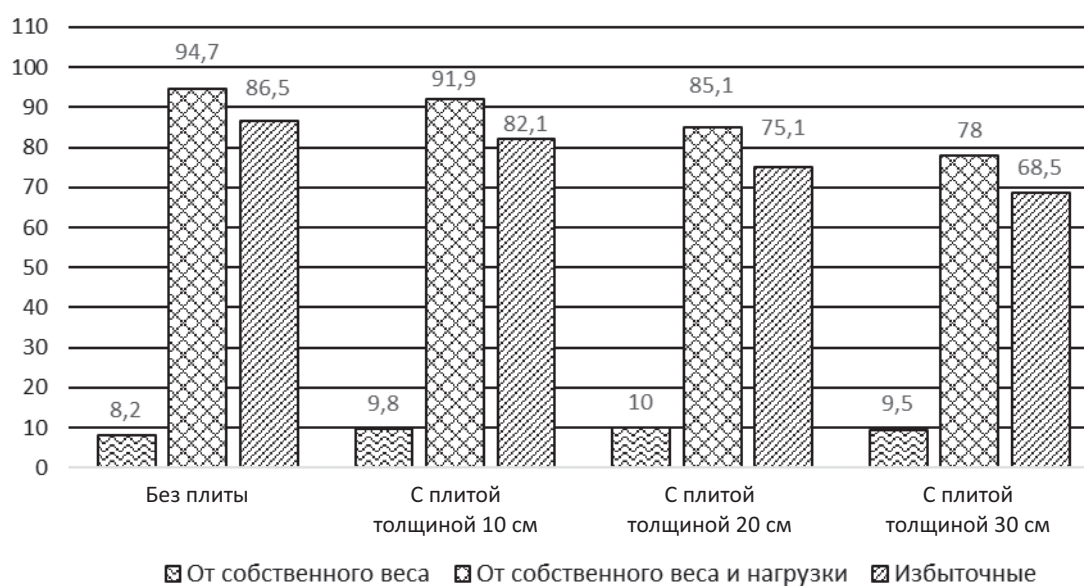


Рис. 6. Вертикальные напряжения в сечении под рельсом на глубине 40 см от основной площадки земляного полотна

достаточно, чтобы не превысить допускаемое напряжение в грунтах. Плита толщиной 20 см по своей геоэкозащитной функции может работать два межремонтных срока.

3. Балласт толщиной 30 см с пенобетонной плитой толщиной 30 см либо балласт нормативной толщины с плитой толщиной 20 см дает резерв для увеличения осевой нагрузки

с обеспечением вертикальных напряжений в грунтах в пределах допустимых.

Библиографический список

1. Сватовская Л. Б. Новые методы геоэкозащиты природно-техногенных систем строительной

деятельности в интересах устойчивого развития : монография / Л. Б. Сватовская, М. М. Байдарашвили, М. В. Шершнева, А. М. Сычева, А. В. Хитров, Н. А. Бабак, Е. И. Макарова, В. Н. Сурков, А. А. Кабанов, А. Е. Князев, М. Хаммади, М. Ю. Савельева. – СПб. : ПГУПС, 2014. – 72 с.

2. Сватовская Л. Б. Геоэкологические свойства и методы геоэкозащиты в транспортном строительстве / Л. Б. Сватовская // Транспортное строительство. – 2014. – № 10. – С. 28–30.

3. Сватовская Л. Б. Оценка качества геоэкозащитных технологических решений на объектах железнодорожного транспорта / Л. Б. Сватовская, М. В. Шершнева, А. С. Сахарова, М. М. Байдарашвили, Н. Н. Ефимова, И. В. Степанова // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 2 (54). – С. 34.

4. Сватовская Л. Б. Новое геоэкозащитное свойство строительных материалов и изделий / Л. Б. Сватовская, М. М. Байдарашвили, Е. И. Макарова, М. В. Шершнева, А. М. Сычева, А. А. Кабанов // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 1 (53). – С. 36.

5. Сватовская Л. Б. Новые геоэкозащитные технологии при строительстве и реконструкции железных дорог : монография / Л. Б. Сватовская, А. С. Сахарова, М. М. Байдарашвили, А. В. Петряев, М. В. Шершнева, В. В. Ганчиц. – СПб. : ПГУПС, 2012. – 80 с.

6. Сватовская Л. Б. Исследование геоэкозащитной способности цементного клинкера и некоторых техногенных гидросиликатов / Л. Б. Сватовская, М. М. Байдарашвили, А. С. Сахарова // Естественные и технические науки. – 2012. – № 5 (61). – С. 250–252.

7. Сватовская Л. Б. Инженерно-химические подходы к детоксикации литосферы с помощью минеральных геоантидотов сульфато-кальциевой природы / Л. Б. Сватовская, М. В. Шершнева, М. М. Байдарашвили, А. М. Сычева, М. Ю. Савельева // Естественные и технические науки. – 2012. – № 5 (61). – С. 253–254.

8. Сватовская Л. Б. Естественнонаучный аспект природы минеральных геоантидотов (МГА) / Л. Б. Сватовская, М. В. Шершнева, А. М. Сычева, Е. И. Макарова, М. М. Байдарашвили // Естественные и технические науки. – 2012. – № 5 (61). – С. 255–258.

9. Стоянович Г. М. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна при повышенной вибродинамической нагрузке в упругопластической стадии работы грунтов : дис. ... д-ра техн. наук, специальность : 05.22.06 / Г. М. Стоянович. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2002. – 360 с.

10. Парамонов В. Н. Расчет оснований зданий и сооружений в физически и геометрически нелинейной постановке : дис. ... д-ра техн. наук, специальность : 05.23.17 / В. Н. Парамонов. – СПб. : Изд-во СПбГАСУ, 1998. – 377 с.

11. Парамонов В. Н. Метод конечных элементов при решении нелинейных задач геотехники : монография / В. Н. Парамонов. – СПб. : Изд-во Группа компаний «Геореконструкция», 2012. – 262 с. – (Сер. «Достижения современной геотехники»).

12. Парамонов В. Н. Численное моделирование задач геотехники : учеб. пособие / В. Н. Парамонов. – СПб. : ПГУПС, 2014. – 58 с.

13. Paramonov V.N. Calculations of thermal stabilization of transport embankments and their bases / V.N. Paramonov, I.I. Sakharov // Procedia Engineering. – 2017. – P. 472–477.

References

1. Svatovskaya L. B., Baidarashvily M. M., Shershneva M. V., Sycheva A. M., Khitrov A. V., Babak N. A., Makarova E. I., Surkov V. N., Kabanov A. A., Knyazev A. E., Khammady M. & Savelyeva M. Y. *Noviye metody geoekozashchity prirodno-tekhnogennykh sistem stroitelnoy deyatel'nosti v interesakh ustoichivogo razvitiya* [New methods of geoecological protection of natural anthropogenic systems in the building sector for sustainable development]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, 72 p. (In Russian)

2. Svatovskaya L. B. Geoekologicheskiye svoystva i metody geoekozashchity v transportnom stroitel'stve [Geoecological properties and methods of protection in transport building]. *Transportnoye stroitel'stvo* [Transport construction], 2014, no. 10, pp. 28–30. (In Russian)

3. Svatovskaya L. B., Shershneva M. V., Sakharova A. S., Baidarashvily M. M., Efimova N. N. & Stepanova I. V. *Otsenka kachestva geoekozashchitnykh tekhnologicheskikh resheniy na ob'yektakh*

zhelezнодорожного транспорта [Quality assessment of geoeological protection technological concepts at railway facilities]. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti* [Technosphere safety technologies], 2014, no. 2 (54), 34 p. (In Russian)

4. Svatovskaya L. B., Baidarashvily M. M., Makarova E. I., Shershneva M. V., Sycheva A. M. & Kabanov A. A. Novoye geoeozashchitnoye svoystvo stroitel'nykh materialov i izdeliy [A new geoeological property of building materials and products]. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti* [Technosphere safety technologies], 2014, no. 1 (53), 36 p. (In Russian)

5. Svatovskaya L. B., Sakharova A. S., Baidarashvily M. M., Petryayev A. V., Shershneva M. V. & Ganchits V. V. *Noviye geoeozashchitniye tekhnologii pry stroitel'stve i rekonstruktsii zheleznikh dorog* [New geoeological protective technologies for railroad building and reconstruction]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2012, 80 p. (In Russian)

6. Svatovskaya L. B., Baidarashvily M. M. & Sakharova A. S. Issledovaniye geoeozashchitnoy sposobnosti tsementnogo klinkera i nekotorykh tekhnogennykh gidrosilikatov [The study of geoeological capability of cement clinker and some anthropogenic hydrated silicates]. *Yestestvenniye i tekhnicheskiye nauki* [Natural and engineering sciences], 2012, no. 5 (61), pp. 250–252. (In Russian)

7. Svatovskaya L. B., Shershneva M. V., Baidarashvily M. M., Sycheva A. M. & Savelyeva M. Y. Inzhenerno-khimicheskiye podkhody k detoksikatsii litosfery s pomoshchyu mineralnykh geoantodotov sulfato-kaltsiyevoy prirody [Engineering and chemical approaches to lithosphere detoxification by means of mineral geological antidotes of sulfate calcic nature]. *Yestestvenniye i tekhnicheskiye nauki* [Natural and engineering sciences], 2012, no. 5 (61), pp. 253–254. (In Russian)

8. Svatovskaya L. B., Shershneva M. V., Sycheva A. M., Makarova E. I. & Baidarashvily M. M. Yestestvennonauchniy aspekt prirody mineralnykh geoantidotov (MGA) [The nature of mineral geological antidotes (MGA): natural and scientific aspects]. *Yestestvenniye i tekhnicheskiye nauki* [Natural and engineering sciences], 2012, no. 5 (61), pp. 255–258. (In Russian)

9. Stoyanovich G. M. *Prochnost i deformativnost zhelezнодорожного zemlyanogo polotna pry povyshennoy vibrodinamicheskoy nagruzke v uprugoplasticheskoy stadii raboty gruntov* [Strength and deformation property of railway roadbed under increased vibrodynamic load in elastoplastic operating stage of soil]: diss. ...D. Eng. Sci., speciality: 05.22.06. Khabarovsk, DVGUPS Publ., 2002, 360 p. (In Russian)

10. Paramonov V. N. *Raschet osnovaniy zdaniy i sooruzheniy v fizichesky i geometrichesky nelineinoy postanovke* [Foundation analysis of buildings and constructions in physically and geometrically non-linear setting]: dis. ...D. Eng. Sci., specialty: 05.23.17. Saint Petersburg, SPbGASU Publ., 1998, 377 p. (In Russian)

11. Paramonov V. N. *Metod konechnykh elementov pry reshenii nelineynykh zadach geotekhniki* [Finite-element method for the solution of geotechnical non-linear tasks]. Saint Petersburg, "Georekonstruktsiya" Group of Companies Publ., 2012, 262 p. Ser. "Achievements of modern geotechnics". (In Russian)

12. Paramonov V. N. Chislennoye modelirovaniye zadach geotekhniki [Numerical simulation of geotechnics tasks]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, 58 p. (In Russian)

13. Paramonov V. N. & Sakharov I. I. Calculations of thermal stabilization of transport embankments and their bases. *Procedia Engineering*, 2017, pp. 472–477. (In Russian)

КОЗЛОВ Иван Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, kozlovi.s@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.424.3: 629.4.027

В. А. Кручек, А. В. Грищенко, В. В. Грачев**ПРОЦЕСС УСТОЙЧИВОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СИЛЫ ТЯГИ ЛОКОМОТИВОВ
С ГРУППОВЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ КОЛЕСНЫХ ПАР**

Дата поступления: 06.09.2018

Решение о публикации: 17.10.2018

Аннотация

Цель: Изучение и анализ процесса передачи энергии в тяговом приводе тепловоза при различных схемах соединения колесных движителей и преобразователей момента. Выбор рациональных способов передачи энергии в приводе по критерию его энергетических показателей. Исследование совместной работы двигателя, преобразователя момента и колесного движителя тепловоза в установившихся и переходных режимах с целью более полного использования их энергетических возможностей составляет основную задачу предлагаемой работы. **Методы:** Теоретический анализ выполнен на основе комплексного применения методов теории колебаний, теории автоматического регулирования и теории тяги поездов. Его данные сравнивались с результатами экспериментов на Октябрьской железной дороге и стендовых установках в лабораториях ПГУПС, Людиновского теплопроизводительного и Великолукского тепловозоремонтного заводов, ВНИКТИ и других организаций. **Результаты:** Определены динамические и энергетические характеристики замкнутых механических систем типа спаренные колесные пары–рельс с одним типовым двигателем. На основе общей теории синхронизации динамических систем и современных представлений о взаимодействии колеса и рельса разработана теория качения спаренных колесных пар, рассмотрен процесс реализации силы тяги на пределе сцепления колеса с рельсом и циркуляции энергии при высоких скоростях движения. Обоснована энергетическая эффективность работы группового тягового привода в зоне ограничения силы тяги по сцеплению колес с рельсами. Показано, что процесс реализации силы тяги группового привода на пределе сцепления всегда сопровождается устойчивыми релаксационными автоколебаниями спаренных колесных пар, позволяющих более полно реализовывать энергетические возможности экипажа и силовых установок. **Практическая значимость:** Описанные в работе способы передачи энергии в тяговом приводе с использованием параллельной работы колесных движителей, преобразователей момента дают возможность решить проблему выбора наиболее рациональной схемы тягового привода тепловоза по энергетическим показателям. Полученные результаты применимы при проектировании новых и построенных локомотивов.

Ключевые слова: Тепловоз, групповой тяговый привод, индивидуальный тяговый привод, колесная пара, динамическая модель, коэффициент сцепления, тяговое усилие, тяговая характеристика, вращающий момент, тяговые свойства, синхронизирующий момент, боксование, устойчивое движение, процесс качения, циркуляция энергии.

Viktor A. Kruchek, D. Eng. Sci., professor, victor.kruchek@yandex.ru; **Aleksandr V. Grishchenko**, D. Eng. Sci., professor, grishenko_av@mail.ru; **Vladimir V. Grachev**, Cand. Eng. Sci., senior lecturer, v_grach@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) **PROCESS OF STEADY REALISATION OF TRACTION FORCE IN LOCOMOTIVES WITH GROUP-OPERATION PULLING DRIVE OF WHEEL PAIRS**

Summary

Objective: Study and analysis of the process of energy transfer in the diesel locomotive pulling drive under different schemata of connection between wheeled running gears and torque converters. Selection

of rational methods of energy transfer in pulling drive based on the criteria of its energy indices. Main task of this paper is a study of joint operation of the engine, torque converter and wheeled running gears of a diesel locomotive in steady and transient regimes for the purpose of fuller use of their energy capacities. **Methods:** Theoretical analysis is based on complex application of methods of oscillation theory, automatic control theory and hauling operations theory. Its data were compared to results of experiments conducted on the Oktyabrskaya Railway and ground testing facilities at the laboratories of the Petersburg State Transport University, Lyudinovo Diesel Locomotives Plant, Velikie Luki Locomotive Repair Plant, Research and Design Technology Institute of Rolling Stock and other organizations. **Results:** Dynamic and energy characteristics of closed mechanical systems of the coupled wheel pair and rail with one generic engine type were determined. On the basis of general theory of dynamic system synchronization and modern understanding of interactions between wheel and rail, a theory of rolling of coupled wheel pairs was developed, and the process of realisation of traction force at the limit of adhesion between wheel and rail and circulation of energy at high movement speed was considered. Energy efficiency of operation of group pulling drive in the zone of limitation of wheels and rails adhesion traction effort is justified. The process of realisation of traction effort of group operation at the limit of adhesion is shown to be always accompanied by stable relaxation oscillations of coupled wheel pairs which permit to realize energy capabilities of the vehicle and the power equipment more fully. **Practical importance:** Methods of transferring energy in pulling drive using parallel operation of wheeled running gears and torque converters, described in the paper, provide an opportunity of solving the problem of choosing the most rational schema for diesel locomotive's pulling drive based on energy indices. The results can be applied to designing new and already built locomotives.

Keywords: Diesel locomotive, group-operation pulling drive, individual pulling drive, wheel pair, dynamic model, adhesion coefficient, traction effort, traction performance, motor torque, haulage capacity, synchronizing torque, slippage, stable motion, rolling process, circulation of energy.

Введение

Задачей машиностроения является создание новых транспортных единиц, включая железнодорожный тяговый состав, с высокими мощностными и тяговыми свойствами. Обязательные требования для локомотивов – значительная эксплуатационная надежность и низкие материальные затраты на строительство, содержание и ремонт. Надежность и тяговые свойства транспортной машины определяются в первую очередь совершенством конструкции и высоким качеством изготовления отдельных узлов, а также рациональной компоновкой силовых агрегатов в энергетической цепи двигатель–тяговый привод [1]. Реализация максимальной силы тяги локомотивом возможна только на номинальном режиме работы силовой установки при безбуксовочной работе колесных пар тягового привода, т. е. полном использовании сцепной массы [2].

Большой парк современных железнодорожных транспортных средств, предназначенных для обслуживания участков с малоинтенсивным потоком пассажиров, ремонтно-восстановительных работ на железнодорожных участках, снегоуборочных работ и других нужд, а также для маневровой работы на путях производственных предприятий, имеют гидравлическую передачу мощности с групповым тяговым приводом колесных пар. На базе теоретических исследований и длительного опыта эксплуатации в России пассажирских, грузовых, маневровых тепловозов, дизельпоездов и строительно-дорожной техники с групповым тяговым приводом колесных пар были получены научные данные, позволяющие значительно уменьшить дополнительные энергетические затраты силовой установки, присущие исключительно групповому тяговому приводу колесных пар как замкнутым силовым схемам. Снижение этих потерь дает

возможность говорить о полноценной конкуренции группового тягового привода колесных пар для локомотивов индивидуальному.

Постановка цели и задач исследования

Изучение совместной работы силовой установки тепловоза, преобразователя момента и ведущих колесных пар в установившихся и переходных режимах с целью более полного применения энергетических возможностей составляет основную задачу при создании тягового привода новых серий железнодорожного тягового подвижного состава. Рассмотрение способов и схем передачи энергии в тяговом приводе с использованием параллельной работы колесных двигателей и преобразователей момента позволит решить проблему выбора рациональной схемы тягового привода колесных пар по наиболее важным критериям локомотива как энергетическим показателям силовой цепи [3, 4].

Очевидно, что теоретический анализ должен быть выполнен на основе комплексного применения методов теории колебаний, теории автоматического регулирования и теории тяги поездов [5, 6]. Получаемые данные по разработанной методике могут быть сравнены с уже имеющимися результатами и выводами экспериментов и опытов на Октябрьской, Прибалтийской (ныне Латышской) железных дорогах и стендовых установках в лабораториях ПГУПС, Людиновского тепловозостроительного и Великолукского тепловозоремонтного заводов, ВНИКТИ и других организаций, которые были ранее опубликованы.

На основе общей теории синхронизации динамических систем и современных представлений о взаимодействии колеса и рельса методика должна учитывать расширенное представление теории качения спаренных единым приводом колесных пар, а также рассматривать процесс реализации силы тяги на пределе сцепления колеса с рельсом с учетом циркуляции энергии в кинематической цепи группового тягового привода как на ма-

лых, так и на высоких скоростях движения [7]. Дальнейшим развитием методики обоснования выбора той или иной схемы конструктивного исполнения привода проектируемого локомотива с учетом его рода службы должно стать исследование работы группового тягового привода от одной и двух силовых установок локомотива [8].

Тяговый привод тепловоза представляет собой совокупность тепловозного дизеля, преобразователя момента, передаточного механизма и движущихся колесных пар [9]. Кроме полезной тяговой нагрузки при работе привода имеют место динамические составляющие, возникающие из-за колебаний элементов привода, вызванные кинематическим несовершенством его схемы, конструктивными и технологическими недостатками передачи, изменениями условий сцепления и колебаниями вертикальной осевой нагрузки колесной пары [10].

Колебания тягового момента привода могут вызвать изменение скорости и даже потерю устойчивости движения колесной пары – боксование, которое приводит к уменьшению силы тяги тепловоза, дополнительным потерям энергии, износа колеса и рельса, дополнительным нагрузкам на элементы привода от релаксационных крутильных колебаний и является вредным динамическим процессом при реализации колесной парой тягового момента. Поэтому один из вопросов, который необходимо исследовать, – это поиск возможности улучшения энергетических характеристик тепловоза за счет расширения области устойчивого без боксового движения колесной пары, что можно осуществить за счет понижения уровня внешнего воздействия на элементы привода, а также создания таких схем привода, динамические характеристики которых обеспечили бы более высокий запас устойчивости движения колесной пары. В многочисленных научных работах рассмотрены возможности повышения тяговых показателей тепловозов благодаря снижению динамических составляющих тягового момента (улучшению динамических качеств привода)

[5, 11, 12]. В этом смысле переход к приводу с рамной или комбинированной подвеской двигателя уменьшает влияние внешнего воздействия на привод и улучшает тяговые качества локомотива.

Проектированием, разработкой и испытанием новых высокоэффективных схем индивидуального тягового привода тепловоза с жесткими динамическими характеристиками генератора с асинхронными тяговыми двигателями успешно занимаются ВНИКТИ, ВНИИЖТ и другие организации. Такие схемы обеспечивают значительный запас устойчивости колесных пар при боксовании одной или нескольких лимитирующих колесных пар, что позволяет расширять зону устойчивой работы тепловоза.

Создание тягового подвижного состава с гидравлической или электрической передачей мощности и групповым тяговым приводом колесных пар с высокими тяговыми и энергетическими характеристиками возможно при наличии методики, учитывающей специфические конструктивные особенности формирования схем привода. Особенность силовых схем может заключаться и в том, что в качестве источника вращающего момента для группового привода колесных пар может быть применен или один тепловой, или один электрический двигатель, или два тепловых, или два электрических. Параллельная работа силовых установок в цепи замкнутого контура механически связанных колесных пар вызывает дополнительные нагрузки на элементы привода, что, естественно, снижает эффективный коэффициент полезного действия привода [6].

Для решения вопроса об эффективности применения группового тягового привода и зон его рационального использования для разных схем силовой трансмиссии группового тягового привода локомотива необходимо решать следующие задачи.

I. Одномоторный групповой тяговый привод:

1) разработать динамическую модель тягового привода локомотива и исследовать

процесс боксования колесных пар, а также обосновать условия, обеспечивающие расширение зоны устойчивой реализации силы тяги на пределе сцепления колес с рельсами;

2) определить возможности синтеза тягового привода по энергетическому критерию;

3) изучить процесс реализации силы тяги в тяговом приводе с учетом технологических и эксплуатационных погрешностей в конструкции привода и его взаимодействия с рельсовым путем;

4) рассмотреть процесс качения спаренных колесных пар при асимметрии тяговых нагрузок и неравных диаметров колес группового тягового привода;

5) установить эффективность энергетических показателей экипажей с групповым тяговым приводом колесных пар различных конструктивных исполнений в широком диапазоне скоростей движения от начала движения до конструкционной скорости.

II. Двухмоторный групповой тяговый привод:

1) исследовать процесс циркуляции энергии в энергетической цепи тягового привода тепловоза с двумя силовыми установками;

2) выявить влияние характеристик силовых установок на энергетические показатели экипажей;

3) изучить процесс синхронизации двух силовых установок в энергетической цепи тепловоза;

4) определить критерии выбора энергетических показателей с обоснованием схемы двухмоторного тягового привода.

Модель реализации силы тяги локомотивов с групповым тяговым приводом колесных пар

Процесс реализации силы тяги и условия устойчивости движения колесных пар в зоне ограничения силы тяги по сцеплению одномоторного тягового привода рассмотрим на примере локомотива с гидравлической передачей мощности и двухосным карданным группо-

вым приводом колесных пар, схема которого представлена на рис. 1 [13].

В расчетной модели (рис. 1) тяговый привод движется по железнодорожному пути, представляющему балку, лежащую на основании с продольной упругостью и линейной диссипацией с параметрами $\mathcal{J}_p$ и b_p . На рис. 2 показана динамическая модель схемы одномоторной силовой трансмиссии с гидравлической передачей мощности и двухосным групповым карданным тяговым приводом колесных пар.

Динамическая модель привода включает в себя два контура: I контур: дизель-гидро-насос (1) – гидротурбина (2) с гидравлической связью (c_3); II контур: турбина (2) – колесная пара (5) с упругой связью (c_4).

Для обоснования динамической модели достаточно воспользоваться проведенными ранее исследованиями более сложной системы, состоящей из 4-осного группового тягового привода колесных пар локомотива с двумя силовыми установками (рис. 3).

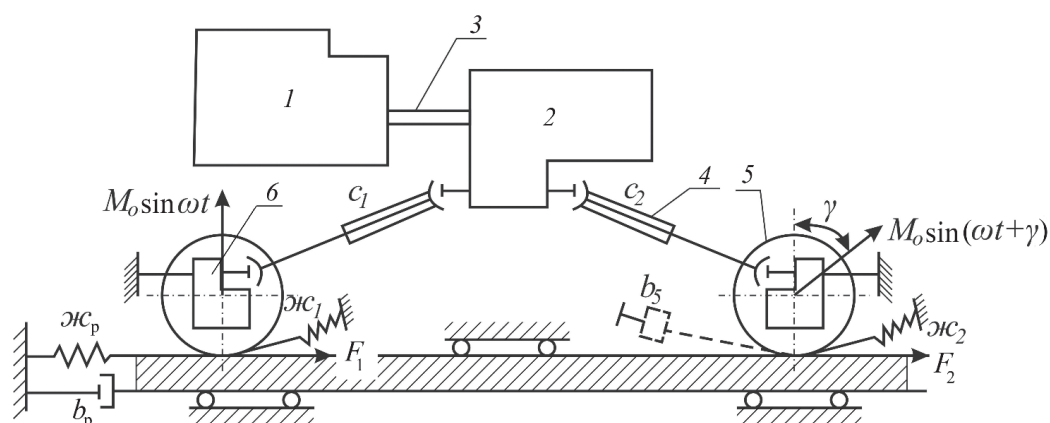


Рис. 1. Схема плоской силовой модели трансмиссии одномоторного локомотива с гидравлической передачей и двухосным групповым карданным тяговым приводом колесных пар: 1 – дизель; 2 – гидротурбина; 3 – упругая связь; 4 – карданный вал; 5 – колесная пара; 6 – осевой редуктор колесной пары; M_0 – момент сил упругости карданного вала от погрешностей элементов привода и пути; b , $\mathcal{J}$ – параметры упруго-диссипативной связи контакта колеса с рельсом и рельсового основания; γ – угол поворота колесной пары

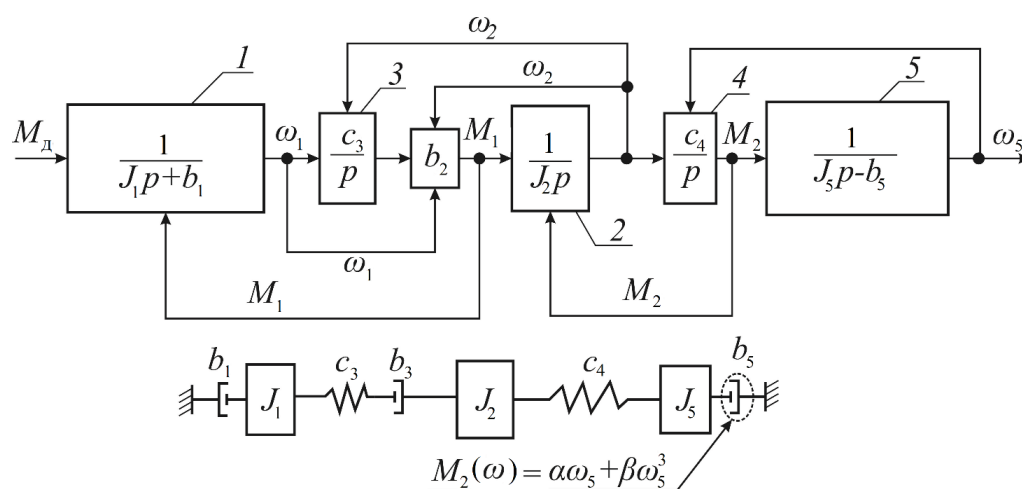


Рис. 2. Динамическая модель схемы одномоторной силовой трансмиссии с гидравлической передачей мощности и двухосным групповым карданным тяговым приводом колесных пар

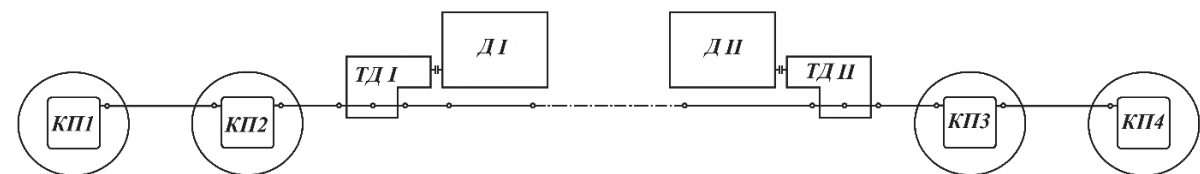


Рис. 3. Схема силовой трансмиссии 4-осного группового тягового привода локомотива с двумя силовыми установками

Движение данной системы описывается системой дифференциальных нелинейных уравнений второго порядка. Собственные частоты и формы колебаний схемы такого тягового привода на примере тепловоза ТГ16, представленные на рис. 4, рассчитаны в работе [12].

Близкие по величине и форме параметры были определены способом тензометрирования элементов трансмиссии тепловоза в режиме боксования колесных пар, что позволило идентифицировать реальную систему с разработанной динамической моделью. С помощью полученных результатов и их амплитудно-частотного анализа установлено, что в рассматриваемой системе наибольшее влияние на амплитуду, частоту и форму колебаний оказывают массы с большим «трением»: гидронасос гидропередачи (гидродвигатель) с гидродинамической (винтовой) характеристикой и колесная пара с упругим или относительным скольжением колес по рельсам.

Модель процесса реализации силы тяги локомотивов с групповым тяговым приводом колесных пар

Исследование системы нелинейных дифференциальных уравнений методами гармонической линеаризации показало, что частота крутильных колебаний I контура на два порядка ниже частоты колебаний II контура. Используя принцип разделения движения, можно при постоянной частоте вращения дизель-гидронасоса (ω_1) рассмотреть переходные процессы в контуре «турбина–упругий вал–колесная пара» (контур II). Опытные поездки дизель-поездов ДР1 и тепловозов ТГ102 с па-

раллельным двухосным тяговым приводом и тепловозов ТГМ3, ТГМ4, ТГМ6, имеющих 4-осный последовательно-параллельный карданный тяговый привод, позволяют определить область устойчивого движения колесных пар в зависимости от «жесткости» тяговой характеристики гидропередачи локомотива (рис. 5) [14].

Анализ тягового привода (двигатель–упругий карданный вал–колесная пара) с учетом нелинейной связи колеса с рельсом дает возможность получить условие для синтеза привода, обладающего «абсолютной» устойчивостью движения жесткого колесного движителя, которое можно представить в виде равенства

$$\frac{\partial M_{\text{дв}}}{\partial \omega} = \frac{\partial M_{\text{сц}}}{\partial \omega}.$$

Для определения границ понятия «абсолютного» устойчивого движения колесной пары в групповом тяговом приводе по рельсовой колее необходимы дополнительные исследования циркуляции энергии так называемого «блуждающего» момента, который присутствует в силовой трансмиссии замкнутых систем (системы и механизмы с избыточными связями), к которым относится групповой тяговый привод.

На рис. 6 представлена характеристика сил тяги двухосного группового тягового привода тепловоза в координатах $F = f(\omega)$ при устойчивом, на предельном по сцеплению движении и режиме боксования одной из колесных пар [13].

Участки 1–1 и 2–2 на рис. 6 отображают тяговую характеристику двигателя $F = f(\omega)$ для 1-й и 2-й колесных пар, а участок 1–2 отображает момент сил упругости соединительного вала, вызванный асимметрией торсионной

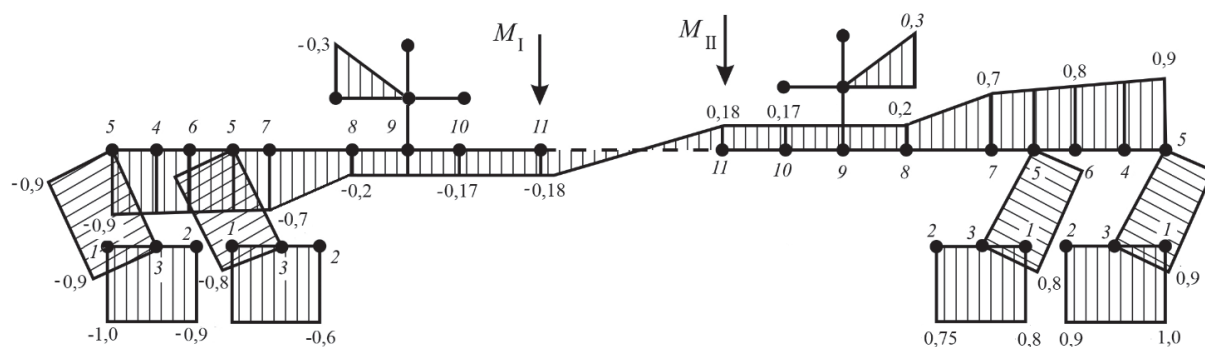


Рис. 4. Собственные частоты и формы колебаний расчетной схемы силовой трансмиссии 4-осного группового тягового привода колесных пар тепловоза: 1–11 – центры тяжести моментов инерции деталей и узлов силовой трансмиссии; M_1 , M_2 – вращающий момент соответственно 1-й и 2-й силовой установки локомотива

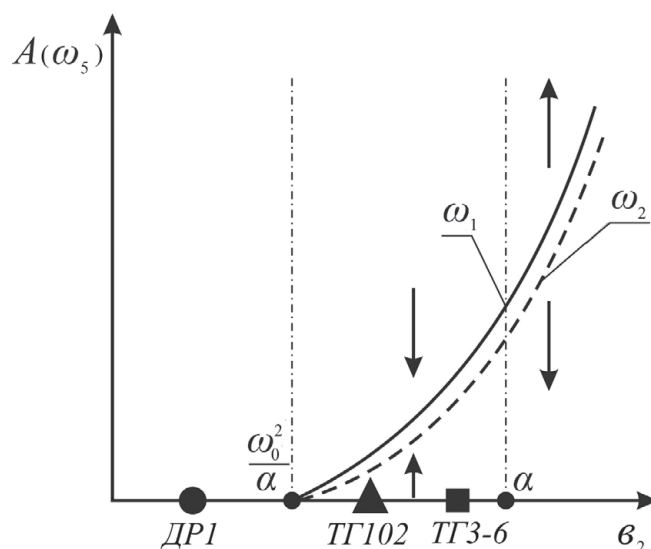


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики гидропередат тепловозов

и контактной жесткостей каждого ответвления группового привода. Очевидно, что на участке 1–2 выполняется указанное выше условие устойчивости движения механически спаренных колесных пар, т. е. $M_{дв} = M_{сц}$.

В представленной на рис. 3 схеме группового привода с «выносным» тяговым двигателем (ТД) жесткость карданного вала на два порядка ниже, чем контакта колеса с рельсом ($c \ll \mu$). Небоксующая колесная пара (2) является «заградителем» крутильных колебаний для выходного вала (турбины) гидропередачи (двигателя) (ТД1). Процесс боксования может быть отображен простой динамической системой: эквивалентное колесо–упругий вал с «заделкой».

Тогда решение уравнения движения колесной пары при $M_{дв} = M_{сц}$ будет иметь вид

$$\varphi_1 = \frac{1}{2} \varphi_0 (1 - \cos \omega_0 t), \quad (1)$$

где $\varphi_0 = \frac{\Delta M}{C}$; $\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{J}}$; C – приведенная к валу привода жесткость связей колеса с выходным валом турбины (ротором тягового двигателя) гидропередачи и рамой тележки; J – приведенный к валу привода момент инерции эквивалентного колеса и осевого редуктора; ΔM – момент сил упругости вала, вызванный асимметрией торсионной или контактной жесткостью привода колесной пары.

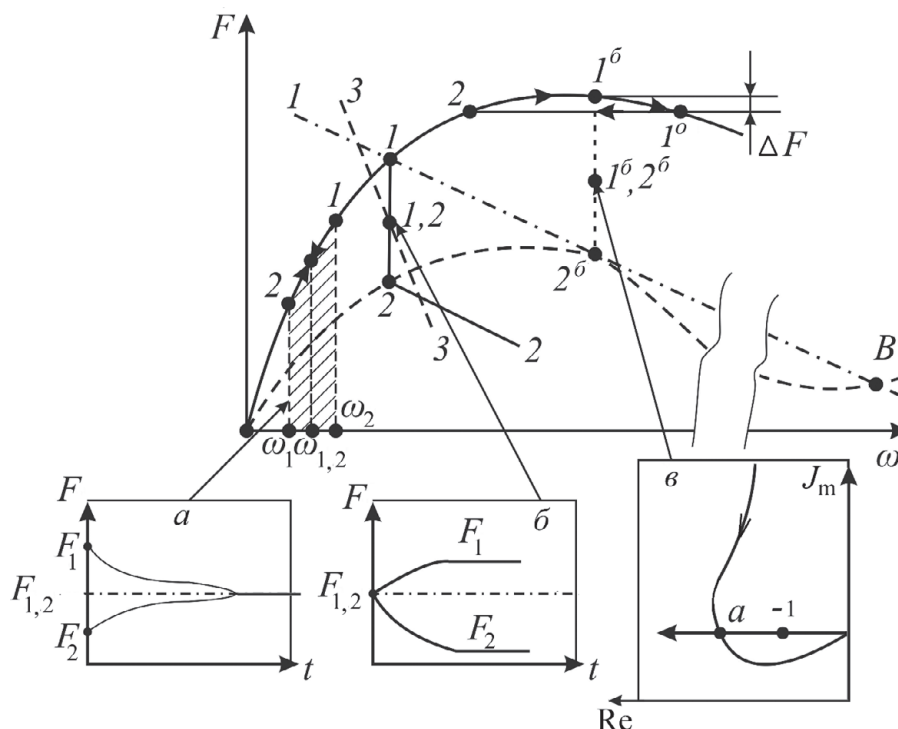


Рис. 6. Характеристика сил тяги колесных пар в процессе устойчивого движения и боксования одной из колесных пар двухосного группового тягового привода локомотива

Графическое отображение процесса боксования колесной пары группового привода в координатах $F = f(\omega)$ представлен на рис. 6. Точки $1''$ и $2''$ при $\omega = \omega_{\text{сн}}$ отображают состояние 1-й и 2-й колесных пар перед началом боксования.

Многочисленные исследования и эксперименты показали, что боксование колесной пары происходит с остановками в виде релаксационных автоколебаний [5, 8]. Причем при $\dot{\varphi}_1 = 0$ происходит восстановление сцепления боксующего колеса с рельсом (точка $1''$ на рис. 6), после чего наблюдается упругое скольжение колеса по восходящему участку кривой $F = f(\omega)$ (участок $2-1''$, рис. 6).

При $\dot{\varphi}_1 = 0$ и $\varphi_{\dot{\varphi}=0} = \varphi_0$ в рассмотренной замкнутой динамической системе $\Delta M_I = \Delta M_{II}$. Поэтому сила тяги 2-й колесной пары достигает своего предельного значения (точка 2) в момент, когда 1-я колесная пара восстановит контакт с рельсом (точка $1''$). Разносного боксования не будет, а процесс реализации силы тяги на пределе сцепления будет происходить в виде устойчивых обменных колебаний силы

тяги между 1-й и 2-й колесными парами. Суммарная сила тяги двухосным групповым приводом будет устойчиво реализована даже при потере сцепления одной колесной пары из двух, т. е. $\sum F_{1,2} = \text{const}$.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, представленные на рис. 7, отображают графические расчетные тяговые характеристики колесных пар группового привода, причем радиус круга катания 1-й колесной пары больше, чем 2-й ($\Delta R \rightarrow 1$ мм), а также формы типовых осциллограмм движения колесных пар на пределе сцепления без разносного боксования [15].

Анализ модели процесса реализации силы тяги локомотивов с групповым тяговым приводом колесных пар

На рис. 7 видно, что обе колесные пары движутся устойчиво в режиме противофазных автоколебаний, что возможно только при

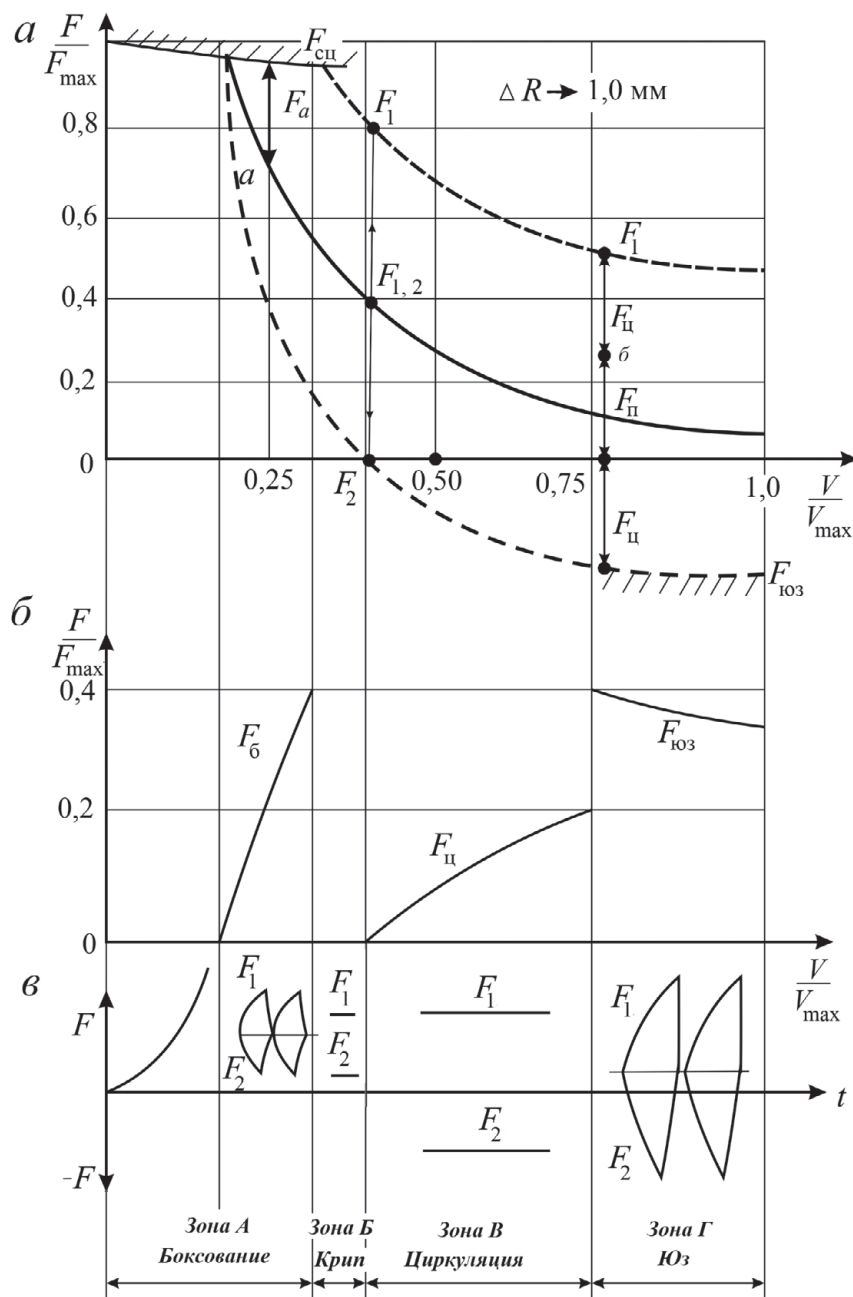


Рис. 7. Расчетные тяговые характеристики (а, б) и формы типовых осциллограмм (в) движения колесных пар двухосного группового привода на пределе сцепления при $\Delta R \rightarrow 1$ мм (объяснение в тексте)

условии, когда $M_{\text{дв}} = M_{\text{сц}}$ и система «псевдоконсервативна».

При движении двухосного железнодорожного экипажа по рельсовому пути в режиме тяги необходимо рассматривать колесные пары и рельс как единую динамическую систему, в которой общее несущее тело рельс, амортизированное упругими элементами (бал-

ластная призма), находится под воздействием двух возбудителей колебаний тягового усилия локомотива – колесных пар. Источниками возбуждения являются колебания силы тяги каждой колесной пары, возникающие как при движении, так и при их боксовании.

В групповом мономоторном электрическом приводе вибрация силы тяги двух колесных

пар передается через карданные валы на второе несущее тело – ротор тягового двигателя, имеющего диссипативно-упругую связь со статором. Известно, что в подобных динамических системах обнаруживается тенденция к самосинхронизации движения возбудителей, которая проявляется при качении колесных пар в стремлении к равным скоростям движения, а при крутильных колебаниях – избирательности устойчивой формы стационарных движений (синфазное или противофазное) [5].

Для исследования процесса самосинхронизации, в частности для определения устойчивости форм стационарных движений, применим предложенный И. И. Блехманом и Б. Г. Лавровым интегральный критерий

$$\Lambda = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi} L(t) dt, \quad (2)$$

в котором $L(t) = T - \Pi$ – функция Лагранжа для несущего тела, равная разности усредненных за период движения системы кинетической и потенциальной энергий несущего тела.

Необходимо, чтобы предложенная функция (2) достигала минимума.

В рассматриваемой двухконтурной замкнутой системе процесс синхронизации наиболее активен в контуре II: ротор тягового двигателя (несущее тело) и колесная пара, упруго связанные через карданный вал с ротором двигателя (вибратором). Колебания вращающего момента каждой колесной пары вызваны кинематическими погрешностями связей колеса с рельсом и рамой тележки и происходят с различной фазовой ориентацией (угол γ). Поэтому запишем общее уравнение движения для системы (см. рис. 1) в виде

$$J_1 \ddot{\alpha} + b \dot{\alpha} + c_1 \alpha = M_0 [\sin \omega_b t + \sin(\omega_b t + \gamma)], \quad (3)$$

где α – угловое перемещение ротора; J_1 – приведенный момент инерции ротора; b – коэффициент диссипативной связи ротора со статором; c_1 – коэффициент упругой связи ротора со статором; M_0 – момент сил упругости

карданного вала с погрешностями элементов привода и пути.

После решения уравнения (3) и нахождения кинетической и потенциальной энергии движения ротора определяем функцию Лагранжа за цикл периодического движения. Для рассматриваемой системы (см. рис. 1) в зоне устойчивого движения колесной пары, удаленной от резонанса, имеем

$$\Lambda = -\frac{M_0^2}{c_1} \frac{1}{1-\lambda^2} \cos \gamma,$$

где $\lambda = \frac{\omega_b}{\omega_0}$, ω_b , ω_0 – частота соответственно вынужденных и свободных крутильных колебаний привода.

В резонансной зоне движения получим

$$\Lambda = \frac{M_0^2}{c} \left(1 + \frac{1}{\mu} \right) \cos \gamma,$$

здесь μ – относительный коэффициент диссипативной связи ротора со статором.

Таким образом, функция указывает на возможность двух форм стационарных движений: при $\gamma = 0$ – синфазная (дорезонансная зона) и при $\gamma = \pi$ – противофазная (зарезонансная зона). В зоне резонанса собственные частоты колебаний элементов системы возможны только с противофазной формой. Эксперименты показали, что подобная динамическая ситуация имеет место при крутильных колебаниях, которые развиваются в системе при качении и буксовании двух спаренных колесных пар. Возмущающие воздействия каждого ответвления группового привода могут не совпадать по своей фазовой ориентации ни с одной из устойчивых форм стационарных крутильных колебаний. При синхронизации движений двух источников возмущений происходит передача энергии от одного источника вибрации к другому (циркуляция энергии). Вибрационный или синхронизирующий момент $\frac{d\Lambda}{d\gamma} = M_s$ является реакцией колебательной системы на динамическое состояние источника возмущения. В рассматриваемой

системе возбудители колебаний (вибраторы) связаны между собой упруго-диссипативной связью (соединительный вал–редуктор и колесо–рельс). Поэтому синхронизирующий момент проявляется через момент сил упругости соединительного вала и момент сил упругого или относительного скольжения в зоне контакта колеса и рельса.

Синхронизирующий момент M_s может возникать как реакция системы на неравные частоты вращения при качении спаренных колесных пар из-за неравных торсионных или контактных жесткостей связей колеса с двигателем и рельсом. В этом случае синхронизирующий момент определяется из зависимости

$$M_s = \frac{kR^2}{V}(U_1 - U_2),$$

где k – коэффициент крипа; U_1, U_2 – скорость относительного скольжения 1-й и 2-й колесной пары по рельсу соответственно; V – поступательная скорость движения экипажа.

Рассмотрим движение двух спаренных колесных пар на плоской расчетной схеме экипажа (см. рис. 1) для трех случаев, когда

$$a) c_1 \neq c_2, \mathcal{K}_1 = \mathcal{K}_2, R_1 = R_2,$$

$$б) c_1 = c_2, \mathcal{K}_1 \neq \mathcal{K}_2, R_1 = R_2,$$

$$в) c_1 = c_2, \mathcal{K}_1 = \mathcal{K}_2, R_1 \neq R_2,$$

где c_1, c_2 – торсионная жесткость карданных валов; $\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2$ – приведенная к валу привода жесткость контакта соответствующего колеса с рельсом; R_1, R_2 – усредненный радиус по кругу катания соответственно 1-й и 2-й колесной пары.

В расчетной схеме на рис. 1 приняты следующие допущения:

а) колесная пара заменена эквивалентным колесом, имеющим те же диаметр и момент инерции, что и действительные колеса;

б) связь колеса с рельсом отображается линейной зависимостью $F = k \frac{U}{V}$;

в) рама тележки, агрегаты и детали экипажа абсолютно жесткие.

Для случая а) силы тяги колес не равны между собой, т. е. $F_1 \neq F_2$, а синхронизирующий момент $M_s = \Delta F \cdot R$ раскручивает соеди-

нительный вал между колесами от его первоначального состояния до выравнивания сил тяги $F_1 = F_2$, как показано на рис. 6, а.

Для случая б) синхронизирующий момент также имеет вид $M_s = \Delta F \cdot R$. Под действием синхронизирующего момента происходят скручивание соединительного вала и перераспределение тяговых нагрузок $F_1 \neq F_2$, как показано на рис. 6, б.

Процесс выравнивания и перераспределения тяговых нагрузок отображается экспоненциальной зависимостью

$$\Delta F_{1,2} = \pm F_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (4)$$

$$\text{где } T = \frac{k \cdot R}{\omega_k \cdot c}; \quad F_0 = \frac{M_s}{2R}.$$

Для случая в) величина синхронизирующего момента определяется из уравнения $M_s = k \cdot \Delta R$.

$$\text{Тогда } F_s = \frac{k \cdot \Delta R}{R} = F_1 - F_2.$$

В зависимости от скорости движения локомотива с групповым тяговым приводом колесных пар и неравными диаметрами кругов катания синхронизирующий момент проявляется в различных формах, которые также можно проиллюстрировать на рис. 7.

А. Зона «боксования», где имеется ограничение силы тяги по сцеплению. Оба колеса находятся в тяговом режиме $F_1 = k \frac{\Delta R}{2R} > F_{\text{сц}}$.

Синхронизация частоты вращения осуществляется за счет относительного скольжения колеса большего диаметра.

Б. Зона «крипа», где $0 < F_1 < F_{\text{сц}}$, $F_{\text{сц}} > F_2 > 0$. Синхронизация проводится благодаря упругому скольжению колесных пар. Оба колеса находятся в тяговом режиме.

В. Зона «циркуляции» энергии, в которой $0 < F_1 < F_{\text{сц}}$, $F_{\text{юз}} > F_2 < 0$. Колесо с меньшим диаметром находится в «тормозном» режиме, а колесо с большим диаметром – в тяговом. Синхронизация осуществляется из-за упру-

гого скольжения колеса меньшего диаметра в направлении, обратном направлению качения колеса.

Г. Зона «юз», где $0 < F_1 < F_{\text{сц}}, 0 > F_2 \geq F_{\text{юз}}$. Колесо с меньшим диаметром находится в тормозном режиме. Отрицательная сила тяги достигает предела сцепления (юза). Синхронизация частоты вращения происходит за счет относительного проскальзывания колеса с малым диаметром в направлении, обратном качению колеса.

Отметим, что процесс движения спаренных колесных пар с неравными диаметрами имеет следующие периоды:

1) упругое скольжение – перераспределение тяговых нагрузок по колесным парам происходит за счет скручивания соединительного вала на величину $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ по экспоненциальной зависимости (4) с постоянной по времени $T = \frac{k \cdot R}{\omega_k \cdot c}$;

2) относительное скольжение (боксование) – в процессе перераспределения нагрузки по колесам могут достигнуть предельных значений силы тяги по сцеплению колеса с рельсом (боксование или юз). При этом колесо большего диаметра достигает предела сцепления в режиме тяги, а колесо малого диаметра – в режиме торможения. И в том, и в другом случае произойдет относительное скольжение колеса по рельсу (боксование). Движение боксующего колеса будет отображаться уравнением (1), где $\varphi_0 = k \frac{\Delta R}{c}$. При $\dot{\varphi} = 0$ ($\varphi = \varphi_{\text{max}}$) восстановится сцепление боксующего колеса с рельсом и начнется процесс перераспределения тяговых нагрузок с последующим повторным срывом сцепления. Такие колебания принято называть релаксационными автоколебаниями.

Полный цикл периодических движений равен

$$T = t_1 + t_2,$$

где t_1 определяется из уравнения (4); t_2 – из уравнения (1).

Тогда амплитуды автоколебаний колесных пар, показанные на рис. 7, можно найти следующим образом:

$$\Delta F_a = F_{\text{сц}} - F_a, \Delta F_6 = F_{\text{сц}} - F_v.$$

По мере увеличения силы тяги $\Delta F_6 = 0$ и тяговые показатели двухосного экипажа даже при неравных диаметрах по кругу катания ($R_1 \neq R_2$) реализуются полностью, т.е. $\sum F = 2F_{\text{сц}}$.

На значительных скоростях движения возможно боксование колеса малого диаметра, вызванного «юзом», при этом амплитуда автоколебаний $\Delta F_{\text{юз}} = F_{\text{юз}} + F_v$ изменяется незначительно. Для точки б на рис. 6 она равна $\Delta F_{\text{юз}}^6 = F_{\text{юз}} + F_6$. Так как $\Delta F_{\text{юз}}$ не может быть равно нулю, потому именно на больших скоростях движения имеют место максимальные износы рельса и колеса. При этом выравнивание диаметров колес не происходит.

Допустимая разница в диаметрах спаренных колесных пар по критерию динамической напряженности элементов привода может быть определена из условия

$$\Delta R = \frac{F_{\text{юз}} + F_{v_{\text{max}}}}{k} \cdot R.$$

Заключение

Подведем некоторые итоги. Анализ теоретических исследований, имеющийся опыт эксплуатационной работы и научных испытаний локомотивов с гидравлическими тяговыми передачами мощности показывают, что в таких системах четко проявляются псевдоконсервативные свойства и тенденции к синхронизации работы всех составных звеньев энергетической цепи тягового привода колесных пар, которые объясняют ряд особенностей динамического и энергетического состояний подобных систем:

1) расширение диапазона устойчивого состояния динамической системы в зоне предельных значений ее параметров;

2) избирательность устойчивой формы стационарного движения при квазигармонических колебательных процессах;

3) стремление к единому ритму движения элементов замкнутого контура и возможность появления циркуляции энергии от более сильного энергетического элемента к более слабому.

Для энергетической цепи одномоторного тягового привода локомотива сделаны и установлены следующие выводы и закономерности:

1. Представленная на рис. 6 характеристика сил тяги колесных пар группового привода является существенно нелинейной в отличие от характеристики индивидуального привода и определяет ряд особенностей динамического поведения системы:

- возможность появления автоколебаний, что обеспечивает устойчивое динамическое состояние системы даже при наличии в системе «отрицательного» трения, в то время как система с «линейной» характеристикой двигателя является неустойчивой (см. рис. 6, в);

- увеличение динамических нагрузок в групповом приводе по сравнению с индивидуальным, так как линеаризованная тяговая характеристика $F_{\text{дв}} = f(\omega)$ имеет большую крутизну, чем при индивидуальном приводе (участок 3–3 на рис. 6), т. е. амплитудно-частотный анализ системы показывает, что в системе «двигатель–упругий вал–колесо» рост крутизны характеристики $F = f(\omega)$ способствует повышению уровня динамических нагрузок.

2. Обоснована энергетическая эффективность работы группового тягового привода в зоне ограничения силы тяги по сцеплению колес с рельсами. Показано, что процесс реализации силы тяги группового привода на пределе сцепления всегда сопровождается устойчивыми релаксационными автоколебаниями спаренных колесных пар, позволяющими более полно реализовывать энергетические возможности экипажа и силовых установок.

3. В зоне ограничения силы тяги по сцеплению колеса с рельсом реализация крутя-

щего момента в групповом тяговом приводе колесных пар происходит с более высоким энергетическим показателем, чем в индивидуальном приводе: повышается коэффициент использования силы тяги и мощности силовой установки. Величина энергетического эффекта не постоянна и зависит от коэффициента неравномерности распределения силы тяги по колесным парам, коэффициента сцепления колеса с рельсом и коэффициента использования сцепной массы локомотива.

4. Реализация силы тяги на пределе сцепления сопровождается обменными колебаниями силы тяги между спаренными колесными парами релаксационного типа. При этом динамические нагрузки, приходящиеся на пятно контакта колес с рельсами по условиям сцепления, находятся в пределах значений силы тяги и позволяют тяговые возможности экипажа реализовывать полностью.

5. Предложен обобщенный критерий для определения энергетических показателей проектируемых тепловозов с возможными технологическими погрешностями элементов группового тягового привода.

6. В зоне ограничения силы тяги по мощности силовой установки передача энергии в одномоторном приводе сопровождается появлением синхронизирующего момента и потерей энергии на избыточное упругое проскальзывание колесных пар по рельсу, а также возникновением циркуляции энергии в приводе. С увеличением скорости движения отрицательные факторы растут, поэтому энергетические показатели экипажей с групповым приводом на высоких скоростях движения ниже, чем при индивидуальном приводе. Дополнительные потери зависят от величины суммарных технологических погрешностей элементов привода, которые приводят к неравномерности тяговых нагрузок по спаренным колесным парам.

7. Качение спаренных колесных пар неравного диаметра в тяговом приводе вызывает:

- боксование, представляющее обменные колебания силы тяги между колесными парами;

• циркуляцию энергии между колесными парами, при этом колесо малого диаметра движется в тормозном режиме (отрицательная сила тяги – юз) за счет энергии, передаваемой через соединительный вал от колеса большего диаметра.

8. Боксование колесных пар возможно в двух зонах скоростей движения экипажей:

• в зоне малых скоростей движения – под воздействием движущего момента, вызывая скольжение колеса большего диаметра в направлении его вращения. Амплитуда колебаний по мере приближения силы тяги к пределу сцепления постепенно уменьшается ($\Delta F_6 \rightarrow 0$), а частота возрастает. Энергетическая возможность экипажем используется полностью. Разница между диаметрами колес уменьшается;

• в зоне больших скоростей движения – под воздействием «тормозного» момента, приводящее к скольжению колеса малого диаметра в направлении, противоположном его вращению. Амплитуда колебаний выше значений силы тяги по условиям сцепления при юзе ($\Delta F_6 > \Delta F_{юз}$). Разница диаметров механически спаренных колес привода увеличивается. С появлением циркуляции энергии в приводе потери полезной мощности могут достигать 10% и выше от касательной силы тяги. Таким образом, этот режим движения по энергетическим возможностям экипажа не используется полностью и становится самым неблагоприятным.

Библиографический список

1. Фуфрянский Н. А. Развитие локомотивной тяги / Н. А. Фуфрянский, А. С. Нестрахов, А. Н. Долганов, Н. Н. Каменев, Э. А. Пахомов ; под ред. Н. А. Фуфрянского, А. Н. Бевзенко. – М. : Транспорт, 1982. – 303 с.
2. Кручек В. А. Расчет коэффициента тяги тепловоза с групповым приводом колесных пар / В. А. Кручек, Ф. Ф. Сабуров, А. Б. Удальцов // Тез. докл. Межев. сб. науч. статей «Повышение эффективности работы энергетической цепи тепловозов». – Хабаровск : Изд-во ХаБииЖТ, 1990. – С. 33–34.
3. Кручек В. А. Пути повышения энергетических возможностей транспортных средств с групповым тяговым приводом колесных пар / В. А. Кручек, С. Н. Шумов // Науч.-технич. сб. – Петродворец : Изд-во ВИ(ЖДВ)АВ матер.-технич. обеспечения им. генерала армии А. В. Хрулёва, 2016. – Вып. 32, ч. 2. – С. 79–84.
4. Сабуров Ф. Ф. Энергетика перспективного тягового привода / Ф. Ф. Сабуров, В. И. Бахолдин // Железнодорожный транспорт. – 1986. – № 5. – С. 36–38.
5. Бирюков И. В. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог / И. В. Бирюков, А. И. Беляев, Е. К. Рыбников. – М. : Транспорт, 1986. – 256 с.
6. Сабуров Ф. Ф. Особенности динамики группового привода тепловоза / Ф. Ф. Сабуров // Реф. журн. ВИНТИ. Железнодорожный транспорт. – 1975. – № 10. – Реф. 10Б. – С. 13–18.
7. Кручек В. А. Групповой карданный тяговый привод колесных пар железнодорожного подвижного состава : монография / В. А. Кручек. – СПб. : ПГУПС, 2002. – 139 с.
8. Сабуров Ф. Ф. Исследование устойчивости движения колесной пары в тяговом приводе тепловоза // Реф. журн. ВИНТИ. Железнодорожный транспорт. – 1975. – № 10. – Реф. 10Б. – С. 18–25.
9. Сабуров Ф. Ф. Вопросы синтеза тягового привода с оптимальными энергетическими показателями / Ф. Ф. Сабуров // Повышение эффективности работы тепловозов / под ред. Ф. Ф. Сабурова. – Л. : Изд-во ЛИИЖТ, 1986. – С. 35–42.
10. Кручек В. А. Исследование распределения тяговых нагрузок по колесным парам в групповом приводе тепловоза / В. А. Кручек, Ф. Ф. Сабуров, Г. И. Игнатенков // Повышение эффективности работы тепловозов / под ред. В. А. Кручека. – Л. : Изд-во ЛИИЖТ, 1983. – С. 95–103.
11. Кручек В. А. Повышение тяговых возможностей тепловозов и дизель-поездов / В. А. Кручек, А. Б. Удальцов // Сб. науч. трудов «Локомотивы и методы их эксплуатации» / под ред. В. В. Стрелкопытова. – СПб. : ПГУПС, 1997. – С. 57–63.
12. Сабуров Ф. Ф. Исследование автоколебаний валопровода гидромеханической трансмиссии тепловозов / Ф. Ф. Сабуров. – Л. : Изд-во ЛИИЖТ, 1970. – Вып. 294. – С. 78–88.

13. Сабуров Ф. Ф. Зоны эффективного использования тепловозов с групповым приводом колесных пар / Ф. Ф. Сабуров, В. И. Бахолдин // Создание локомотивов большой мощности и повышение их технического уровня / под ред. Ф. Ф. Сабурова. – Ворошиловград : Изд-во ВТСЗ, 1981. – Ч. 1. – С. 94–96.

14. Saburov F. Untersuchung der laufstabilität des radsatzes im kraftantrieb der diesellokomotive / F. Saburov, M. Ebner // Eisenbahntechnik. – 1977. – N 10 (25). – P. 406–408.

15. Кручек В. А. Энергетические показатели локомотива с мономоторным приводом при разных диаметрах колесных пар / В. А. Кручек, Ф. Ф. Сабуров, В. И. Бахолдин, Г. И. Игнатенков // Обеспечение эффективности и работоспособности подвижного состава / под ред. В. В. Стрекопытова. – Л. : Изд-во ЛИИЖТ, 1987. – С. 45–51.

References

1. Fufrianskii N. A., Nestrakhov A. S., Dolganov A. N., Kamenev N. N. & Pakhomov E. A. *Razvitie lokomotivnoi tiagi* [Development of locomotive traction]. Eds by N. A. Fufrianskii, A. N. Bevzenko. Moscow, Transport Publ., 1982, 303 p. (In Russian)

2. Kruchek V. A., Saburov F. F. & Udaltsov A. B. Raschet koeffitsienta tiagi teplovoza s gruppovym privodom kolesnykh par [Calculation of thrust co-efficient for a diesel locomotive with group-operation pulling drive]. *Paper abstracts of inter-univ. coll. of sci. articles "Povyshenie effektivnosti raboty energeticheskoi tsepi teplovozov"* [Increasing efficiency of operation of diesel locomotives' energy chain]. Khabarovsk, KhabII-ZhT Publ., 1990, pp. 33–34. (In Russian)

3. Kruchek V. A. & Shumov S. N. Puti povysheniia energeticheskikh vozmozhnostei transportnykh sredstv s gruppovym tiagovym privodom kolesnykh par [Methods of increasing energy capabilities of means of transport with group-operation pulling drive of wheel pairs]. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik* [Sci. and eng. coll.]. Petrodvorets, VI (ZhDV) AV mater.-tekhnich. obespecheniia im. generala armii A. V. Khruleva Publ., 2016, issue 32, pt 2, pp. 79–84. (In Russian)

4. Saburov F. F. & Bakholidin V. I. Energetika perspektivnogo tiagovogo privoda [Energy performance of advanced pulling drive]. *Zheleznodorozhnyi trans-*

port [Railway transport], 1986, no. 5, pp. 36–38. (In Russian)

5. Biriukov I. V., Beliaev A. I. & Rybnikov E. K. *Tiagovye peredachi elektropodvizhnogo sostava zheleznykh dorog* [Traction driving gears of electrically propelled railway vehicles]. Moscow, Transport Publ., 1986, 256 p. (In Russian)

6. Saburov F. F. Osobennosti dinamiki gruppovogo privoda teplovoza [Specific features of diesel locomotive's group operation dynamics]. *Ref. zhurn. VINITI. Zheleznodorozhnyi transport* [Abstract journal of the All-Union Institute for Scientific and Technical Information. Railway transport], 1975, no. 10, Abstr. 10B, pp. 13–18. (In Russian)

7. Kruchek V. A. *Gruppovoi kardannyi tiagovyi privod kolesnykh par zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Group cardan pulling drive of railway rolling stock wheel pairs]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2002, 139 p. (In Russian)

8. Saburov F. F. Issledovanie ustoichivosti dvizheniia kolesnoi pary v tiagovom privode teplovoza [Study of motion stability of wheel pair in diesel locomotive's pulling drive]. *Ref. zhurn. VINITI. Zheleznodorozhnyi transport* [Abstract journal of the All-Union Institute for Scientific and Technical Information. Railway transport], 1975, no. 10, Abstr. 10B, pp. 18–25. (In Russian)

9. Saburov F. F. Voprosy sinteza tiagovogo privoda s optimalnymi energeticheskimi pokazateliami [Problems of synthesis of pulling drive with optimal energy indicators]. *Povyshenie effektivnosti raboty teplovozov* [Increasing efficiency of diesel locomotives' operation]. Pod red. F. F. Saburova. Leningrad, LIIZhT Publ., 1986, pp. 35–42. (In Russian)

10. Kruchek V. A., Saburov F. F. & Ignatenkov G. I. Issledovanie raspredeleniia tiagovykh nagruzok po kolesnym param v gruppovom privode teplovoza [Study of distribution of traction loads by wheel pairs in diesel locomotive's group operation]. *Povyshenie effektivnosti raboty teplovozov* [Increasing efficiency of diesel locomotives' operation]. Pod red. V. A. Krucheka. Leningrad, LIIZhT Publ., 1983, pp. 95–103. (In Russian)

11. Kruchek V. A. & Udaltsov A. B. Povyshenie tiagovykh vozmozhnostei teplovozov i dizel-poezdov [Increasing traction capabilities of diesel locomotives and diesel trains. *Lokomotivy i metody ikh ekspluatatsii*

[*Locomotives and their operating methods*], coll. of sci. papers. Pod red. V. V. Strekopytova. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 1997, pp. 57–63. (In Russian)

12. Saburov F. F. *Issledovanie avtokolebanii valoprovoda gidromekhanicheskoi transmissii teplovozov* [Study of self-oscillations of hydro-mechanical transmission's shaft line]. Leningrad, LIIZhT Publ., 1970, issue 294, pp. 78–88. (In Russian)

13. Saburov F. F. & Bakholdin V. I. Zony effektivnogo ispolzovaniia teplovozov s gruppovym privodom kolesnykh par [Zones of efficient use of diesel locomotives with group operation of wheel pairs]. *Sozdanie lokomotivov bolshoi moshchnosti i povyshenie ikh tekhnicheskogo urovnia* [Design of high-capacity diesel locomotives and increasing their engineering level].

Pod red. F. F. Saburova. Voroshilovgrad, VTSZ Publ., 1981, pt 1, pp. 94–96. (In Russian)

14. Saburov F. & Ebner M. Untersuchung der laufstabilitat des radsatzes im kraftantrieb der diesellokomotive. *Eisenbahntechnik*, 1977, no. 10 (25), pp. 406–408. (In Germanian)

15. Kruchek V. A., Saburov F. F., Bakholdin V. I. & Ignatenkov G. I. Energeticheskie pokazateli lokomotiva s monomotornym privodom pri raznykh diametrakh kolesnykh par [Energy indicators of single power-worked lever locomotive with various diameters of wheel pairs]. *Obespechenie effektivnosti i rabotosposobnosti podvizhnogo sostava* [Securing efficiency and working capacity of rolling stock]. Pod red. V. V. Strekopytova. Leningrad, LIIZhT Publ., 1987, pp. 45–51. (In Russian)

*КРУЧЕК Виктор Александрович – д-р техн. наук, профессор, victor.kruchek/@yandex.ru; ГРИЩЕНКО Александр Васильевич – д-р техн. наук, профессор, grishenko_av@mail.ru; ГРАЧЕВ Владимир Васильевич – канд. техн. наук, доцент, v_grach@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).



УДК 69 (699.841)

З. А. Альдреби

ПОВЫШЕНИЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ И УСИЛЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АРХИТЕКТУРНЫХ ПАМЯТНИКОВ В СИРИИ С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Дата поступления: 04.08.2018

Решение о публикации: 06.11.2018

Аннотация

Цель: Повышение сейсмостойкости и усиление строительных конструкций памятников архитектуры в Сирии, которые пострадали от прошлых землетрясений и военных действий, с помощью инновационных композитных материалов. **Методы:** Для колонн и несущих стен из каменной кладки описаны методы усиления с помощью приклеивания холстов, полос и сеток из углеволокна к тем частям строительных конструкций, которые испытывают сжатие, растяжение, изгиб или динамические нагрузки. **Результаты:** Рассмотрены примеры расположения лент и сеток из композитных материалов при вертикальных и диагональных трещинах. Приведена методика расчета усиления конструкций композитными материалами. Опираясь на нее, были показаны наилучшие способы усиления строительных конструкций композитными материалами. **Практическая значимость:** Применение композитных материалов для усиления и повышения сейсмостойкости архитектурных памятников Сирии и других стран позволяет сохранить архитектурный облик и не нагружать конструкции. Предлагается внедрить такие материалы в строительную отрасль Сирии, так как они почти не используются в этой стране.

Ключевые слова: Композитные материалы, Сирия, архитектурные памятники, строительные конструкции, сейсмостойкость, колонна, несущая стена, трещина, усиление.

Ziad A. Aldrebi, postgraduate student, ziald67@gmail.com (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) INCREASING EARTHQUAKE RESISTANCE AND REINFORCING BUILDING STRUCTURES OF ARCHITECTURAL MONUMENTS IN SYRIA BY MODERN COMPOSITE MATERIALS

Summary

Objective: Increasing earthquake resistance and reinforcing building structures of Syria's architectural monuments damaged by past earthquakes and war by innovative composite materials. **Methods:** Methods of reinforcing columns and masonry-work bearing walls by attaching carbon fibre canvasses, bands and nets to the parts of buildings structures which experience compression, bending, stretching of dynamic loads are described. **Results:** Examples of locating bands and nets made of composite materials for vertical and horizontal fractures are considered. Method for calculation of reinforcing structures by composite materials is presented. On its basis, the best possible methods of reinforcing building structures by composite materials were shown. **Practical importance:** Application of composite materials for reinforcement and increasing earthquake resistance of architectural monuments in Syria and

other countries permits preserving architectural appearance and not overburden the building structures. Introduction of composite materials to Syria's construction industry is proposed, as they are hardly used there.

Keywords: Composite materials, Syria, architectural monuments, building structures, earthquake resistance, column, bearing wall, fracture, reinforcement.

Введение

Существуют традиционные и нетрадиционные способы усиления и повышения сейсмостойкости строительных конструкций. Под традиционными подразумевается инъектирование специальных растворов, использование дополнительных металлических и железобетонных рам, обойм и др. К нетрадиционным можно отнести внешнее армирование строительных конструкций зданий и сооружений композитными материалами, которые существуют в виде холстов, сеток и ламинатов, например, из углеволокна. Их применение позволяет улучшить сейсмостойкость и несущую способность конструкций [1].

Памятники архитектуры Сирии

К сожалению, современные композитные материалы редко или почти не используются в арабских странах. В частности, в Сирии актуальность темы связана с необходимостью их внедрения в строительную отрасль страны, так как памятники архитектуры в ней, такие как Великая мечеть Омейядов и Цитадель в г. Алеппо, Замок Крак де Шевалье в провинции Хомс, Амфитеатр в Пальмире и др., многие из которых находятся под защитой ЮНЕСКО, пострадали в результате землетрясений и военных действий, проводившихся на территории Сирии с 2011 г. [2, 3]. Поэтому необходимость их усиления и ремонта, чтобы сохранить для будущих поколений, является первоочередной задачей. Для этого предлагается применять современные композитные материалы, которые позволяют сохранить оригинальный архитектурный облик из-за небольшого веса и малой толщины, что, в свою очередь, дает возмож-

ность не нагружать дополнительно усиливаемые колонны или стены [4, 5].

Примеры усиления каменной кладки

Существуют различные способы усиления и повышения сейсмостойкости строительных конструкций с помощью холстов, ламинатов и сеток из композитных материалов. Возможно усиление как растянутых зон и приопорных участков в изгибаемых конструкциях, где действуют поперечные силы, так и сжатых и внецентренно-сжатых элементов [5–7]. Композитные материалы можно наклеить перпендикулярно к оси колонны с помощью специального эпоксидного клея, тем самым уменьшается поперечное деформирование в ней и увеличивается сопротивление вертикальным нагрузкам. А чтобы противостоять изгибающим моментам, нужно наклеить углеродные пластины по длине плоскости действия момента [6–8]. Усиление внецентренно-сжатых конструкций производится приклеиванием полос углеволокна к грани усиливаемого элемента, которые испытывают растяжение [5, 6], используя высокую прочность на растяжение композитного материала (таблица).

Одним из признаков повреждения каменной кладки является наличие трещин. Они появляются в силу различных причин таких как температурно-влажностные деформации, неравномерные осадки грунта, перегрузки строительных конструкций, землетрясения и др.; каменная кладка плохо работает на растяжение [5, 7, 9–11] и разрушается, когда растягивающие напряжения больше или равны допустимым:

$$\sigma_{\text{раст}} \geq [\sigma_{\text{раст}}].$$

Сравнение физико-механических характеристик углеволокна и стали

Материал	Модуль Юнга, E , ГПа	Предел прочности при растяжении, σ_r , МПа	Деформация при разрыве, ε_r , %	Удельный вес, ρ , г/см ³
Углеволокно (лента)	240–280	3500	1,6–1,73	1,75
Сетка из углеволокна 5×5 мм	230	3500	1,5–1,8	1,8
Сталь	206	250–400 (текучесть), 350–600 (разрыв)	20–30	7,8

Примеры усиления лентами и сетками из композитных материалов при вертикальных и наклонных трещинах показаны на рис. 1, ленты и сетки расположены перпендикулярно трещине или параллельно расположению растягивающих усилий, тем самым противостоят растяжению, против которого каменная кладка бессильна [7, 8, 12–14].

Численный расчет

Методов расчета усиления строительных конструкций композитными материалами

мало, поэтому численный расчет в статье будет базироваться на испытаниях, проведенных в ЦНИИСК имени В. А. Кучеренко, которые проходили в два этапа [1, 6, 8, 9, 14–16]. На первом этапе исследовалось поведение кирпичных колонн при разных схемах усиления углеволокном на действие статической нагрузки, а на втором на виброплатформе были выполнены динамические испытания кирпичных стен, усиленных углеволокном. После статических испытаний кирпичных колонн на сжатие и изгиб, которых усиливали полосами из углеволокна, оказалось, что увеличить несущую способность колонн можно в 2 раза, если сравнить с образцовым этало-

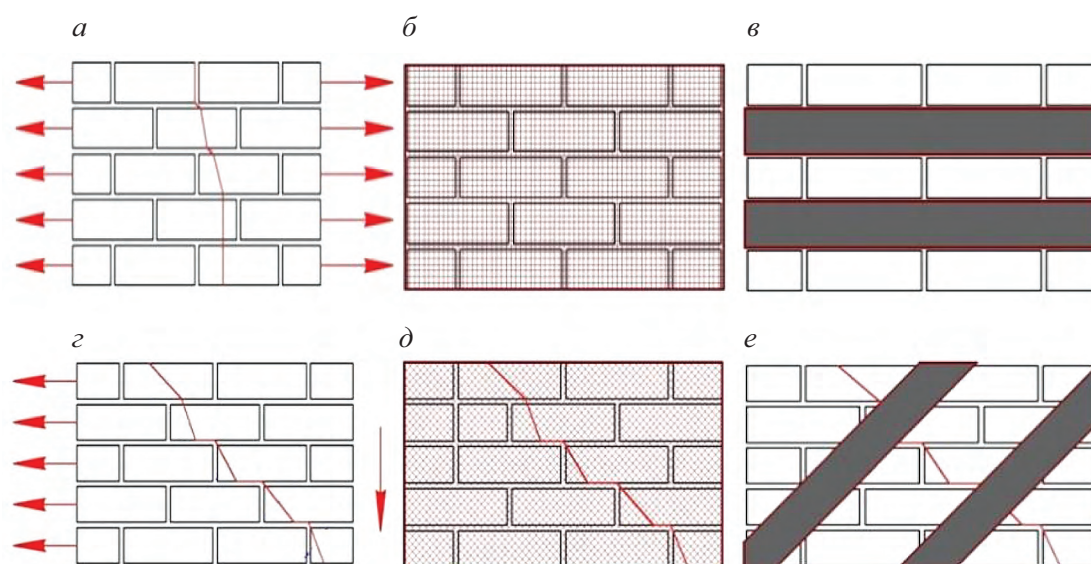


Рис. 1. Примеры расположения лент и сеток при трещинах: а – вертикальная трещина; б – усиление сетками при вертикальной трещине; в – усиление лентами при вертикальной трещине; г – диагональная трещина; д – усиление сетками при диагональной трещине; е – усиление лентами при диагональной трещине

ном. На рис. 2 приведены схемы усиления [1, 6, 8, 9, 14–16].

Расчет усиления строительных конструкций из каменной кладки с помощью лент и сеток из композитных материалов можно осуществить, прибавляя к расчетному сопротивлению кладки расчетное сопротивление композитного материала [1, 6, 10]:

$$R_{\text{арм}} = R + R_{\text{ус}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{арм}}$ – прочность усиленной армированием кладки; R – расчетное сопротивление кладки; $R_{\text{ус}}$ – расчетное сопротивление композитного материала, равное

$$R_{\text{ус}} = \frac{2 \cdot \mu_{\text{пов}} \cdot R_{\text{угл}}}{100}; \quad (2)$$

$\mu_{\text{пов}}$ – коэффициент поверхностного армирования

$$\mu_{\text{пов}} = \frac{S_{\text{арм}}}{S_{\text{ст}}} \cdot 100; \quad (3)$$

$R_{\text{угл}}$ – расчетное сопротивление углеволокна разрыву.

Анализируя результаты, полученные по формулам (1)–(3), можно прийти к выводу, что эффективность усиления зависит от типа усиливающего материала, его предела проч-

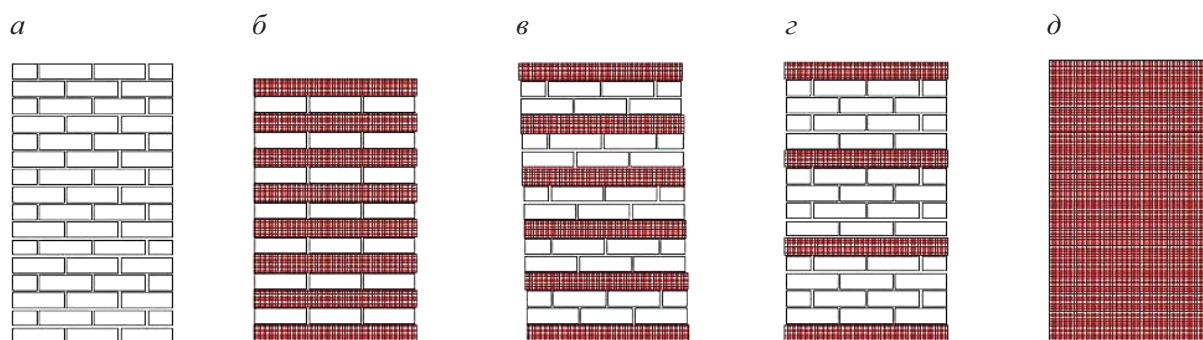


Рис. 2. Схемы усиления кирпичных столбов углеволокнистой сеткой при испытании на сжатие: а – эталонный образец без усиления; б–г – столб, усиленный полосами, наклеенными на кладку по высоте столба через один на второй ряд (б), через два ряда на третий (в) и через четыре ряда на пятый (г); д – столб, усиленный путем оборачивания образца целиком углеволокнистой тканью

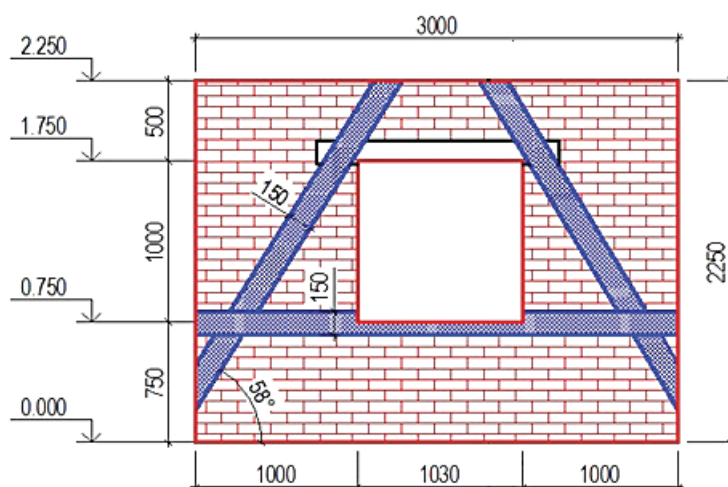


Рис. 3. Схема армирования кирпичной стены углеволокнистыми полосами при динамических испытаниях

ности на разрыв и схемы усиления [1, 6, 8, 9, 15, 16].

По результатам динамических испытаний было изучено поведение кирпичной кладки до и после усиления углеволокном во время действия динамических нагрузок, моделировавших сейсмические воздействия интенсивностью от 7 до 9 баллов по шкале Медведева–Шпонхойера–Карника. Было выявлено, что усиление кирпичных стен по схеме, показанной на рис. 3, рекомендуется для использования в районах, сейсмичность которых составляет до 9 баллов, при соблюдении требований по монтажу углеволокна, установленных производителем [1, 6, 8, 9, 15–18].

Все вышеуказанные расчеты и схемы армирования можно применять для усиления и повышения сейсмостойкости строительных конструкций памятников архитектуры Сирии, которые были построены из каменной кладки [2, 3].

Заключение

Сравнивая преимущества композитных материалов (например, сохранение оригинального облика зданий и сооружений, препятствие развитию трещин, высокая прочность на растяжение и изгиб, значительная стойкость против коррозии) и их недостатки (низкий показатель огнестойкости у эпоксидных клеев и большая стоимость материалов), можно прийти к выводу, что преимущества являются решающими для внедрения композитных материалов в строительную отрасль Сирии для усиления и ремонта памятников архитектуры, аутентичность которых надо сохранять, и открывают для российских и зарубежных производителей и продавцов таких материалов новое, почти неосвоенное направление рынка сбыта.

Библиографический список

1. Костенко А. Н. Прочность и деформативность центрально- и внецентренно-сжатых кирпичных

и железобетонных колонн, усиленных угле- и стекловолокном : автореф. дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.23.01 / А. Н. Костенко. – М. : ЦНИИСК имени В. А. Кучеренко, 2010. – 29 с.

2. Альдреби З. А. Мониторинг и паспортизация наиболее известных памятников архитектуры в Сирии / З. А. Альдреби // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2018. – Т. 15, вып. 2. – С. 302–310.

3. Белаш Т. А. Анализ повреждений памятников архитектуры Сирии, полученных в результате землетрясений и военных действий / Т. А. Белаш, З. А. Альдреби // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2016. – № 5. – С. 58–63.

4. Ehsani M. R. Seismic retrofit of URM walls with fiber composites / M. R. Ehsani, H. Saadatmanesh // The Masonry Society Journal. – 1996. – Vol. 14. – P. 63–72.

5. Bernat-Maso E. Construction experimental assessment of Textile Reinforced Sprayed Mortar strengthening system for brickwork wallties / E. Bernat-Maso, Ch. Escrig, Ch. A. Aranha, L. Gil // Building Materials. – 2013. – Issue 50. – P. 226–236.

6. Костенко А. Н. Прочность и деформативность центрально- и внецентренно-сжатых кирпичных и железобетонных колонн, усиленных угле- и стекловолокном : дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.23.01 / А. Н. Костенко. – М. : ЦНИИСК имени В. А. Кучеренко, 2010. – 243 с.

7. Старцев С. А. Усиление кирпичной кладки композитными материалами и винтовыми стержнями / С. А. Старцев, А. А. Сундукова // Строительство уникальных зданий и сооружений (СПб.). – 2014. – № 6 (21). – С. 17–31.

8. Гасиев А. А. Сейсмоусиление стен кирпичных зданий внешним армированием на основе углеволокнистой ткани : дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.23.01 / А. А. Гасиев. – М. : ЦНИИСК имени В. А. Кучеренко, 2015. – 196 с.

9. Грановский А. В. Применение углеволокнистой ткани для усиления стен из ячеистобетонных блоков в зданиях, возводимых в сейсмоопасных регионах / А. В. Грановский, Б. К. Джамуев // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – № 4. – С. 44–47.

10. СП 15.13330.2012. Каменные и армокаменные конструкции. – Актуализир. ред. СНиП II-22–

81* (с Изменениями № 1, 2). – М. : ЦНИИСК имени В. А. Кучеренко, 2012. – 99 с.

11. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. – Актуализир. ред. СНиП 2.01.07–85*. – М. : ЦНИИСК имени В. А. Кучеренко, 2016. – 107 с.

12. Бедов А. И. Проектирование, восстановление и усиление каменных и армокаменных конструкций : учеб. пособие для вузов / А. И. Бедов, А. И. Габитов. – М. : Изд-во АСВ, 2008. – 566 с.

13. Казачек В. Г. Обследование и испытания зданий и сооружений : учеб. пособие для вузов / В. Г. Казачек, Н. В. Нечаев, С. Н. Нотенко, А. Г. Ройтман и др. ; под ред. В. И. Римшина. – М. : Высшая школа, 2004. – 447 с.

14. Складнев Н. Н. Рекомендации по обследованию и оценке технического состояния крупнопанельных и каменных зданий / Н. Н. Складнев. – М. : ЦНИИСК имени В. А. Кучеренко, 1988. – 140 с.

15. Смирнов В. И. Экспериментальные исследования прочности и деформативности кирпичных стен и стен из ячеистого бетона, усиленного материалами фирмы BASF : науч.-технич. отчет / В. И. Смирнов, А. В. Грановский, Б. К. Джамуев. – М. : ЦНИИСК имени В. А. Кучеренко. – 2010. – 183 с.

16. Гасиев А. А. Сейсмоусиление стен кирпичных зданий внешним армированием на основе углеволокнутой ткани : автореф. дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.23.01 / А. А. Гасиев. – М. : ЦНИИСК имени В. А. Кучеренко, 2015. – 24 с.

17. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. – Актуализир. ред. СНиП II-7–81* «Строительство в сейсмических районах» и СП 14.13330.2011 «Строительство в сейсмических районах» (с Изменением № 1). – М. : ЦНИИСК имени В. А. Кучеренко, 2014. – 126 с.

18. СТО 2256-002–2011. Система внешнего армирования из полимерных композитов FibArm для ремонта и усиления строительных конструкций. – М. : ЗАО «Препрег-СКМ», 2011. – 12 с.

References

1. Kostenko A. N. *Prochnost i deformativnost tsentralno- i vnetsentrenno-szhatykh kirpichnykh i zhelezobetonnykh kolonn, usilennykh ugle- i steklovo-*

loknom [Strength and deformability of centrally and eccentrically compressed brick and reinforced-concrete columns reinforced by carbon and glass fibre]. Extended abstract of Cand. Eng. Sci. dissertation: 05.23.01. Moscow, TsNIISK imeni V.A. Kucherenko Publ., 2010, 29 p. (In Russian)

2. Aldrebi Z. A. Monitoring i pasportizatsiia naibolee izvestnykh pamiatnikov arkhitektury v Sirii [Monitoring and certification of Syria's best-known architectural monuments]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia [Petersburg Transport University Herald]*, 2018, vol. 15, issue 2, pp. 302–310. (In Russian)

3. Belash T. A. & Aldrebi Z. A. Analiz povrezhdenii pamiatnikov arkhitektury Sirii, poluchennykh v rezultate zemletriasenii i voennykh deistvii [Analysis of damage to Syria's architectural monuments caused by earthquakes and warfare]. *Seismostoitkie stroitelstvo. Bezopasnost sooruzhenii [Antiseismic construction. Structure safety]*, 2016, no. 5, pp. 58–63. (In Russian)

4. Ehsani M. R. & Saadatmanesh H. Seismic retrofit of URM walls with fiber composites. *The Masonry Society Journal*, 1996, vol. 14, pp. 63–72.

5. Bernat-Maso E., Escrig Ch., Aranha Ch. A. & Gil L. Construction experimental assessment of Textile Reinforced Sprayed Mortar strengthening system for brickwork wall. *Building Materials*, 2013, issue 50, pp. 226–236.

6. Kostenko A. N. *Prochnost i deformativnost tsentralno- i vnetsentrenno-szhatykh kirpichnykh i zhelezobetonnykh kolonn, usilennykh ugle- i steklovo-loknom [Strength and deformability of centrally and eccentrically compressed brick and reinforced-concrete columns reinforced by carbon and glass fibre]*. Extended abstract of Cand. Eng. Sci. dissertation: 05.23.01. Moscow, TsNIISK imeni V.A. Kucherenko Publ., 2010, 243 p. (In Russian)

7. Startsev S. A. & Sundukova A. A. Usilenie kirpichnoi kladki kompozitnymi materialami i vintovymi sterzhniami [Reinforcing brick work by composite materials and screw rods]. *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzhenii (SPb) [Construction of unique buildings and structures (Saint Petersburg)]*, 2014, no. 6 (21), pp. 17–31. (In Russian)

8. Gasiev A. A. *Seismousilenie sten kirpichnykh zdaniy vneshnim armirovaniem na osnove uglevoloknistoi tkani [Seismic retrofit of brick buildings' walls by*

external reinforcement on the basis of coal-fibre canvas]. Cand. Eng. Sci. dissertation: 05.23.01. Moscow, TsNIISK imeni V.A. Kucherenko Publ., 2015, 196 p. (In Russian)

9. Granovskii A. V. & Dzhamuev B. K. *Primenenie uglevoloknistoi tkani dlia usileniia sten iz iacheisto-betonnykh blokov v zdaniakh, vozvodimykh v seismoopasnykh regionakh* [Application of coal-fibre canvas for reinforcement of cellular-concrete block walls in buildings erected in earthquake-prone regions]. *Proyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo* [Industrial and civil construction], 2012, no. 4, pp. 44–47. (In Russian)

10. *Construction rules SP 15.13330.2012. Kamennye i armokamennye konstruksii* [Rock and reinforced masonry structures]. Revised edition of code of practice SNiP II-22–81* (with amendments no. 1, 2). Moscow, TsNIISK imeni V.A. Kucherenko Publ., 2012, 99 p. (In Russian)

11. *Construction rules SP 20.13330.2016. Nagruzki i vozdeistviia* [Loads and effects]. Revised edition of code of practice SNiP 2.01.07–85*. Moscow, TsNIISK imeni V.A. Kucherenko Publ., 2016, 107 p. (In Russian)

12. Bedov A. I. & Gabitov A. I. *Proektirovanie, vosstanovlenie i usilenie kamennykh i armokamennykh konstruksii* [Designing, restoring and reinforcing rock and reinforced masonry structures]. Moscow, ASV Publ., 2008, 566 p. (In Russian)

13. Kazachek V. G., Nechaev N. V., Notenko S. N., Roitman A. G. et al. *Obsledovanie i ispytaniia zdani i sooruzhenii* [Inspection and testing of buildings and structures]. Ed. by V. I. Rimshin. Moscow, Vysshiaia shkola Publ., 2004, 447 p. (In Russian)

14. Skladnev N. N. *Rekomendatsii po obsledovaniiu i otsenke tekhnicheskogo sostoiianiia krup-*

nopanelnykh i kamennykh zdanii [Recommendations on inspection and evaluation of the technical state of large-panel and stone buildings]. Moscow, TsNIISK imeni V.A. Kucherenko Publ., 1988, 140 p. (In Russian)

15. Smirnov V. I., Granovskii A. V. & Dzhamuev B. K. *Eksperimentalnye issledovaniia prochnosti i deformativnosti kirpichnykh sten i sten iz iacheistogo betona, usilennogo materialami firmy BASF* [Experimental studies of strength and deformability of brick and cellular concrete walls reinforced by BASF materials]. Sci. technical report. Moscow, TsNIISK imeni V.A. Kucherenko Publ., 2010, 183 p. (In Russian)

16. Gasiev A. A. *Seismousilenie sten kirpichnykh zdani vnesnim armirovaniem na osnove uglevoloknistoi tkani* [Seismic retrofit of brick buildings' walls by external reinforcement on the basis of coal-fibre canvas]. Extended abstract of Cand. Eng. Sci. dissertation: 05.23.01. Moscow, TsNIISK imeni V.A. Kucherenko Publ., 2015, 24 p. (In Russian)

17. *Construction rules 14.13330.2014. Stroitelstvo v seismicheskikh raionakh* [Construction in earthquake-prone areas]. Revised edition of code of practice SNiP II-7–81* and construction rules SP 14.13330.2011. *Stroitelstvo v seismicheskikh raionakh* [Construction in earthquake-prone areas] (with amendment no. 1). Moscow, TsNIISK imeni V.A. Kucherenko Publ., 2014, 126 p. (In Russian)

18. *Company standard STO 2256-002–2011. Sistema vneshnego armirovaniia iz polimernykh kompozitov FibArm dlia remonta i usileniia stroitelnykh konstruksii* [Polymer composite FibArm external reinforcement system for repair and reinforcement of building structures]. Moscow, ZAO “Prepreg-SKM” Publ., 2011, 12 p. (In Russian)

АЛЬДРЕБИ Зиад Ахмад – аспирант, ziald67@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 699.841

Т. А. Белаш, И. Б. Нудьга, А. Д. Яковлев**ЦУНАМИЗАЩИТА ЗДАНИЙ В СЕЙСМООПАСНЫХ РАЙОНАХ**

Дата поступления: 30.08.2018

Решение о публикации: 17.10.2018

Аннотация

Цель: Выбрать наиболее оптимальный с точки зрения надежности, экономичности и простоты реализации подход по повышению цунамизащиты зданий, а также предложить новое средство цунамизащиты и определить область его применимости. **Методы:** Были проанализированы существующие подходы по защите зданий от волн цунами, а также обобщены рекомендации по цунамистойкому строительству. **Результаты:** Исходя из мирового опыта и рекомендаций по цунамистойкому строительству, наиболее простым средством защиты зданий от цунами является организация свободного пространства под самим зданием. Также описан вариант цунамизащиты зданий, в котором малоэтажные здания располагаются на автомобильной эстакаде, за счет чего и создается свободное пространство под зданием. Выполненные расчетные исследования предложенного варианта показали возможность его использования в условиях 9-балльной сейсмической активности и при волнах цунами до 11 м. **Практическая значимость:** Строительство зданий на автомобильной эстакаде снизит число жертв при сильных цунами.

Ключевые слова: Цунами, цунамистойкость, цунамизащита, здания, автомобильная эстакада.

Tat'iana A. Belash, D. Eng. Sci., professor, department chair, belashta@mail.ru; **Igor' B. Nud'ga**, Cand. Eng. Sci., nudga.igor@mail.ru; ***Anton D. Iakovlev**, postgraduate student, anton.yakovlev.94@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) TSUNAMI PROTECTION OF BUILDINGS IN EARTHQUAKE-PRONE AREAS

Summary

Objective: To select the best possible approach to increasing tsunami protection of buildings from the point of view of safety, economic efficiency, and simplicity of implementation, as well as propose a new means of tsunami protection and determine the potential sphere of its application. **Methods:** Existing approaches to protection of buildings from tsunami waves were analysed, and recommendations concerning tsunami-resistant construction methods were summarized. **Results:** International experience and recommendations on tsunami-resistant construction methods suggest that the simplest method for protection of buildings from tsunami is organisation of empty space underneath the building itself. Additionally, a method of tsunami protection is described, in which low-rise buildings are placed on top of a motorway flyover which creates free space underneath. Calculated analysis of this proposed option indicated that it would be usable under conditions of earthquake activity with magnitude of up to nine and tsunami waves of up to 11 metres in height. **Practical importance:** Construction of buildings on top of a motorway flyover will reduce the number of victims of strong tsunamis.

Keywords: Tsunami, tsunami resistance, tsunami protection, buildings, motor flyover.

Значительная часть территории Российской Федерации подвержена различным опасным стихийным бедствиям – землетрясениям, наводнениям, оползням, цунами и др. В этих

районах проживают тысячи людей, ведется активное промышленное и гражданское строительство. Поэтому обеспечение безопасности проживания на таких территориях и обеспе-

ние безаварийной работы объектов различного назначения представляет сложную инженерную задачу.

Ситуация значительно осложняется, если территории подвержены не только действию одного какого-то воздействия, но и сопровождаются сопутствующими разрушительными явлениями и оказывают глубокое психологическое и социально-экономическое влияние на людей. К таким воздействиям относятся цунами в сейсмоопасных районах страны.

Настоящая статья посвящена поиску надежных и экономичных решений, которые могли бы успешно обеспечить достаточную цунамизащиту зданий в сейсмоопасных районах.

На первом этапе был выполнен анализ существующих решений, предлагаемых для обеспечения цунамизащиты зданий. В практике цунамизащиты сложились следующие подходы:

- устройство берегозащитных сооружений;
- строительство цунамистойких зданий.

Самым распространенным средством защиты побережья от волн цунами являются берегозащитные мероприятия. Многие исследователи [1–5] к таким мероприятиям относят посадку деревьев вдоль берега, строительство земляного вала или специальных берегозащитных сооружений типа стен, волноломов, молов и дамб. Причем тип и размеры берегозащитного сооружения должны напрямую зависеть от цунамирайонирования территории. Так, Ю. Л. Воробьев [1] и сотрудники «Камчатского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» [3] счи-

тают, что при слабых цунами можно использовать посадки леса на берегах, по возможности рекомендуется сажать сосны.

Данное решение наиболее простое и при этом достаточно эффективное, так как при прохождении волны сквозь лесопосадку происходит гашение ее энергии, задерживаются плавающие в воде обломки, а также уменьшается дальность затопления территории. Однако при сильных волнах лесопосадки малоэффективны, а в некоторых случаях даже опасны, так как волны цунами, обладающие большой энергией, способны сломать деревья, а получившиеся обломки бывшего берегозащитного сооружения нанесут дополнительный урон. По такой же причине не рекомендуется возводить волноломы или дамбы из свободнолежащего камня, который также «выбивается» сильной волной.

В районах с возможным возникновением сильных цунами могут быть использованы неразрываемые берегозащитные сооружения (рис. 1) [1]. Они должны иметь достаточно большую высоту, чтобы исключить переливание волны цунами через сооружение, а также требуют значительных материальных затрат на устройство прочной стенки, которая необходима, для того чтобы исключить разрушение сооружения в результате удара волны и приносимого ею мусора, обломков, водных судов и т. д.

Существуют различные предложения по повышению цунамизащиты. К ним относится цунамигаситель, разработанный Н. В. Ясковым [6] и представленный на рис. 2. Нижний поток волны цунами разгоняется с помощью

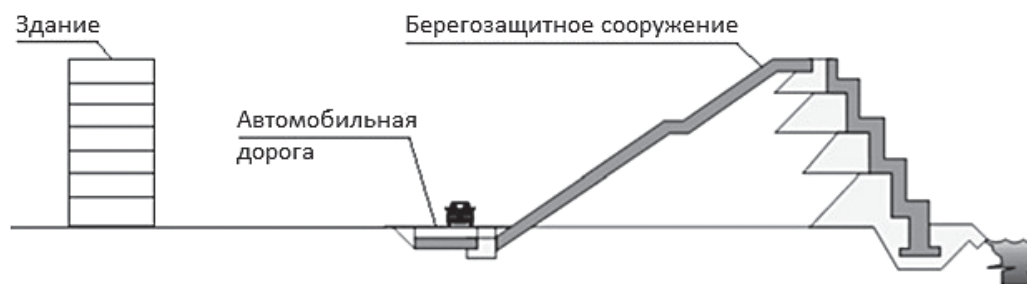


Рис. 1. Профиль берегозащитного сооружения

диффлекторов (например, пакета труб), после чего разворачивается навстречу основному верхнему потоку. В результате столкновения двух потоков происходит гашение энергии волны цунами, вследствие чего уменьшаются ее скорость и амплитуда.

Для получения необходимой эффективности от использования данного метода следует установить предлагаемую конструкцию вдоль всей длины защищаемого побережья, что, по-видимому, трудно осуществимо, так как нужна ровная поверхность на определенной глубине. Также подобного рода подводные сооружения могут стать препятствиями для судов.

В работах Ю. Л. Воробьева [1], Т. К. Злобина [5], Дж. Гира и Х. Шаха [7] приведены некоторые рекомендации по строительству зданий в цунамиопасных районах, среди которых главной рекомендацией является обеспечение прочности здания при действии ударной нагрузки от волны цунами. Само здание по возможности следует располагать перпендикулярно береговой линии, в этом случае площадь, подверженная удару, меньше, а прочность здания выше. Для уменьшения площади воздействия цунами также рекомендуется делать нижний этаж более «открытым», позволяя волне проходить здание насквозь. Фундамен-

ты и основание здания следует проектировать с защитой от просадки в результате насыщения грунта водой, а ключевые элементы инфраструктуры здания (аварийные генераторы, лифтовые моторные отсеки и др.) располагать на незатапливаемых этажах.

Идея свободного первого этажа широко распространена в цунамиопасных регионах. Она заключается в строительстве здания, имеющего высокий нежилой первый этаж, на котором располагается автомобильная парковка с лестнично-лифтовым узлом. При таком исполнении волна цунами пройдет через первый этаж «насквозь», не задевая вышележащие жилые этажи. В данном случае волна цунами оказывает давление не на все здание, а только на колонны первого этажа. Общий вид и план первого этажа такого здания представлены на рис. 3.

Эта же идея получила развитие в других решениях. Например, А. Д. Елисеев [8] и В. М. Соболев [9] предложили варианты защиты зданий от подтопления, однако они могут быть использованы и в качестве цунамистойкого здания только в районах с низкой цунамиопасностью. Оба решения объединяет одна идея: здание изначально находится близко к земле, но в случае подтопления территории (или возможного возникновения цунами)

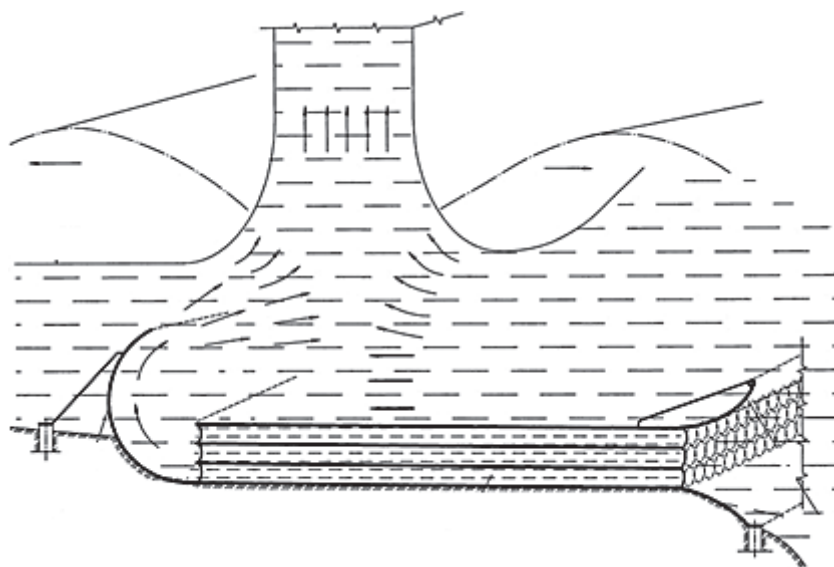


Рис. 2. Подводный цунамигаситель

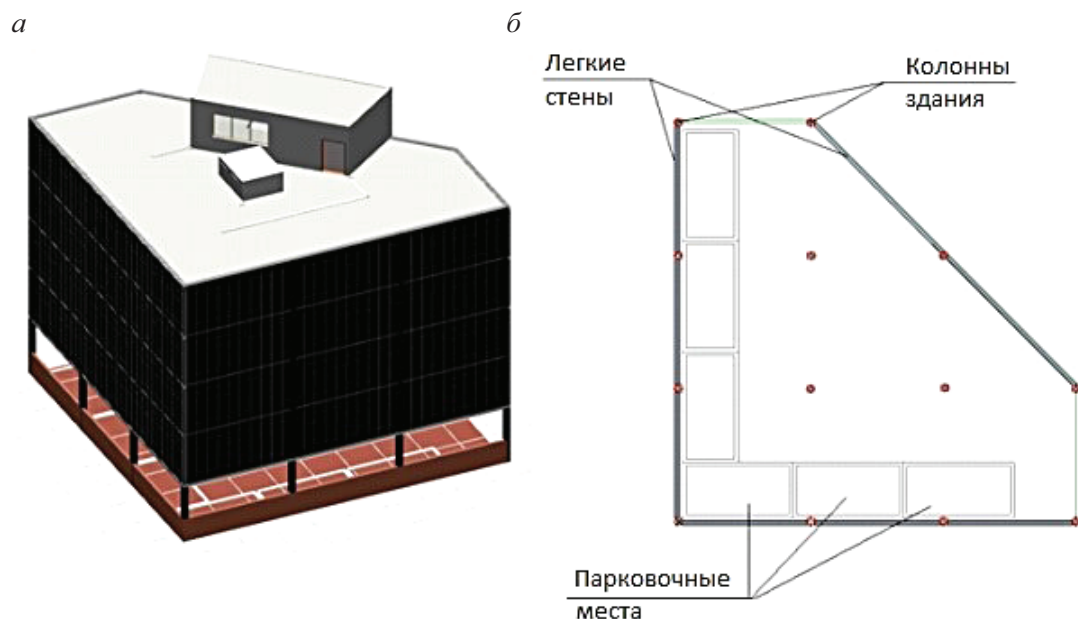


Рис. 3. Общий вид (а) и план первого этажа (б) здания с открытым первым этажом

оно приподнимается с помощью различных механизмов (рис. 4).

Следует заметить, что такие здания требуется устанавливать на достаточной высоте либо в районах с невысокой цунамиопасностью, так как максимальная безопасная высота волны равна высоте нижнего этажа.

Еще одно решение, которое может быть применимо в цунамиопасных районах, было предложено С. И. Рубинштейном [10]. Оно представляет собой конструкцию поселения, расположенного на полых железобетонных сваях, внутри которых размещены элементы транспортной инфраструктуры вертикального перемещения и коммуникационные системы. Эти сваи одной частью встроены в земную поверхность или в несущий слой дна водной поверхности и другой частью возвышаются

над уровнем земной или водной поверхности, в результате чего образуется пространство между такими поверхностями и нижним уровнем зданий. Технический результат данного решения заключается в увеличении плотности застройки при сохранении природного ландшафта под этой застройкой. Свободное пространство под зданиями способствует повышению цунамистойкости зданий. Вид представленного решения иллюстрирует рис. 5.

По-видимому, для его реализации потребуются значительные материальные затраты.

Идея приподнять здания над уровнем земли была использована и японским архитектором Киитиро Сако, который после сильного землетрясения и цунами в Японии 11 марта 2011 г. предложил свой проект обеспечения безопас-

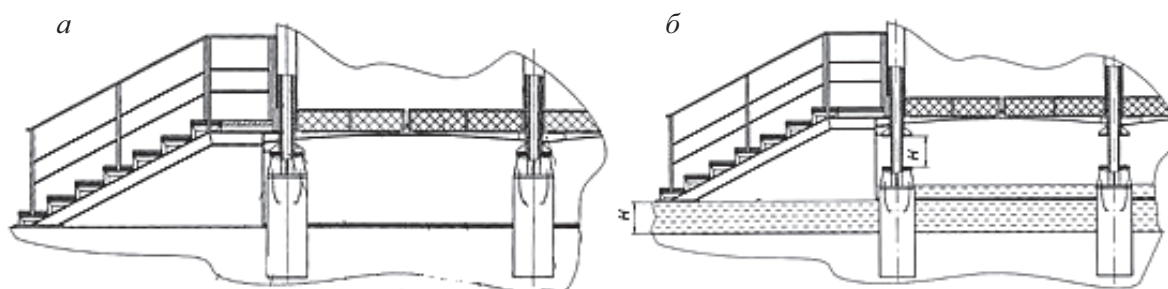


Рис. 4. Здание в исходном (а) и приподнятом на высоту H (б) положениях

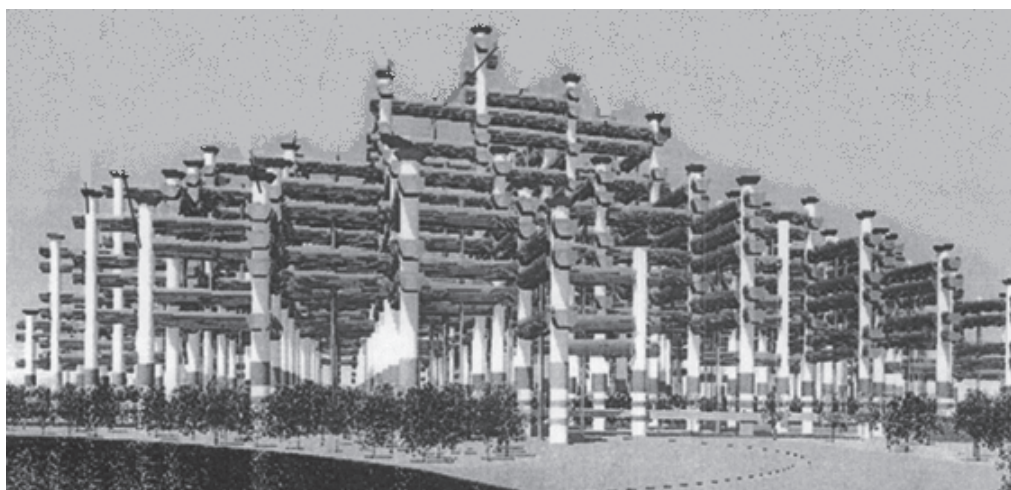


Рис. 5. Конструкция поселения, приподнятого над уровнем поверхности

ности населения «Tohoku Sky Village» [11]. Общий вид проекта представлен на рис. 6.

Как из него видно, проект представляет собой небольшое поселение со всей необходимой инфраструктурой. Все поселение приподнято над землей на 10–20 м, что обеспечивает безопасность как жителей, так и зданий. Главный недостаток проекта – высокая стоимость.

Анализ рассмотренных решений показал, что они могут быть неодинаковы и достаточно эффективны, однако с точки зрения реализации и стоимости наиболее простым является организация свободного пространства, которое может быть достигнуто различным образом.

Именно эту идею предлагается использовать для реализации цунамизащиты небольших малоэтажных зданий, расположенных вдоль побережья [12]. Свободное простран-

ство под зданиями организуется путем установки их на автомобильную эстакаду.

Мостовые конструкции для размещения построек применялись еще в глубокой древности, когда на мостах располагали торговые лавки, жилые дома и другие здания.

Использование полетных конструкций для размещения небольших жилых объектов может быть вполне эффективным. Схему предполагаемого решения иллюстрирует рис. 7. Для оценки возможности реализации такого решения были проведены исследования, которые состояли из оценки сейсмического воздействия и влияния волны цунами. Расчет проводился с помощью спектральной методики, представленной в СП 14.13330.2014 «Строительство в сейсмических районах» [13].

Определение воздействия цунами на здание производилось по методике, приведенной



Рис. 6. Проект «Tohoku Sky Village»:

а – изометрический вид нескольких поселений; *б* – изометрический вид одного поселения;
в – вид сбоку одного поселения

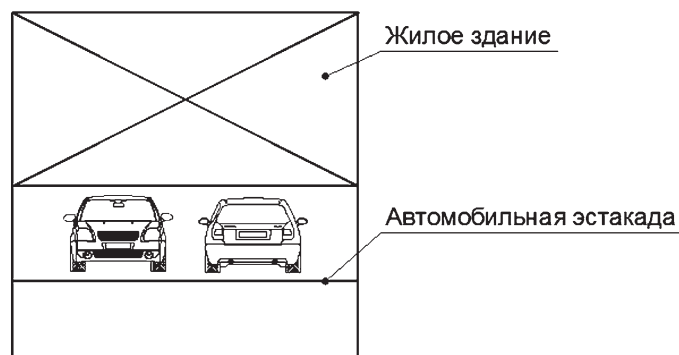


Рис. 7. Схема размещения малоэтажных зданий на эстакаде

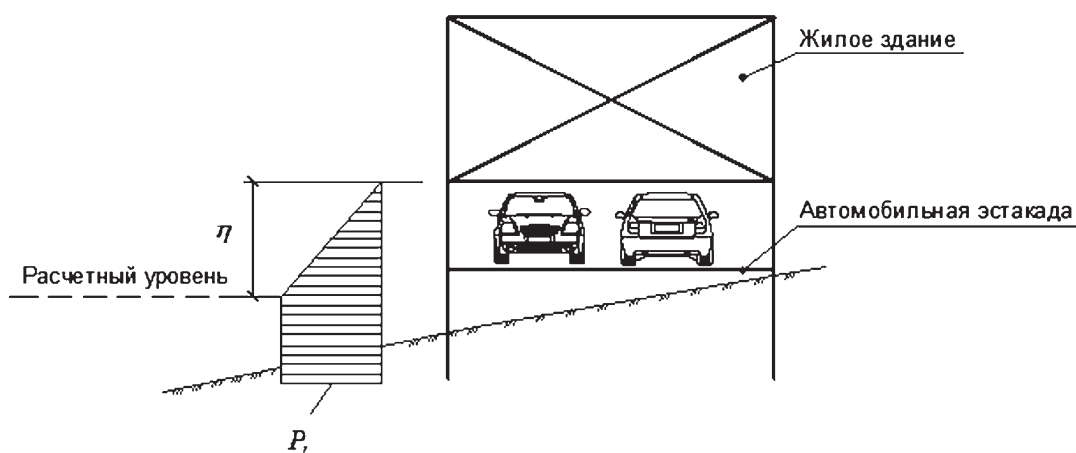


Рис. 8. Эпюра давления волнового потока на вертикальные конструкции эстакады

в РД 31.33.07–86 «Руководство по расчету воздействия волн цунами на портовые сооружения, акватории и территории. Рекомендации для проектирования» [14]. По данному документу можно установить нагрузку от волн цунами различной высоты, которая действует на здание, находящееся на побережье на различном расстоянии от уреза воды.

Эпюра давления волнового потока на вертикальное берегозащитное сооружение, расположенное выше уреза воды, представлена на рис. 8. В данном исследовании расчет производился на волну цунами высотой, равной расстоянию от уровня земли до низа первого этажа здания, что составляет 11 м.

Нагрузка P_l от волн цунами определяется по формуле

$$P_l = 1,5 \cdot \rho \cdot g \cdot \eta, \quad (1)$$

в которой ρ – плотность воды, равная 10^3 кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, равное $9,81 \text{ м/с}^2$; η – возвышение поверхности воды на спокойном уровне в случае, если сооружение расположено выше уреза воды:

$$\eta = \left(1 - \frac{i}{h_{run,100}} \cdot x \right) \cdot h_x, \quad (2)$$

где i – уклон берегового откоса, принимаем, что $i = 0,01$; $h_{run,100}$ – средняя величина максимального подъема уровня воды при накате цунами, считаем, что $h_{run,100} = 4,3 \text{ м}$; x – расстояние от уреза воды до здания, $x = 250 \text{ м}$; h_x – максимальная волна воды на урезе, $h_x = 11 \text{ м}$.

Исходные параметры для формулы (2) взяты для Южно-Курильска – населенного пункта на Курильских островах.

Тогда, подставив принятые значения в уравнения (1) и (2), находим для волны цунами

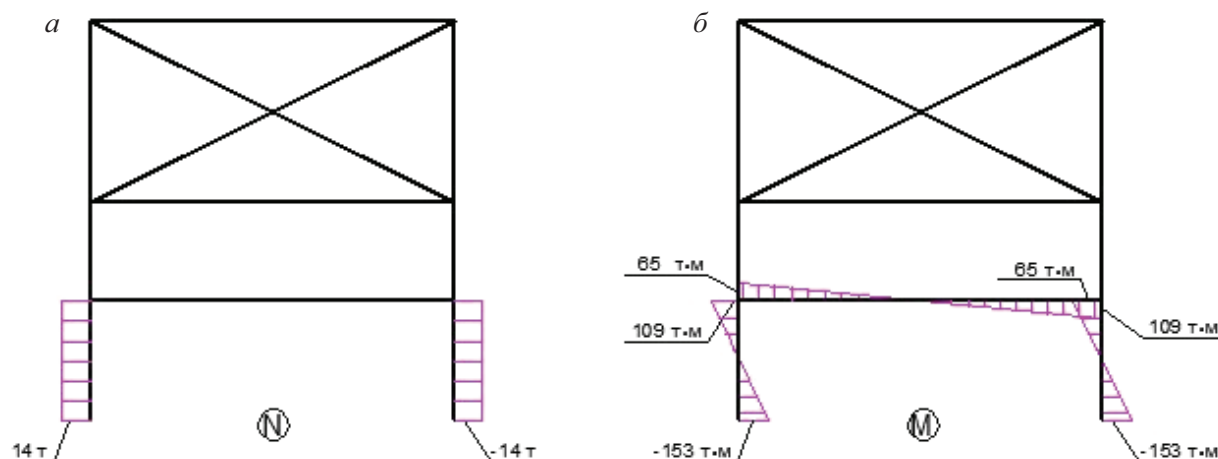


Рис. 9. Эпюры максимальных продольных сил (а) и изгибающих моментов (б) в элементах от максимальной волны цунами

$$\eta = \left(1 - \frac{0,01}{4,3} \cdot 250 \right) \cdot 11 = 4,6 \text{ м,}$$

$$P_l = 1,5 \cdot 10^3 \cdot 9,81 \cdot 4,6 = 67,7 \text{ кПа.}$$

Данная нагрузка была задана в расчетную схему в ПК SCAD 21.1. В результате расчета такой схемы на цунами высотой 11 м получились максимальные продольные силы и изгибающие моменты, эпюры которых изображены на рис. 9.

Полученный результат показывает, что наиболее опасным является сечение нижних стоек эстакады. Это сечение проверено в программе «Кристалл», и коэффициент использования материала составил 0,986. Стоит отметить, что при расчете данной схемы на 9-балльную сейсмическую нагрузку он был равен 0,998 [15].

В ходе проведенного исследования получены следующие результаты:

1) выполнен обзор существующих решений и возможных средств защиты от волн цунами, на основании которого рассмотрена цунамизащита, заключающаяся в установке малоэтажных зданий на конструкцию автомобильной эстакады;

2) установлено, что предложенная система цунамизащиты способна сопротивляться воздействию землетрясения в 9 баллов и волне цунами высотой до 11 м.

Библиографический список

1. Воробьев Ю. Л. Цунами : предупреждение и защита / Ю. Л. Воробьев, В. А. Акимов, Ю. И. Соколов. – М. : Изд-во МЧС России, 2006. – 264 с.
2. Попов М. А. Защита от стихийных бедствий / М. А. Попов. – М. : Изд-во МГУП, 2014. – 128 с.
3. Информация центра цунами. – URL : http://kammeteo.ru/gms_interest3.html (дата обращения : 28.05.2017).
4. Шульгин В. Н. Инженерная защита населения и территории в чрезвычайных ситуациях мирного и военного времени / В. Н. Шульгин. – М. : Изд-во «Академический Проект», 2010. – 688 с.
5. Злобин Т. К. Природные катастрофы в литосфере Сахалино-Курильского региона и меры безопасности / Т. К. Злобин. – Южно-Сахалинск : Изд-во СахГУ, 2000. – 132 с.
6. Патент № 2524814 Российская Федерация, МПК E02 B 3/04. Цунамигаситель / Н. В. Ясков. – Заявл. 05.02.2013 г.; опубл. 10.08.2014 г. – Бюл. № 22.
7. Гир Дж. Зыбкая твердь : Что такое землетрясение и как к нему подготовиться / Дж. Гир, Х. Шах ; пер. с англ. Н. В. Шебалина. – М. : Мир, 1988. – 182 с.
8. Патент № 2376418 Российская Федерация, МПК E02D 27/32. Опора противостихийной конструкции здания / А. Д. Елисеев. – Заявл. 27.03.2008 г. ; опубл. 20.12.2009 г. – Бюл. № 35.

9. Патент № 2410511 Российская Федерация, МПК E04H 9/14. Всплывающий во время наводнения дом / В. М. Соболев. – Заявл. 23.01.2009 г. ; опубл. 27.01.2011 г. – Бюл. № 21.
10. Патент № 2485266 Российская Федерация, МПК E 04 H 1/00. Конструкция поселения / С. И. Рубинштейн. – Заявл. 23.01.2012 г. ; опубл. 20.06.2013 г. – Бюл. № 17.
11. Спасительные острова над землёй. – URL : http://www.chaskor.ru/article/spasitelnye_ostrova_nad_zemlej_26876 (дата обращения : 28.06.2018).
12. Белаш Т. А. Предложение по цунамизации зданий / Т. А. Белаш, И. Б. Нудьга, А. Д. Яковлев // Инновационный альбом Российской Академии архитектуры и строительных наук. – 2018. – Вып. 2017-1. – С. 25.
13. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. – Введ. 06.01.2014 г. – М. : Минстрой России, 2014. – 126 с.
14. РД 31.33.07–86. Руководство по расчету воздействия волн цунами на портовые сооружения, акватории и территории. Рекомендации для проектирования. – Введ. 01.10.1986 г. – М. : СоюзМорНИИПроект, 1986. – 53 с.
15. Белаш Т. А. Сейсмостойкость цунамистойких жилых зданий / Т. А. Белаш, А. Д. Яковлев // Инженер.-строит. журн. – 2018. – № 4(80). – С. 95–103.
5. Zlobin T. K. *Prirodnye katastrofy v litosfere Sakhalino-Kuril'skogo regiona i mery bezopasnosti* [Natural disasters in the lithosphere of the Sakhalin and Kurils region and safety measures]. Yuzhno-Sakhalinsk, SakhGU Publ., 2000, 132 p. (In Russian)
6. Iasakov N. V. *Patent no. 2524814 Russian Federation, IPC E02B 3/04. Tsunami-gasitel* [Tsunami damper]. Declared 05.02.2013; published 10.08.2014. Bulletin no. 22. (In Russian)
7. Gir G. & Shakh Kh. *Zybkaia tverd: Chto takoe zemletriasenie i kak k nemu podgotovitsia* [Terra Non Firma. Understanding and Preparing for Earthquakes]. Tr. by N. V. Shebalin. Moscow, Mir Publ., 1988, 182 p. (In Russian)
8. Eliseev A. D. *Patent no. 2376418 Russian Federation, IPC E02D 27/32. Opora protivostikhiinoi konstruktssii zdaniia* [Supporting structure of element-resistant building design]. Declared 27.03.2008; published 20.12.2009. Bulletin no. 35. (In Russian)
9. Sobolev V. M. *Patent no. 2410511 Russian Federation, IPC E04H 9/14. Vsplyvaiushchii vo vremia navodneniia dom* [House which resurfaces during flood]. Declared 23.01.2009; published 27.01.2011. Bulletin no. 21. (In Russian)
10. Rubinshtein S. I. *Patent no. 2485266 Russian Federation, IPC E04H 1/00. Konstruktsiia poseleniia* [Construction design of a settlement]. Declared 23.01.2012; published 20.06.2013. Bulletin no. 17. (In Russian)
11. *Spasitelnye ostrova nad zemlei* [Saving islands above land]. URL: http://www.chaskor.ru/article/spasitelnye_ostrova_nad_zemlej_26876 (accessed: 28.06.2018). (In Russian)
12. Belash T. A., Nud'ga I. B. & Iakovlev A. D. *Predlozhenie po tsunamizashchite zdaniia* [A proposal on tsunami protection of buildings]. *Innovatsionnyi albom Rossiiskoi akademii arkhitektury i stroitelnykh nauk* [Innovative album of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences], 2018, vol. 2017-1, p. 25 (In Russian)
13. *Construction rules 14.13330.2014. Stroitelstvo v seismichnykh raionakh* [Construction in earthquake zones]. Introduced 06.01.2014. Moscow, Minstroii Rossii Publ., 2014, 126 p. (In Russian)
14. *Controlling document 31.33.07–86. Rukovodstvo po raschetu vozdvoistviia voln tsunami na portovye*

sooruzheniia, akvatorii i territorii [Calculation manual for tsunami wave impact on port structures, water areas and territories]. Design recommendations. Introduced 01.10.1986. Moscow, SoiuzMorNIIProekt Publ., 1986, 53 p. (In Russian)

15. Belash T.A. & Iakovlev A.D. Seismostoikost tsunamistoikikh zhilykh zdaniy [Earthquake resistance of tsunami-resistant residential buildings]. *Inzhenerno-stroitelnyi zhurnal* [Eng.-constr. Journal], 2018, no. 4 (80), pp. 95–103. (In Russian)

БЕЛАШ Татьяна Александровна – д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой, belashta@mail.ru; НУДЬГА Игорь Борисович – канд. техн. наук, nudga.igor@mail.ru; *ЯКОВЛЕВ Антон Дмитриевич – аспирант, anton.yakovlev.94@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 624.21

Э. С. Карапетов, А. В. Атанов**АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ ВКЛЮЧЕНИЯ
СТАЛИ И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА В СОВМЕШТУЮ РАБОТУ**

Дата поступления: 07.06.2018

Решение о публикации: 22.06.2018

Аннотация

Цель: Расширение арсенала способов включения стали и железобетона в сталежелезобетонные пролётные строения автодорожных мостовых сооружений. **Методы:** Были применены исторический, описательный и сравнительный методы, а также моделирование при проведении анализа существующих способов включения стали и железобетона в совместную работу. **Результаты:** Приведен краткий исторический обзор способов включения стали и железобетона в совместную работу, рассмотрены современные способы, отмечены их достоинства и недостатки, определен вектор проводимых исследований в области совершенствования существующих и разработки других способов включения стали и железобетона в совместную работу, предложено принципиально новое устройство объединения стали и железобетона с применением упругих прутковых клемм из рессорно-пружинной стали. **Практическая значимость:** Описанное новое устройство объединения стали и железобетона с помощью упругих прутковых клемм из рессорно-пружинной стали позволит повысить надежность сталежелезобетонного пролётного строения со сборной плитой проезжей части при работе на динамические нагрузки и восприятии температурных воздействий, от усадки и ползучести бетона плиты.

Ключевые слова: Мост, сталежелезобетон, пролётное строение, упор, гибкий штыревой упор, сдвиговое соединение, клеммно-болтовое соединение.

Eduard S. Karapetov, Cand. Eng. Sci., senior lecturer, eskar@yandex.ru; ***Aleksandr A. Atanov**, postgraduate student, a_atanov@inbox.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University)
ANALYSIS OF EXISTING METHODS OF INCORPORATION OF STEEL AND REINFORCED CONCRETE IN COMBINED ACTION

Summary

Objective: Expansion of the arsenal of methods for introducing steel and reinforced concrete into composite reinforced concrete superstructures of vehicular bridgework. **Methods:** Historical, descriptive and comparative methods were applied, in addition to simulation applied to analyzing existing methods of incorporation of steel and reinforced concrete in combined action. **Results:** The paper provides a concise historical overview of methods for incorporation of steel and reinforced concrete in combined action, considers the contemporary methods, noting its pros and cons, determines the vector of research being conducted into perfecting of existing and developing of new methods of incorporation of steel and reinforced concrete in combined action, and proposes a conceptually new design of combining steel and reinforced concrete deploying elastic rod-shaped terminal screws produced from spring steel. **Practical importance:** The new design for combining steel and reinforced concrete deploying elastic rod-shaped terminal screws produced from spring steel, described here, will allow increasing reliability of steel-reinforced concrete superstructure with precast slab roadway during operation involving dynamic force and reception of effects of temperature, shrinkage and creep of concrete in the slab.

Keywords: Bridge, steel-reinforced concrete, superstructure, abutment, elastic pronged abutment, shear assembly, terminal-bolted assembly.

Введение

В последние годы на федеральных и региональных автомобильных дорогах на территории Российской Федерации при строительстве мостовых сооружений широкое применение находят сталежелезобетонные пролётные строения.

В соответствии с отечественными [1,2] и зарубежными [3] нормативно-техническими документами сталежелезобетонными называются пролётные строения мостовых сооружений, у которых несущие конструкции состоят из стальных и железобетонных элементов, работающих совместно. Сущность сталежелезобетонных пролётных строений заключается в восприятии железобетоном сжимающих напряжений, появляющихся от изгибающих моментов, которое невозможно без надежного объединения железобетонной плиты и стальных балок [4].

Совместная работа достигается за счет применения специальных элементов или устройств объединения, которые воспринимают продольные (сдвигающие) и поперечные (отрывающие и прижимающие) усилия, возникающие как от постоянных, так и от временных нагрузок, а также от температурных воздействий, усадки и ползучести бетона. В европейских нормах [3] такие элементы получили название сдвиговых соединений (shear connection) или соединителей (connectors), в отечественных нормах [1, 2] – упоров или анкеров.

Несмотря на достоинства сталежелезобетонных пролётных строений, среди которых можно отметить уменьшение расхода стали и увеличение жесткости по сравнению с металлическими, снижение собственного веса по сравнению с железобетонными, срок службы для пролётных строений длиной до 60 м – 70 лет и свыше 60 м – 100 лет, назначаемый исходя из требований [2, 5], в настоящее время не известен. Так, в [6] отмечается, что физический износ пролётных строений развивается раньше наступления расчетного срока службы и проявляется в виде расстроя

узлов объединения железобетона и стали, в [7] в качестве одного из характерных дефектов и повреждений железобетонной плиты приводится нарушение объединения стали и железобетона. На плиту проезжей части в период эксплуатации воздействуют различные негативные факторы, оказывающие существенное влияние на ее долговечность и надежность, и, как следствие, на долговечность элементов объединения стали и железобетона. Численные закономерности между возникающими дефектами (и/или повреждениями) и негативными факторами, влияющими на пролётные строения, и предложения по их учету при оценке и прогнозировании технического состояния железобетонных мостов приведены в статьях [8–11]. Указанные закономерности с определенными допущениями могут быть отнесены и к железобетонной плите проезжей части сталежелезобетонного моста. В этой связи, по мнению авторов, на первый план выходит надежность и долговечность объединения стали и железобетона, обеспечение которых невозможно без совершенствования существующих или разработки новых способов включения стали и железобетона в совместную работу.

Краткий исторический обзор элементов и способов объединения

Первым элементом объединения железобетона и стали принято считать арматурную спираль, приваренную к верхнему поясу стальной балки, которая впервые была использована в Швейцарии в 1939 г. в разрезном балочном пролётном строении системы «Альфа» [4, 12, 13]. Со временем она была вытеснена арматурными зигзагами, хомутами и отгибами арматуры железобетонных ребер. Однако вышеуказанные конструкции не получили распространения в виду большой трудоемкости монтажной сварки.

В 1948 г. в отечественном мостостроении впервые были применены одиночные наклонные арматурные анкера под углом 45°

для пролётных строений с железобетонными ребрами, в 1950 г. – под углом 20° для пролётных строений без ребер. Однако, как отмечает Н. Н. Стрелецкий в [13], до начала 80-х годов XX в. в практике отечественного мостостроения все же преобладали жесткие упоры (угловые, дугообразные, одностенчатые, двухстенчатые и др.).

В США и Англии в конце 1940-х – начале 1950-х годов широкое распространение получили гибкие упоры из отрезков прокатных профилей (швеллеров или двутавров), а в европейских странах – арматурные анкера различных видов и типоразмеров. Жесткими упорами за рубежом служили отрезки прокатных профилей. Во второй половине 1950-х годов используемые ранее за рубежом гибкие упоры и анкеры были заменены на гибкие штыревые упоры.

В 1950-х годах была разработана конструкция жесткого упора с непрерывным объединительным элементом с приваренными упорными планками. В конце 1960-х годов В. И. Кулишом и А. А. Поперечиным было предложено вместо упорных планок придать верхней грани переменную высоту, в начале 1970-х годов М. Боуда – выполнить поперечные косые отгибы в вертикальном листе жесткого упора.

В 1959 г. в ФРГ был применен способ объединения железобетона и стали на высокопрочных болтах, обжимающих железобетон [13].

В 1984 г. в отечественных нормах на проектирование мостов [14] были впервые приведены требования к конструированию и расчету гибких штыревых упоров, производство которых за рубежом было начато еще в 50-х годах XX в. Освоение технологии в отечественном мостостроении с помощью импортных упоров, защитных керамических колец и оборудования фирмы «КОСО» было начато только в 1998 г. на базе АО «Курган-стальмост». Стандарт предприятия [15], регламентирующий технологию устройства гибких штыревых упоров, был введен в действие в 2001 г. и предусматривает применение импортных упоров из стали марки St37-3k, за-

щитных керамических колец и сварочного оборудования. В целях снижения стоимости комплекта «упор–защитное керамическое кольцо» были проведены исследования, после чего в 2002 г. принят стандарт предприятия [16], регламентирующий технологию устройства гибких штыревых упоров с упорами из отечественных сталей марок 09Г2С и 14Г2, отечественных защитных керамических колец, а также импортного сварочного оборудования.

В 1997 г. В. Г. Решетниковым с коллегами предложена конструкция непрерывного гребенчатого упора с наклонными прорезями, защищенная патентом РФ [17]. В 2009 г. Росавтодором был утвержден отраслевой дорожный методический документ [18], в котором приведены рекомендации по применению конструкции непрерывного гребенчатого упора [17].

Результаты исследований в области проектирования и строительства сталежелезобетонных пролётных строений, включая элементы и устройства объединения стали и железобетона, были впервые обобщены и изложены Е. Е. Гибшманом [4], в дальнейшем эта работа продолжена Н. Н. Стрелецким [12, 13], В. А. Быстровым [19], Н. Н. Бычковским [20] и др.

Отличия в работе жестких упоров, гибких упоров и анкеров описаны Е. Е. Гибшманом [4] и Н. Н. Стрелецким [12, 13] и заключаются в характере деформаций бетона и воспринимаемых усилий. Так, жесткие и гибкие упоры воспринимают только сдвигающие усилия, а анкеры – сдвигающие и отрывающие усилия, при этом жесткие упоры в отличие от гибких упоров и анкеров вызывают равномерные деформации смятия бетона.

Основные виды элементов и устройств объединения, используемых в настоящее время при проектировании сталежелезобетонных пролётных строений в отечественной и зарубежной практике, систематизированы М. М. Корнеевым [21] и включают в себя следующие типы упоров: жесткие, гибкие из прокатных профилей, петлевые, типа Perfobond, гребенчатые с наклонными прорезями и гибкие штыревые.

Современные способы объединения железобетона и стали

В соответствии с Европейскими нормами [3, 22] рекомендовано использовать для объединения гибкие штыревые упоры или жесткие упоры с петлевыми элементами, Британскими нормами [23] дополнительно допускается применение гибких упоров из прокатного швеллера, а также соединение на высокопрочных болтах, обжимающих железобетон.

Согласно отечественным нормам [2] для объединения стали и железобетона допускается использование жестких упоров, вертикальных гибких упоров (в виде круглых стержней, прокатных швеллеров, двутавров и уголков без подкрепляющих ребер), наклонных анкеров, высокопрочных болтов, обжимающих железобетон, болтоклевого объединительного шва и гребенчатых упоров.

При новом строительстве в большинстве случаев применяется один из двух способов объединения железобетона и стали: гребенчатые упоры с наклонными прорезями и гибкие штыревые упоры [24]. Отмечается, что в практику мирового и отечественного мостостроения наиболее широко внедрены гибкие штыревые упоры [25–27]. Необходимо указать, что и гибкие штыревые упоры, и гребенчатые упоры с наклонными прорезями уместнее называть анкерами, так как они воспринимают как сдвигающие, так и отрывающие усилия в объединенной сталежелезобетонной конструкции.

Приварка гибких штыревых упоров к верхнему поясу главных балок осуществляется на заводе при помощи автоматической контактно-дуговой сварки с защитными керамическими кольцами. Скорость сварки – от 4 до 6 упоров в минуту [21].

Достоинствами гибких штыревых упоров являются технологичность, производительность, металлоемкость (в сравнении с жесткими упорами), качество сварного шва, отсутствие необходимости в специальных методах контроля, наличие возможности некоторого относительного перемещения железобетонной

и стальной частей пролётного строения без возникновения разрушающих явлений [28, 29]. Качество сварного шва подтверждено испытаниями гибких штыревых упоров на отрыв от верхнего пояса главных балок, при котором разрушение происходит по упору, а не по месту его сплавления с прокатным листом [21].

Вместе с тем необходимо отметить, что проведенные в ОАО «ЦНИИС» контрольные исследования сварных соединений гибких упоров из стали марки St37-3k с отечественными мостовыми сталями выявили дефекты в виде трещин по сварному шву, пор, переходящих в трещины, флокенов, неметаллических включений при низкой ударной вязкости KCU-40 °C металла сварных швов [30].

К недостаткам гибких штыревых упоров являются высокая стоимость комплекта «упор–защитное керамическое кольцо», отсутствие отечественного сварочного оборудования для автоматической контактно-дуговой сварки [20], неблагоприятная работа на многократно повторные нагрузки с потерей сцепления бетона и стали и опасностью усталостного разрушения [13, 25], повреждаемость при транспортировке и монтаже, дискретность в передаче сдвигающих усилий [26, 31].

Непрерывные гребенчатые упоры с наклонными прорезями являются результатом усовершенствования конструкции упора типа Perfobond [32].

Приварка непрерывных гребенчатых упоров с наклонными прорезями к верхнему поясу главных балок проводится при помощи автоматической сварки под флюсом или полуавтоматической сварки в среде защитных газов непрерывным угловым сварным швом типа ТЗ [18]. Усилия от главных балок передаются на железобетонную плиту и обратно через арматурные стержни нижней арматурной сетки, входящие в наклонные прорези упора, а также через дополнительные арматурные стержни, располагаемые в верхних отверстиях упоров, при этом бетон плиты работает на сжатие и скалывание. Отрываю-

щие усилия гасятся наклонными прорезями в упорах.

К достоинствам технологии объединения с применением непрерывных гребенчатых упоров относятся технологичность (в заводских условиях), металлоемкость (в сравнении с гибкими штыревыми упорами), отсутствие необходимости в импортном оборудовании для автоматической контактно-дуговой сварки [20], передача усилий без концентрации напряжений как в главных балках, так и в бетоне плиты, восприятие отрывающих усилий равномерно по всей длине и неподверженность деформации сдвига [30]; к недостаткам – необходимость термоправки вследствие деформаций упора, возникающих в процессе сварки, и использования станков с числовым программным управлением [20]. Следует отметить, что характер развития напряжений в бетоне при взаимодействии с упорами еще мало изучен [32]. Вместе с тем по результатам экспериментальных исследований, проведенных на базе ОАО «ЦНИИС», установлено, что разрушение узла объединения происходит по бетону без каких-либо повреждений сварных швов, металла упора и арматуры [33].

Авторами [26] был проведен сравнительный анализ работы гибких штыревых упоров и непрерывных гребенчатых упоров с наклонными прорезями, по результатам которого выявлено, что тип упора не оказывает практически никакого влияния на общую жесткость сталежелезобетонного пролётного строения. Вместе с тем экономический эффект от непрерывных гребенчатых упоров по сравнению с гибкими штыревыми упорами характеризуется сокращением затрат в 1,5–1,7 раза [20].

Непрерывные гребенчатые упоры и гибкие штыревые упоры рекомендуются отечественными нормами [2] только при устройстве монолитной железобетонной плиты проезжей части, при этом в сборных плитах для объединения допускается применение гибких упоров и анкеров, омоноличиваемых в окнах и швах. В статье [34] рассмотрены конструкции пролётных строений, в которых были использованы сборные железобетонные плиты:

1) с вертикальными «окнами» на всю высоту плиты или с глухими нишами с отверстиями для последующего омоноличивания; 2) с круглыми отверстиями, через которые после монтажа плиты и ее предварительного обжатия высокопрочной арматурой привариваются гибкие штыревые упоры и производится омоноличивание; 3) с горизонтальными швами над поясами главных балок. В дополнение к вышеуказанным конструктивным решениям в [21] рассмотрена конструкция пролётного строения со сборной железобетонной плитой проезжей части с непрерывными горизонтальными нишами над поясами главных балок, обхватывающими гибкие штыревые упоры, для последующего омоноличивания.

Однако все вышеуказанные конструктивные решения с применением гибких штыревых упоров и сборных железобетонных плит проезжей части требуют выполнения трудоемкой операции по омоноличиванию окон, ниш или швов, которая увеличивает общую продолжительность строительства и содержит предпосылки к браку при производстве работ.

При устройстве сборной железобетонной плиты проезжей части отечественными нормами [2] рекомендуется использование фрикционных, болтоклеевых или сварных соединений.

Высокопрочные болты позволяют обжимать шов между сборной железобетонной плитой и стальными балками и передавать через него сдвигающие усилия без наличия упоров и анкеров, при этом также обеспечивается и восприятие отрывающих усилий. При фрикционном объединении сдвигающие усилия передаются за счет сил трения, а при болтоклеевом – за счет сил трения и сцепления, обеспечиваемых клеевым составом.

К достоинствам технологии объединения на высокопрочных болтах, обжимающих железобетон, относятся равномерная передача сдвигающих усилий, действующих между железобетонной плитой и стальными балками [13, 25, 35], высокая жесткость на сдвиг [35] и повышенная надежность при работе под дей-

ствием динамических нагрузок [13]; к недостаткам технологии – необходимость устройства отверстий в верхнем поясе стальных балок, ослабляющих сечение и повышающих трудоемкость [25, 35], потеря усилий натяжения высокопрочных болтов из-за ползучести бетона плиты, дополнительное армирование в зонах местного обжатия и пескоструйная обработка верхнего пояса стальных балок (при болтоклеевом объединении) [13].

К достоинствам технологии объединения на сварке относятся экономия стали и технологичность, а к недостаткам – влияние отклонений формы объединяемых элементов [36].

После обследований эксплуатируемых сталежелезобетонных мостов со сборными железобетонными плитами проезжей части, проведенных в конце 1980-х годов, и выявления их недостатков были разработаны новые устройства объединения железобетонной плиты и стальных балок с применением резьбовых соединений:

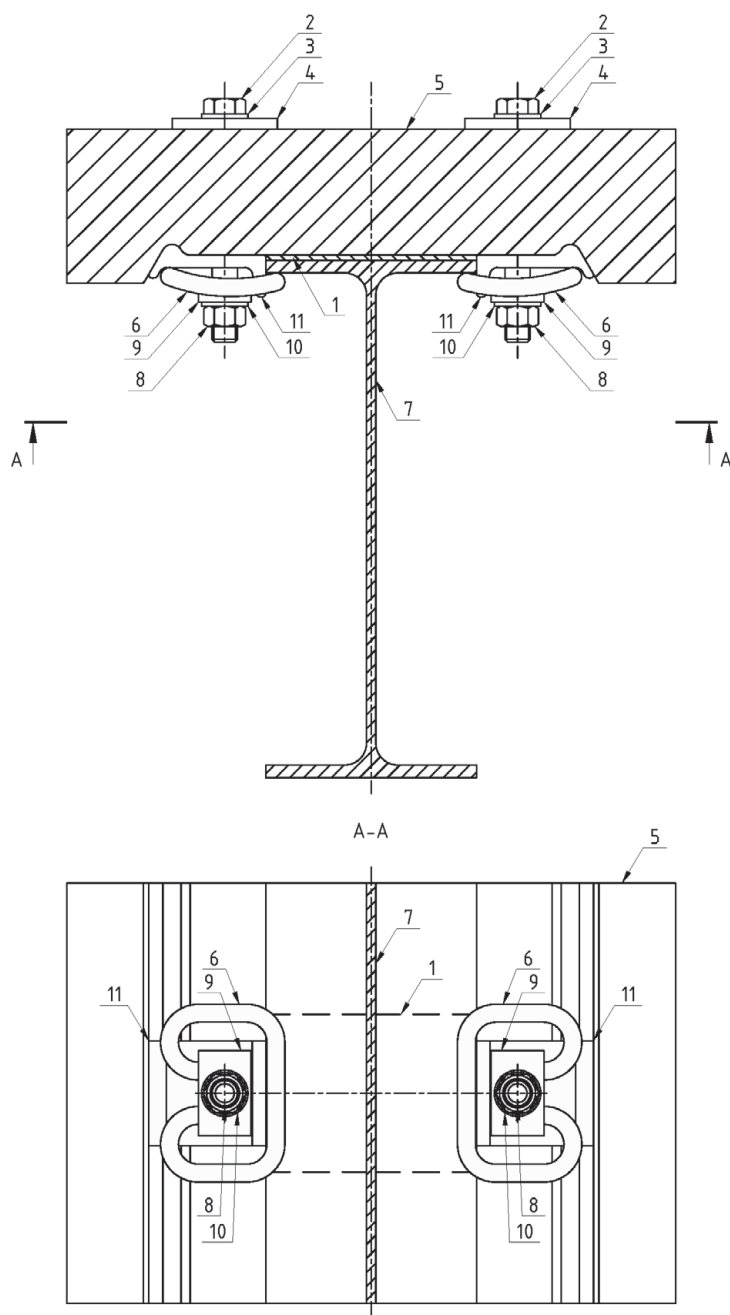
- через закладные детали с помощью парных приемных уголков, при этом анкеровка закладной детали в плите осуществляется при помощи жестких упоров и петлевых анкеров [37];
- через закладные детали в виде патрубков из труб диаметром 273 мм, при этом анкеровка закладной детали в плите осуществляется при помощи арматурных скоб [38];
- через закладную U-образную сварную деталь, при этом анкеровка закладной детали в плите осуществляется при помощи арматурных стержней, проходящих через отверстия в вертикальных листах закладной детали [39];
- через закладные детали (прокатные уголки) с отверстиями, соосными с отверстиями в железобетонной плите, при этом анкерным устройством выступает металлический брус с горизонтальной прорезью, в которой расположена цилиндрическая гайка [40];
- через отверстия в коробчатом упоре, прикрепленном к верхнему поясу главной балки, соосные с отверстиями в плите проезжей части, имеющей пирамидальный вырез под коробчатый упор [41].

В настоящее время исследования в области устройств объединения железобетонной плиты проезжей части и металлической главной балки ведутся по пути совершенствования непрерывных гребенчатых упоров. Так группами авторов во главе с И. В. Решетниковым [42] и А. Г. Злотниковым [43] предложены оптимизированные конструкции непрерывных гребенчатых упоров, которые отличаются от прототипа [17] конфигурацией вырезов.

Вместе с тем, по мнению авторов настоящей статьи, необходимо в дальнейшем расширять арсенал технических средств, применяемых для объединения железобетонной плиты проезжей части, в том числе сборной, с металлическими главными балками. В качестве прототипа было выбрано устройство объединения сборной плиты и главной балки на болтах, проходящих через отверстия в плите и клеммах, выполненных в виде уголков, которые обеспечивают совместную работу плиты и главной балки [13]. К недостаткам указанного устройства относятся трудоемкость, уменьшение усилия прижатия клемм в процессе эксплуатации в связи с износом резиновых прокладок, расположенных между сборной плитой и верхним поясом главной балки, и металлических элементов по контакту «главная балка–клемма–шайба–гайка», а также неремонтопригодность.

Техническим результатом предлагаемого решения являются расширение арсенала технических средств, используемых для объединения сборной плиты с главной балкой в сталежелезобетонном пролётном строении, уменьшение перемещений сборной плиты относительно главной балки и повышение стабильности усилия прижатия клемм за счет применения упругих прутковых клемм из рессорно-пружинной стали, обеспечивающих упругий ход клемм.

Сущность описываемого решения иллюстрирует рисунок, на котором изображен общий вид устройства объединения сборной плиты с главной балкой, включающий в себя резиновую прокладку 1, высокопрочные болты 2, проходящие через шайбы 3, отверстия в



Общий вид устройства объединения (объяснение в тексте)

металлических подкладках 4 и сборной плите 5 и упругие прутковые клеммы из рессорно-пружинной стали 6, прижимаемые к сборной плите 5 и главной балке 7 за счет закручивания гаек 8 через металлические скобы 9 и шайбы 10, и упираемые в упругие металлические подкладки 11, заанкеренные в сборной плите 5, при этом металлические скобы 9 и упругие металлические подкладки 11 имеют отверстия,

соосные с отверстиями в сборной плите 5 и металлических подкладках 4.

Заключение

По результатам анализа существующих способов включения стали и железобетона в совместную работу, а также определения их

достоинств и недостатков был сделан вывод о необходимости дальнейшего расширения арсенала технических средств, применяемых для объединения железобетонной плиты проезжей части, в том числе сборной, с металлическими главными балками.

Разработано принципиально новое устройство объединения с использованием в качестве элементов объединения железобетона и стали упругих прутковых клемм из рессорно-пружинной стали. Вместе с тем необходимо отметить, что устройство требует дополнительных исследований с целью изучения его работы под действием статических и динамических нагрузок.

По нашему мнению, за счет упругого хода клемм будет повышена надежность сталежелезобетонного пролётного строения со сборной плитой проезжей части при работе его на динамические нагрузки и восприятии температурных воздействий, от усадки и ползучести бетона плиты.

В настоящее время авторами разработана базовая трехмерная модель предложенного устройства, а также ведется работа по созданию его пространственной конечно-элементной модели в программном комплексе ANSYS Workbench для последующей аппроксимации. Результаты проводимых исследований будут освещаться в последующих статьях.

Библиографический список

1. СП 159.1325800.2014. Свод правил. Сталежелезобетонные пролётные строения автодорожных мостов. Правила расчета. – М. : ФАУ «ФЦС», 2014. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». – URL : www.kodeks.ru (дата обращения : 01.06.2018).
2. СП 35.13330.2011. Свод правил. Мосты и трубы. – Актуализир. ред. СНиП 2.05.03–84*. – М. : Минрегион России, 2011. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». – URL : www.kodeks.ru (дата обращения : 01.06.2018).
3. EN 1994-1-1:2004. Eurocode 4 : Design of composite steel and concrete structures. – Pt 1-1 : General rules and rules for buildings. – URL : <http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1994.1.1.2004.pdf> (дата обращения : 01.06.2018).
4. Гибшман Е. Е. Мосты со стальными балками, объединенными с железобетонной плитой : монография / Е. Е. Гибшман. – М. : Дориздат, 1952. – 87 с.
5. ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. – М. : Стандартинформ, 2015. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». – URL : www.kodeks.ru (дата обращения : 01.06.2018).
6. СТО 002494680-0032–2004. Сталежелезобетонные пролётные строения автодорожных мостов. Реконструкция и ремонт. – М. : ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова», 2004. – 68 с. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». – URL : www.kodeks.ru (дата обращения : 01.06.2018).
7. Кокодеев А. В. Анализ причин возникновения дефектов и повреждений сталежелезобетонных конструкций транспортных сооружений, влияющих на их несущую способность и долговечность / А. В. Кокодеев, В. В. Раткин // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2014. – № 4 (8). – С. 22–30.
8. Белый А. А. Основные положения методики прогнозирования сроков службы эксплуатируемых железобетонных мостовых сооружений / А. А. Белый // Наука и бизнес : пути развития. – 2016. – № 10 (64). – С. 9–20.
9. Белый А. А. Анализ технического состояния эксплуатируемых железобетонных мостовых сооружений Санкт-Петербурга / А. А. Белый // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2017. – № 3. – С. 37–44.
10. Белый А. А. Вероятностное прогнозирование технического состояния эксплуатируемых железобетонных мостовых сооружений мегаполиса / А. А. Белый // Вестн. гражданских инженеров. – 2017. – № 2 (61). – С. 64–74.
11. Шестовицкий Д. А. Современные подходы к прогнозированию срока службы железобетонных мостов / Д. А. Шестовицкий // Материалы межвуз. науч.-практич. конференции «Инновационные технологии в мостостроении и дорожной инфра-

структуре». Санкт-Петербург, 30 января 2014 г. – М. : Редакт.-издат. центр Министерства обороны РФ, 2014. – С. 298–308.

12. Стрелецкий Н. Н. Сталежелезобетонные мосты : монография / Н. Н. Стрелецкий. – М. : Транспорт, 1965. – 376 с.

13. Стрелецкий Н. Н. Сталежелезобетонные пролетные строения мостов : монография. – 2-е изд., перераб. и доп. / Н. Н. Стрелецкий. – М. : Транспорт, 1981. – 360 с.

14. СНиП 2.05.03–84*. Мосты и трубы. – М. : ГУП ЦПП, 2000. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». – URL : www.kodeks.ru (дата обращения : 01.06.2018).

15. СТП 015–2001. Технология устройства упоров в виде круглых стержней с головкой из импортных материалов в конструкциях мостов. – М. : Корпорация «Трансстрой», 2002. – Доступ из справ.-правовой системы «Кодекс». – URL : www.kodeks.ru (дата обращения : 01.06.2018).

16. СТП 016–2002. Технология устройства упоров в виде круглых стержней с головкой из отечественных материалов в конструкциях мостов. – М. : Корпорация «Трансстрой», 2002. – Доступ из справ.-правовой системы «Кодекс». – URL : www.kodeks.ru (дата обращения : 01.06.2018).

17. Патент № 2110639 РФ. Стыковое соединение монолитной железобетонной плиты и стальной балки сталежелезобетонного пролетного строения моста / А. В. Кручинкин, В. П. Егоров, В. Г. Решетников. – № 97108669/03 ; заявл. 02.06.1997 г. ; опубл. 10.05.1998 г. – Бюл. № 13.

18. ОДМ 218.4.003–2009. Рекомендации по объединению металлических главных балок с монолитной железобетонной плитой посредством непрерывных гребенчатых упоров в сталежелезобетонных пролетных строениях мостов. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». – URL : www.kodeks.ru (дата обращения : 01.06.2018).

19. Быстров В. А. Совершенствование конструкций и расчета элементов сталежелезобетонных мостов : монография / В. А. Быстров. – Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. – 182 с.

20. Бычковский Н. Н. Сталежелезобетонные мосты : монография / Н. Н. Бычковский, В. П. Акатов, В. П. Величко и др. – Саратов : СГТУ, 2007. – 592 с.

21. Корнеев М. М. Сталежелезобетонные мосты : теор. и практич. пособие по проектированию / М. М. Корнеев. – СПб. : ПГУПС, 2015. – 400 с.

22. EN 1994-2:2005. Eurocode 4 : Design of composite steel and concrete structures. – Pt 2 : General rules and rules for bridges. – URL : <http://www.phd.eng.br/wp/content/uploads/2015/12/en/en.1994.2.2005.pdf> (дата обращения : 01.06.2018).

23. BD 61/10 : Vol. 3, Sect. 4, Pt 16. The assessment of composite highway bridges and structures. – URL : <http://www.standartsforhighways.co.uk/ha/standarts/DMRB/vol13/section4/bd110.pdf> (дата обращения : 01.06.2018).

24. Шишов М. А. Особенности расчета и проектирования шва объединения железобетонной плиты со стальной конструкцией в сталежелезобетонных пролетных строениях автодорожных мостов / М. А. Шишов, А. А. Галимзянов // Транспортное строительство. – 2016. – № 3. – С. 3–6.

25. Лыкова А. В. Анализ способов объединения бетона и стали в сталежелезобетонных мостах / А. В. Лыкова, Л. П. Абашева // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2016. – № 2. – С. 86–91.

26. Морид А. М. Исследование работы сталежелезобетонных пролетных строений мостов в программном комплексе Femap & Nastran / А. М. Морид, В. И. Попов // Наука и современность. – 2012. – № 15-1. – С. 122–131.

27. Ростовых Г. Н. Совершенствование методики расчета гибких упоров в конструкциях сталежелезобетонных мостов / Г. Н. Ростовых // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2007. – Вып. 3. – С. 81–88.

28. Копырин В. Н. Производство новой конструкции упоров для сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов / В. Н. Копырин, В. К. Сидоров, Б. Ф. Калашников // Транспортное строительство. – 1999. – № 5. – С. 7–9.

29. Кручинкин А. В. Новая технология объединения железобетона и стали в пролетных строениях мостов / А. В. Кручинкин, В. Г. Решетников, Б. М. Вейнблат и др. // Транспортное строительство. – 2003. – № 12. – С. 18–19.

30. Кручинкин А. В. Сталежелезобетонные мосты: проблемы и перспективы развития / А. В. Кру-

чинкин, А. С. Платонов, В. Г. Решетников и др. // Вестн. мостостроения. – 2010. – № 1. – С. 24–30.

31. Патент № 2143023 РФ. Объединенное сталежелезобетонное пролётное строение моста / П. П. Куракин, В. Н. Коротин, В. В. Чаленко и др. – № 99109291/03 ; заявл. 14.05.1999 г. ; опубл. 20.12.1999 г. – Бюл. № 35.

32. Шмуклер В. С. Применение новой конструкции сталежелезобетонного пролётного строения при капитальном ремонте моста / В. С. Шмуклер, В. Н. Бабаев, С. М. Евель и др. // Нові технології будівництва. – 2016. – № 31. – С. 38–49.

33. Решетников В. Г. Новые эффективные конструкции сталежелезобетонных пролётных строений мостов : автореф. дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.23.11 / В. Г. Решетников. – М. : ФУГП «Союздорпроект», 2002. – 24 с.

34. Хеллмарк Р. Сборные сталежелезобетонные мосты / Р. Хеллмарк, П. Колин, М. Нильсон // Мостостроение мира. – 2010. – № 2. – С. 71–80.

35. Ефимов П. П. Проектирование мостов : монография / П. П. Ефимов. – Омск : ООО «Дантэя», 2006. – 111 с.

36. Большаков К. П. Совершенствование способов объединения сборной проезжей части сталежелезобетонных мостов / К. П. Большаков, Э. М. Гитман // Транспортное строительство. – 1979. – № 10. – С. 10–13.

37. Чепурнов К. Г. Новые конструктивно-технологические решения сборной железобетонной плиты проезжей части сталежелезобетонных пролётных строений автодорожных и городских мостов / К. Г. Чепурнов, С. К. Пшеничников, Г. К. Аلكинов и др. // Транспортное строительство. – 1997. – № 2. – С. 14–18.

38. Патент № 2133792 РФ. Соединительное устройство сборной железобетонной плиты сталежелезобетонного моста / А. В. Кручинкин, А. С. Платонов. – № 97119706/03 ; заявл. 28.11.1997 г. ; опубл. 27.07.1999 г. – Бюл. № 21.

39. Патент № 2259438 РФ. Сборная железобетонная плита моста / В. Г. Решетников, А. А. Потапкин. – № 2004116376/03 ; заявл. 01.06.2004 г. ; опубл. 27.08.2005 г. – Бюл. № 24.

40. Патент № 2184187 РФ. Соединительное устройство сборной железобетонной плиты со стальной балкой сталежелезобетонного мо-

ста / Г. Л. Шелкович. – № 2001103113/03 ; заявл. 06.02.2001 г. ; опубл. 27.06.2002 г. – Бюл. № 18.

41. Патент № 1379397 СССР. Стыковое соединение металлической балки с железобетонной сборной плитой / Д. К. Даулас. – № 4114229/29-33 ; заявл. 04.09.1986 г. ; опубл. 07.03.1988 г. – Бюл. № 9.

42. Патент № 156030 РФ. Упор сталежелезобетонного пролётного строения моста / И. В. Решетников, А. В. Решетников, В. Г. Решетников. – № 2014149767/03 ; заявл. 10.12.2014 г. ; опубл. 27.10.2015 г. – Бюл. № 30.

43. Патент № 158879 РФ. Конструкция объединения железобетонной плиты со стальной балкой моста / А. Г. Злотников, Ю. Ю. Крылов, А. А. Федоров и др. – № 2015126302/03 ; заявл. 30.06.2015 г. ; опубл. 20.01.2016 г. – Бюл. № 2.

References

1. *Construction rules 159.1325800.2014. Code of practice. Steel-reinforced concrete superstructures of motor road bridges. Design rules.* Moscow, FAU FTsS Publ., 2014. Accessed via legal reference system Kodeks on 01.06.2018. (In Russian)

2. *Construction rules 35.13330.2011. Code of practice. Bridges and pipes.* Revised edition of code of practice SNiP 2.05.03–84*. Moscow, Minregion Rossii Publ., OAO TsPP Publ., 2011. Accessed via legal reference system Kodeks on 01.06.2018. (In Russian)

3. *EN 1994-1-1:2004. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Pt 1-1: General rules and rules for buildings.* URL: <http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1994.1.1.2004.pdf> (accessed: 01.06.2018).

4. Gibshman E. E. *Mosty so stalnymi balkami, ob'edinennymi s zhelezobetonnoi plitoy* [Bridges with steel beams combined with reinforced concrete slab]. Moscow, Dorizdat Publ., 1952, 87 p. (In Russian)

5. *State standard GOST 27751–2014. Nadezhnost stroitelnykh konstruktii i osnovanii* [Reliability of engineering structures and foundations]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. Accessed via legal reference system Kodeks on 01.06.2018. (In Russian)

6. *Company standard STO 002494680–0032–2004. Stalezhelezobetonnye proletnye stroeniia avtodorozhnykh mostov. Rekonstruktsiia i remont* [Steel-reinforced

concrete superstructures of motor road bridges. *Reconstruction and repair*. Moscow, ZAO TsNIIPSK im. Melnikova Publ., 2004. Accessed via legal reference system Kodeks on 01.06.2018. (In Russian)

7. Kokodeev A. V. & Ratkin V. V. Analiz prichin vozniknoveniia defektov i povrezhdenii stalezhelezbetonnykh konstruksii transportnykh sooruzhenii, vliiaushchuih na ikh nesushchuiu sposobnost i dolgovechnost [Analysis of the causes of appearance of defects and damage in steel-reinforced concrete structures of transport facilities affecting their bearing capacity and life duration]. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitelstve* [Technical regulation in transport construction], 2014, no. 4 (8), pp. 22–30. (In Russian)

8. Belyi A. A. Osnovnye polozheniia metodiki prognozirovaniia srokov sluzhby ekspluatiruemykh zhelezbetonnykh mostovykh sooruzhenii [Fundamental principles of a method for forecasting service terms of reinforced concrete bridgework in operation]. *Nauka i biznes: puti razvitiia* [Science and business: ways of development], 2016, no. 10 (64), pp. 9–20. (In Russian)

9. Belyi A. A. Analiz technicheskogo sostoiianiia ekspluatiruemykh zhelezbetonnykh mostovykh sooruzhenii Sankt-Peterburga [Analysis of technical state of Saint Petersburg's reinforced concrete bridgework in operation]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova* [Herald of the V. G. Shukhov Belgorod State State Technological University], 2017, no. 3, pp. 37–44. (In Russian)

10. Belyi A. A. Veroiatnostnoe prognozirovanie tekhnicheskogo sostoiianiia ekspluatiruemykh zhelezbetonnykh mostovykh sooruzhenii megapolisa [Probabilistic forecasting of the technical state of in-operation reinforced concrete bridgework in a megalopolis]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Civil engineers herald], 2017, no. 2 (61), pp. 64–74. (In Russian)

11. Shestovitskii D. A. Sovremennye podkhody k prognozirovaniiu sroka sluzhby zhelezbetonnykh mostov [Contemporary approaches to forecasting the service terms of reinforced concrete bridges]. *Materialy mezhvuz. nauch.-praktich. konferentsii "Innovatsionnye tekhnologii v mostostroenii i dorozhnoi infrastruktura"* [Coll. papers of inter-university sci.-practic. conference "Innovative technologies in bridge-building and road infrastructure"]. Saint Petersburg, Jan. 30, 2014. Moscow, Ministerstvo Oborony RF Publ., 2014, pp. 298–308. (In Russian)

12. Streletskii N. N. *Stalezhelezbetonnyye mosty* [Steel-reinforced concrete bridges]. Moscow, Transport Publ., 1965, 376 p. (In Russian)

13. Streletskii N. N. *Stalezhelezbetonnyye proletnye stroeniia mostov* [Steel-reinforced concrete bridge superstructures]. 2nd ed., revised and expanded. Moscow, Transport Publ., 1981, 360 p. (In Russian)

14. *Code of practice SNiP 2.05.03–84*. Mosty i truby* [Bridges and pipes]. Moscow, OAO TsPP Publ., 2008. Accessed via legal reference system Kodeks on 01.06.2018. (In Russian)

15. *Process flow diagram STP 015–2001. Tekhnologiya ustroistva uporov v vide kruglykh sterzhnei s golovkoi iz importnykh materialov v konstruksiiakh mostov* [Technology for designing terminal screws in the shape of round rods with a tip made from imported materials in bridge engineering]. Moscow, Korporatsiia Transstroii Publ., 2002. Accessed via legal reference system Kodeks on 01.06.2018. (In Russian)

16. *Process flow diagram STP 016–2002. Tekhnologiya ustroistva uporov v vide kruglykh sterzhnei s golovkoi iz otechestvennykh materialov v konstruksiiakh mostov* [Technology for designing terminal screws in the shape of round rods with a tip made from domestic materials in bridge engineering]. Moscow, Korporatsiia Transstroii Publ., 2002. Accessed via legal reference system Kodeks on 01.06.2018. (In Russian)

17. Kruchinkin A. V., Egorov V. P. & Reshetnikov V. G. *Patent N 2110639 Russian Federation. Stykovoie soedinenie monolitnoi zhelezbetonnoi plity i stalnoi balki stalezhelezbetonnogo proletnogo stroeniia mosta* [Abutment joint of cast reinforced concrete slab and steel beam of steel-reinforced concrete bridge superstructure]. Declared 02.06.1997; published 10.05.1998. Bulletin no. 13. (In Russian)

18. *Road-industry methodological document ODM 218.4.003–2009. Rekomendatsii po ob'edineniiu metallicheskh glavnykh balok s monolitnoi zhelezbetonnoi plitoy posredstvom nepreryvnykh grebenchatykh uporov v stalezhelezbetonnykh stroeniakh mostov* [Recommendations on combining metallic main beams with cast reinforced concrete slab by continuous comb-shaped terminal screws in steel-reinforced concrete bridge superstructures]. Unpublished document. Accessed via legal reference system Kodeks on 01.06.2018. (In Russian)

19. Bystrov V.A. *Sovershenstvovanie konstrukttsii i rascheta elementov stalezhelezobetonnykh mostov* [Perfecting design and engineering of elements of steel-reinforced concrete bridges]: monograph. Leningrad, Leningrad University Publ., 1987, 182 p. (In Russian)
20. Bychkovskii N.N., Akatov V.P., Velichko V.P. et al. *Stalezhelezobetonnye mosty* [Steel-reinforced concrete bridges]. Saratov, SGTU Publ., 2007, 592 p. (In Russian)
21. Korneev M.M. *Stalezhelezobetonnye mosty: teoreticheskoe i prakticheskoe posobie po proektirovaniu* [Steel-reinforced concrete bridges: theoretical and practical guidebook on design]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2015, 400 p. (In Russian)
22. EN 1994-2:2005. *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Pt 2: General rules and rules for bridges*. URL: <http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1994.2.2005.pdf> (accessed: 01.06.2018).
23. BD 61/10: Vol. 3, Sect. 4, Pt 16. *The assessment of composite highway bridges and structures*. URL: <http://www.standardsforhighways.co.uk/ha/standards/DMRB/vol3/section4/bd6110.pdf> (accessed: 01.06.2018).
24. Shishov M.A. & Galimzyanov A.A. Osobennosti rascheta i proektirovaniia shva ob'edineniia zhelezobetonnoi plity so stalnoi konstrukttsiei v stalezhelezobetonnykh proletnykh stroeniakh avtodorozhnykh mostov [Specific features of engineering and designing joint for combining reinforced concrete slab with steel structure in steel-reinforced concrete superstructures of motor road bridges]. *Transportnoe stroitelstvo* [Transport construction], 2016, no. 3, pp. 3–6. (In Russian)
25. Lykova A.V. & Abasheva L.P. Analiz sposobov ob'edineniia betona i stali v stalezhelezobetonnykh mostakh [Analysis of methods for combining concrete and steel in steel-reinforced concrete bridges]. *Sovremennye tekhnologii v stroitelstve. Teoriia i praktika* [Modern technologies in construction. Theory and practice], 2016, no. 2, pp. 86–91. (In Russian)
26. Morid A.M. & Popov V.I. Issledovanie raboty stalezhelezobetonnykh proletnykh stroenii mostov v programmnom komplekse Femap & Nastran [Examination of operation of steel-reinforced concrete superstructures of bridges in Femap & Nastran software system]. *Nauka i sovremennost* [Science and today], 2012, no. 15-1, pp. 122–131. (In Russian)
27. Rostovyykh G.N. Sovershenstvovanie metodiki rascheta gibkikh uporov v konstrukttsiiakh stalezhelezobetonnykh mostov [Perfecting the design methods for shear bolts in steel-reinforced concrete bridge structures]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [Petersburg Transport University Herald]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2007, issue 3, pp. 81–88. (In Russian)
28. Kopyrin V.I., Sidorov V.K. & Kalashnikov B.F. Proizvodstvo novoi konstrukttsii uporov dlia stalezhelezobetonnykh proletnykh stroenii avtodorozhnykh mostov [Production of new design of abutments for steel-reinforced concrete superstructures of motorway bridges]. *Transportnoe stroitelstvo* [Transport construction], 1999, no. 5, pp. 7–9. (In Russian)
29. Kruchinkin A.V., Reshetnikov V.G., Veinblat B.M. et al. Novaia tekhnologiia ob'edineniia zhelezobetona i stali v proletnykh stroeniakh mostov [New technology for combining reinforced concrete and steel in bridge superstructure]. *Transportnoe stroitelstvo* [Transport construction], 2003, no. 12, pp. 18–19. (In Russian)
30. Kruchinkin A.V., Platonov A.S., Reshetnikov V.G. et al. Stalezhelezobetonnye mosty: problemy i perspektivy razvitiia [Steel-reinforced concrete bridges: problems and development perspectives]. *Vestnik mostostroeniia* [Bridge engineering herald], 2010, no. 1, pp. 24–30. (In Russian)
31. Kurakin P.P., Korotin V.N., Chalenko V.V. et al. *Patent N 2143023 Russian Federation. Ob'edinennoe stalezhelezobetonnoe proletnoe stroenie mosta* [Combined steel-reinforced concrete bridge superstructure]. Declared 14.05.1999; published 20.12.1999. Bulletin no. 35. (In Russian)
32. Shmukler V.S., Babaev V.N., Evel' S.M. et al. Primenenie novoi konstrukttsii stalezhelezobetonno proletnogo stroeniia pri kapitalnom remonte mosta [Application of new steel-reinforced concrete superstructure design in major repairs of a bridge]. *Novi tekhnologii budivnytstvi* [New construction technologies], 2016, no. 31, pp. 38–49. (In Russian)
33. Reshetnikov V.G. *Novye effektivnye konstrukttsii stalezhelezobetonnykh proletnykh stroenii mostov* [New efficient technologies for steel-reinforced concrete bridge superstructures]. Extended abstract

of Cand. Eng. Sci. dissertation: 05.23.11. Moscow, FUGP Soiiuzdorproekt Publ., 2002, 24 p. (In Russian)

34. Khellmark R., Kolin P. & Nil'son M. Sbornye stalezhelezobetonnye mosty [Composite steel-reinforced concrete bridges]. *Mostostroenie mira* [World bridge engineering], 2010, no. 2, pp. 71–80. (In Russian)

35. Efimov P.P. *Proektirovanie mostov* [Designing bridges]. Omsk, OOO Danteia Publ., 2006, 111 p. (In Russian)

36. Bol'shakov K.P. & Gitman E.M. Sovershenstvovanie sposobov ob'edineniia sbornoj proezzhei chasti stalezhelezobetonnykh mostov [Perfecting the methods for assembling composite roadway of steel-reinforced concrete bridges]. *Transportnoe stroitelstvo* [Transport construction], 1979, no. 10, pp. 10–13. (In Russian)

37. Chepurinov K.G., Pshenichnikov S.K., Alekinov G.K. et al. Novye konstruktivno-tekhnologicheskie resheniia sbornoj zhelezobetonnoi plity proezzhei chasti stalezhelezobetonnykh avtodorozhnykh i gorodskikh mostov [New engineering and technological solutions of composite reinforced concrete slab of steel-reinforced concrete superstructure of motorway and city bridges' roadway]. *Transportnoe stroitelstvo* [Transport construction], 1997, no. 2, pp. 14–18. (In Russian)

38. Kruchinkin A.V. & Platonov A.S. *Patent N 2133792 Russian Federation. Soedinitelnoe ustroistvo sbornoj zhelezobetonnoi plity stalezhelezobetonного mosta* [Connecting device for composite reinforced concrete slab of a steel-reinforced concrete

bridge]. Declared 28.11.1997; published 27.07.1999. Bulletin no. 21. (In Russian)

39. Reshetnikov V.G. & Potapkin A.A. *Patent N 2259438 Russian Federation. Sbornaia zhelezobetonnaia plita mosta* [Composite reinforced concrete bridge slab]. Declared 01.06.2004; published 27.08.2005. Bulletin no. 24. (In Russian)

40. Shelkovich G.L. *Patent N 2184187 Russian Federation. Soedinitelnoe ustroistvo sbornoj zhelezobetonnoi plity so stalnoi balkoi stalezhelezobetonного mosta* [Connecting device for composite reinforced concrete slab and steel beam of a steel-reinforced concrete bridge]. Declared 06.02.2001; published 27.06.2002. Bulletin no. 18. (In Russian)

41. Daulas D.K. *Patent N 1379397 USSR. Stykovoie soedinenie metallicheskoj balki s zhelezobetonnoi sbornoj plitoy* [Abutment joint of metallic beam and reinforced concrete composite slab]. Declared 04.09.1986; published 07.03.1988. Bulletin no. 9. (In Russian)

42. Reshetnikov I.V., Reshetnikov A.V. & Reshetnikov V.G. *Patent N 156030 Russian Federation. Upor stalezhelezobetonного proleznogo stroeniia mosta* [Abutment of steel-reinforced concrete bridge superstructure]. Declared 10.12.2014; published 27.10.2015. Bulletin no. 30. (In Russian)

43. Zlotnikov A.G., Krylov Yu. Yu., Fedorov A.A. et al. *Patent N 158879 Russian Federation. Konstruktsiia ob'edineniia zhelezobetonnoi plity so stalnoi balkoi mosta* [Design for combining reinforced concrete slab with bridge steel beam]. Declared 30.06.2015; published 20.01.2016. Bulletin no. 2. (In Russian)

КАРАПЕТОВ Эдуард Степанович – канд. техн. наук, доцент, eskar@yandex.ru *АТАНОВ Александр Витальевич – аспирант, a_atanov@inbox.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629-71; 621.314; 621.382

И. Г. Киселев, Д. В. Крылов, Ю. О. Водопьянова

ОСОБЕННОСТИ КОМПОНОВКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СИЛОВЫХ БЛОКОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ С ИСПАРИТЕЛЬНО-ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Дата поступления: 24.09.2018

Решение о публикации: 17.10.2018

Аннотация

Цель: Оптимизация процессов теплообмена установок с испарительно-воздушным охлаждением за счет компоновки силовых блоков и диагностики нарушений теплопереноса. **Методы:** Применялись анализ особенностей компоновки блоков с охладителями типа «двухфазный термосифон» и синтез эксплуатационных особенностей охладителей, приводящих к нарушению работы силовых блоков. **Результаты:** Описаны особенности компоновки силовых блоков с охладителями типа «двухфазный термосифон», необходимые требования по заполнению полости охладителя теплоносителем. Охарактеризован принцип определения теплового сопротивления линии «полупроводниковый прибор–воздушная среда». Проведена оценка теплового состояния конденсаторной части охладителей. **Практическая значимость:** Использование информации об особенностях компоновки и эксплуатации силовых блоков позволит продлить срок службы полупроводниковых преобразовательных установок и диагностировать неисправности на ранних стадиях.

Ключевые слова: Силовые полупроводниковые приборы таблеточного типа, охладитель типа «двухфазный термосифон».

Igor' G. Kiselev, D. Eng. Sci., professor, kiss-tatiana@yandex.ru; Dmitrii V. Krylov, Cand. Eng. Sci., engineer, dontwriteme@mail.ru; *Yuliia O. Vodop'ianova, postgraduate student, julua_gazonn@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) SPECIFIC FEATURES OF CONFIGURATION AND OPERATION OF POWER BLOCKS IN SEMI-CONDUCTIVE CONVERTER INSTALLATIONS WITH FAN AND WET-PAD COOLING

Summary

Objective: Optimisation of heat exchange processes in installations with fan and wet-pad cooling by configuration of power blocks and diagnostics of heat exchange disruption. **Methods:** Analysis of specific features of configuration of blocks with two-phase thermo-siphon type coolers and synthesis of operational features of coolers which provoke disruption of power blocks operation. **Results:** The paper describes specific features of configuration of power blocks with two-phase thermo-siphon type coolers, necessary requirements for filling the cooler's chamber with heat medium. The principle of determining thermal resistance of the line between semi-conductive device and aerial environment is characterized. Thermal condition of coolers' condenser part is evaluated. **Practical importance:** Utilisation of information on specific features of configuration and operation of power blocks will allow extending service term of semi-conductive converter installations and diagnose disruptions at early stages.

Keywords: Semi-conductor button power devices, two-phase thermo-siphon type cooler.

Современная преобразовательная техника железнодорожного транспорта в последние годы имеет тенденцию к замене полупровод-

никовых приборов на таблеточные большей мощности. На локомотивах и моторвагонном подвижном составе железных до-

рог и метрополитенов появляются силовые полупроводниковые приборы (СПП) на токи от 1600 до 2500 А; аналогичная картина наблюдается на тяговых подстанциях электрифицированных железных дорог и метрополитенов. Надежность полупроводникового прибора при высоком качестве его изготовления определяется эффективностью охлаждающих устройств. Для современных СПП характерны большие тепловыделения, превышающие 1 кВт, которые должны быть отведены надежным способом в окружающую среду. Жесткие ограничения на габариты транспортных преобразователей подвижного состава заставляют конструкторов искать выход из затруднительного положения. Созданы различные системы, где полупроводниковый прибор охлаждается жидкостью с помощью специальных охладителей. В дальнейшем теплота в каком-либо теплообменном аппарате передается атмосферному воздуху [1, 2].

Основной элемент каждой полупроводниковой преобразовательной установки (ППУ) представляет собой блок, состоящий из СПП и охладителей. Надежная работа СПП требует эффективных охлаждающих устройств. Приоритетным направлением является ис-

пользование охладителей типа «двухфазный термосифон», работающих по замкнутому испарительно-воздушному циклу при низких внутренних давлениях промежуточного теплоносителя. Они компактны и имеют высокую теплоотводящую способность [2].

Охладитель типа «двухфазный термосифон» состоит из двух зон: испарения и конденсации. Испаритель ДТС (рис. 1) представляет собой параллелепипед, внутренняя полость которого имеет два параллельных канала диаметром 11,2 мм. Конденсатор ДТС – параллельные трубки длиной 207 мм с наружными пластинчатыми ребрами 132×56×0,5 мм. Трубки установлены в испарителе под углом 15° к горизонтальной оси. Полость испарителя вакуумируется до достаточного давления 133 Па и заполняется дистиллированной водой [3, 4].

Критериями выбора охладителей служат их эффективность, надежность и обеспечение оптимальных температурных характеристик. Как видно из рис. 1, последние зависят от тепловых сопротивлений как самого СПП (R_{Π}), определяющего внутренний перепад температур, так и контактного термического сопротивления (R_{κ}) и охладителя (R_o), которые определяют внешний перепад температуры [4].

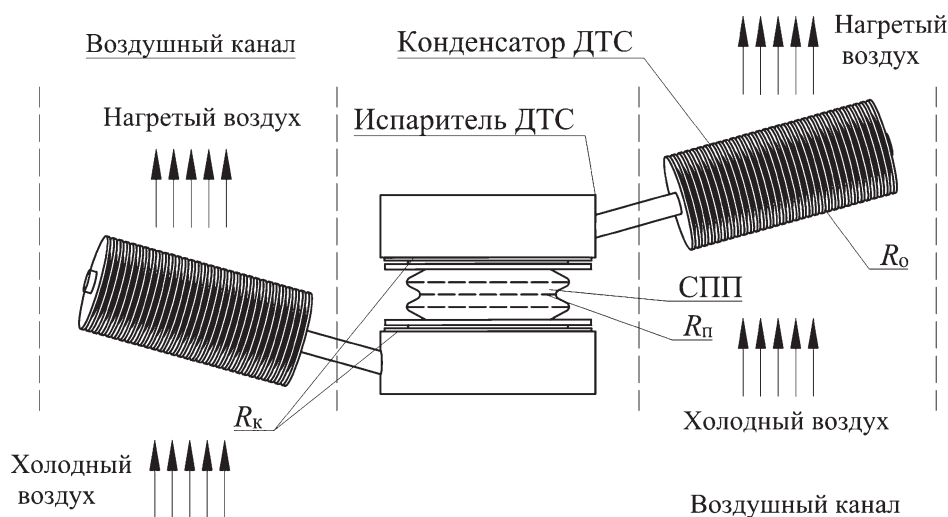


Рис. 1. Схема двустороннего охлаждения СПП: R_{Π} – тепловое сопротивление «полупроводниковая структура–корпус прибора», К/Вт; R_{κ} – тепловое сопротивление «корпус прибора–контактная поверхность охладителя», К/Вт; R_o – тепловое сопротивление «охладитель–окружающая среда», К/Вт

Величины тепловых сопротивлений различных СПП таблеточного типа и охлаждающих устройств приведены в табл. 1 и 2.

Конструкция ДТС позволяет вынести в воздушный канал только их конденсаторы и компоновать различные силовые блоки. На рис. 2 изображен такой блок, использованный в выпрямителе тяговых подстанций железных дорог, устанавливаемый внутри помещения [5, 6].

Между охладителем и СПП размещалась оловянная прокладка. К крайним охладителям прижимались токоведущие шины. Ветвь блока

сжималась типовым прижимным устройством. Конденсаторы охладителей при сборке ветви были развернуты следующим образом: второй снизу относительно первого на угол 180° , а каждый последующий относительно предыдущего на угол $(180 + \alpha)^\circ$, где $0^\circ < \alpha < 90^\circ$. Температура контактной поверхности охладителя с СПП измерялась хромель-копелевыми термопарами в точках 1–6 (рис. 2). Температура воздуха на входе в блок поддерживалась постоянной в пределах $t_{\text{вх}} = T_{\text{ср}} = 25 \pm 2^\circ\text{C}$. Температура воздуха $t_{\text{вх}}$ и над ребрами конденсаторов $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ измерялась ртутными термометрами [6–9].

ТАБЛИЦА 1. Тепловые сопротивления таблеточных СПП

Тип СПП	Диаметр контактной поверхности, мм	Тепловое сопротивление, К/Вт
Д123-200	19	0,06
Д133-500	33	0,036
Д253-1600	50	0,018
Д163-600	63	0,016
Д173-1000	75	0,01
Д183-2500	86	0,008
Д293-3200	100	0,0065

ТАБЛИЦА 2. Тепловые сопротивления охладителей для СПП таблеточного типа

Тепловое сопротивление: контактная поверхность охладителя–охлаждающая среда, К/Вт				
Воздушное охлаждение			Водяное охлаждение	
Тип охладителя	Естественное охлаждение	Скорость воздуха между ребрами 6 м/с	Тип охладителя	Расход воды 3 л/мин
O232	1,120	0,355	OM103	0,06
O123	0,710	0,212	OM104	0,03
O242	0,670	0,236	OM109	0,012
O353	0,355	0,1	OM209	0,0095
Испарительно-воздушное охлаждение				
Тип охладителя		Естественное охлаждение	Скорость воздуха между ребрами 6 м/с	
Алюминиевый ДТС из сплава АД31		0,175	0,05	
Медный ДТС из сплава М1		0,115	0,032	

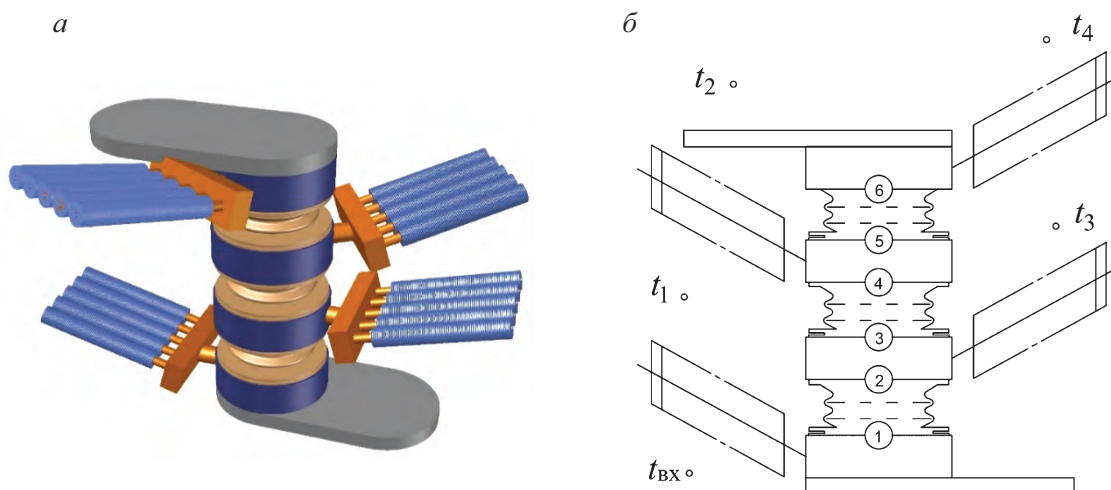


Рис. 2. Наглядное изображение (а) и схема (б) диодного блока (3 СПП – 4 охладителя):
 $t_{вх}$ – температура воздуха на входе; t_{1-4} – температура воздуха над ребрами конденсаторов;
 1, ..., 6 – точки измерения температуры контактной поверхности охладителя с СПП

Экспериментальные значения температур изменялись при прямом постоянном токе в диапазоне от 100 до 730 А. Угол разворота конденсаторов охладителей для снижения габаритных размеров составлял 40 и 60 ° [10].

В настоящее время СПП Д253-1600 применяются с цельнометаллическими охладителями О153-150. Для сравнения серийного охладителя с охладителем ДТС типа О353 теоретически была определена температура контактной поверхности «СПП–охладитель» [11].

Искомые являются величины тепловых потоков, отводимых в анодную и катодную стороны от отдельных СПП, и теплота, рассеиваемая каждым охладителем.

Тепловые сопротивления от полупроводниковой структуры СПП к воздуху складываются из следующих составляющих:

$$R_{\Sigma} = R_{п} + R_{к} + R_{о}.$$

Величины $R_{п}$ и $R_{к}$ считаем априорно заданными и принимаем в соответствии со справочной литературой. Определение теплового сопротивления охладителя осложнено процессами, происходящими в нем, и необходимости учета большого числа факторов, влияющих на интенсивность теплообмена. Наиболее предпочтительным в этом случае является по-

строение расчетно-экспериментальной модели силового модуля.

В процессе экспериментальных исследований были проведены опыты по оптимальному заполнению теплоносителем внутренней полости охладителя типа ДТС с диодами Д253-1600 при минимальном значении теплового сопротивления при различных вариантах компоновки силового блока. Полученные экспериментальные характеристики теплового сопротивления охладителя ДТС в зависимости от массы промежуточного теплоносителя (воды) $R_{о}(M_{пт})$ представлены на рис. 3 [3, 10].

Область оптимального заполнения теплоносителем при естественной конвекции охлаждающего воздуха сдвинута в сторону уменьшения массы теплоносителей и составляет 60–80 % для различных конструкций охладителей типа ДТС вне зависимости от местонахождения прибора СПП на испарителе (сверху/снизу). Увеличение мощности тепловых потерь, отводимых охладителем типа ДТС от СПП, незначительно смещает оптимальное заполнение в область больших значений [11–14]. Недозаполнение теплоносителем до указанного нижнего предела ведет к резкому повышению теплового сопротивления охладителя, как и его значительное переполнение свыше 100 % внутреннего объема испарителя.

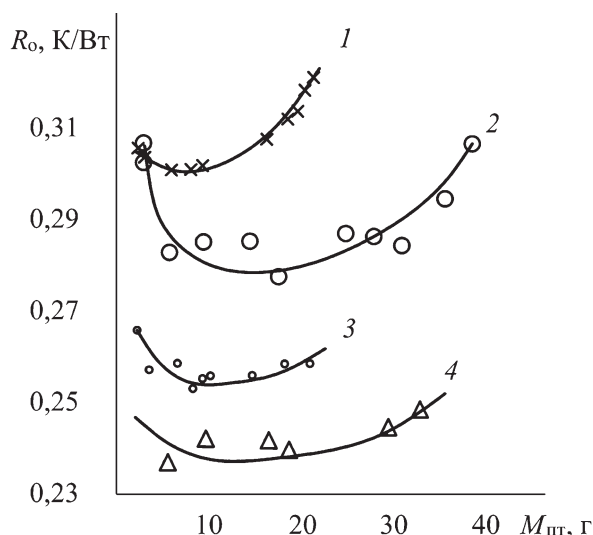


Рис. 3. Зависимость теплового сопротивления охладителя типа ДТС от массы промежуточного теплоносителя (воды) при компоновке:
 1 – ДТС1–СПП (находится снизу); 2 – ДТС1–СПП (расположен сверху); 3 – СПП–ДТС2–СПП; 4 – ДТС3–СПП (размещен снизу)

Оптимальное заполнение охладителя зависит от того, является ли он крайним или средним охладителем в СПП, что унифицирует такие устройства.

Работоспособность СПП на основе ДТС в основном определяется уровнем их вакуумирования. Разгерметизация ДТС и потеря им промежуточного теплоносителя приводят к снижению отвода теплоты от СПП в 4–5 раз, что вызывает рост как контактного термического сопротивления, так и общего температурного перепада в силовом блоке. Определить данный дефект визуальной диагностикой практически невозможно. Поэтому оценка работоспособности охладителей важна, как и контроль за тепловым состоянием СПП. Для диагностирования работоспособности охладителей типа ДТС необходимо оценить тепловое состояние его конденсаторной части. Метод основан на результатах измерений температуры наружных поверхностей конденсатора в его основании с температурой θ_{max} (избыточная температура конденсатора в его основании) и на свободных концах конденсаторных труб с температурой θ_{min} (избыточная температура на свободных концах конденсаторных труб). Основным показателем исправности ДТС выбран относительный параметр Δ , позволяющий судить о работоспособности ДТС, который не должен превышать 2–3 % [5, 15]:

ТАБЛИЦА 4. Результаты диагностирования ДТС при нагреве

Тип охладителя	Нагрузка, %	Показания температуры/относительный параметр		
		$\theta_{max}, К$	$\theta_{min}, К$	$\Delta, \%$
Неисправный ДТС из сплава АД-31	25	52,5	40,1	23,6
	50	78,3	59,5	24,0
	100	133,5	103,8	22,2
Неисправный ДТС из сплава М1	25	51,9	40,3	22,3
	50	69,6	52,5	24,5
	100	132,1	102,4	22,5
ДТС из сплава М1 с частичной разгерметизацией	25	44,8	42,5	5,1
	50	68,4	64,7	5,4
	100	114,6	107,9	5,4
Исправный ДТС из сплава М1	25	37,3	36,7	1,6
	50	55,2	54,3	1,6
	100	108,5	106,6	1,7

$$\Delta = \frac{(\theta_{\max} - \theta_{\min})}{\theta_{\max}} \cdot 100.$$

Более высокие значения параметра Δ свидетельствуют о наличии дефектов ДТС, которые связаны с его разгерметизацией и потерей промежуточного теплоносителя.

Предполагаемый метод бесконтактного диагностирования работоспособности ДТС был испытан на различных конструкциях охладителей, при этом исследовались как работоспособные, так и неисправные охладители. Результаты диагностирования охладителей с использованием переносного радиационного термометра представлены в табл. 4.

Испытания показали, что предложенный метод может быть использован для оценки работоспособности охладителей типа ДТС. Для исправных ДТС показатель качества не превышает допустимых 2–3 %.

На продуктивную работу силовых блоков ППУ влияет множество факторов. Нужно учитывать особенности компоновки силовых блоков, с которой нераздельно связана оптимальная масса промежуточного теплоносителя, необходимого для заполнения охладителя, определяющая интенсивность теплообмена. К важным проблемам относится оценка работоспособности охладителей на различных этапах работы установки. Так как проблема разгерметизации является преобладающей, следует автоматизировать диагностику теплового состояния СПП.

Библиографический список

1. Водопьянова Ю. О. Теплообменные процессы в силовых полупроводниковых преобразовательных установках с испарительно-воздушным охлаждением / Ю. О. Водопьянова, И. Г. Киселев, С. В. Урушев, И. А. Иванов // Бюл. результатов науч. исследований. – 2017. – Вып. 4. – С. 140–147.
2. Панфилов С. А. Эффективное охлаждение новых высокомошных силовых полупроводниковых приборов / С. А. Панфилов // Изв. вузов. Приволжский район. Технические науки. – 2012. – № 4 (24). – С. 57–66.

3. Киселев И. Г. Тенденции совершенствования охлаждающих устройств в преобразовательной технике / И. Г. Киселев // Совершенствование систем охлаждения мощных полупроводниковых преобразователей железнодорожного транспорта : сб. науч. трудов / под ред. И. Г. Киселева. – Л. : ЛИИЖТ, 1988. – С. 5–10.

4. Бурков А. Т. Новый выпрямитель для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог / А. Т. Бурков, Ю. В. Плешаков, В. Н. Черных, Л. М. Юферева // Совершенствование систем охлаждения мощных полупроводниковых преобразователей железнодорожного транспорта : сб. науч. трудов / под ред. И. Г. Киселева. – Л. : ЛИИЖТ, 1988. – С. 10–19.

5. Киселев И. Г. Математическое моделирование контактного теплообмена в полупроводниковых преобразовательных установках железнодорожного транспорта / И. Г. Киселев, Д. В. Крылов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2012. – Вып. 1. – С. 66–71.

6. Kiselev I. Coolers for power semiconductor modules of IGBT type / I. Kiselev, A. Buyanov, A. Timofeev // Fifth International conference “Inconventional electromechanical and electrical systems”. – Szczecin (Poland), 2001, Sept. 05–08. – P. 639–642.

7. Буянов А. Б. Двухфазные термосифоны для модулей IGBT вспомогательного электропривода электровоза ЭП200 / А. Б. Буянов, А. А. Тимофеев // Тез. докл. Междунар. симпозиума «Eltrans–2001, электрификация и развитие железнодорожного транспорта России. Традиции, современность, перспективы». – СПб. : ПГУПС, 2001. – С. 115.

8. Киселев И. Г. Полупроводниковые преобразовательные устройства с испарительно-воздушным охлаждением для железнодорожного транспорта / И. Г. Киселев, А. Б. Буянов, Д. В. Никольский // Инженер путей сообщения. – 1999. – № 8. – С. 32–34.

9. Исакеев А. И. Алюминиевый охладитель силовых полупроводниковых приборов / А. И. Исакеев, И. Г. Киселев, А. Б. Буянов, В. В. Фролов, А. В. Носков // Изв. вузов СССР. Электромеханика. – 1986. – № 7. – С. 84–87.

10. Буянов А. Б. Полупроводниковый модуль для реверсивного преобразователя электроприво-

да / А. Б. Буянов, П. Л. Жуков, В. Г. Болдырев // Изв. вузов СССР. Энергетика. – 1989. – № 12. – С. 40–41.

11. Киселев И. Г. Расчеты нагрева и охлаждения полупроводниковых преобразовательных установок железнодорожного транспорта / И. Г. Киселев, А. Б. Буянов. – СПб. : ПГУПС, 2001. – 80 с.

12. Буянов А. Б. Внутренние процессы теплообмена в двухфазном термосифоне / А. Б. Буянов, И. В. Митрофанова // Теплообмен в энергетических установках подвижного состава железных дорог и метрополитенов / под ред. И. Г. Киселева. – СПб. : ПГУПС, 1993. – С. 28–39.

13. Киселев И. Г. Тепловые режимы силового оборудования опытного трехвагонного поезда с асинхронным приводом / И. Г. Киселев, П. В. Ефимов, А. Б. Буянов и др. // Теплообмен в энергетических установках подвижного состава железных дорог и метрополитенов / под ред. И. Г. Киселева. – СПб. : ПГУПС, 1993. – С. 51–62.

14. Буянов А. Б. Сравнение технических показателей различных систем охлаждения силовых преобразователей локомотивов / А. Б. Буянов, В. П. Янов, И. И. Талья и др. // Электровозостроение. – 1991. – Т. 32. – С. 197–208.

15. Киселев И. Г. Тяговые полупроводниковые преобразователи с испарительно-воздушным охлаждением / И. Г. Киселев, А. Б. Буянов // Труды 2-й Междунар. науч.-технич. конференции «Нетрадиционные электромеханические и электрические системы». – Щецин (Польша), 1996. – С. 91–97.

References

1. Vodop'ianova Yu. O., Kiselev I. G., Urushev S. V. & Ivanov I. A. Termoobmennye protsessy v silovykh poluprovodnikovyykh preobrazovatelnykh ustanovkakh s isparitelno-vozdushnym okhlazhdeniem [Thermal exchange processes in power semi-conductive converter installations with fan and wet-pad cooling]. *Biulleten rezultatov nauch. issledovaniy* [Sci. research results bulletin], 2017, issue 4, pp. 140–147. (In Russian)

2. Panfilov S. A. Effektivnoye okhlazhdeniye novykh vysokomoshchnykh silovykh poluprovodnikovyykh priborov [Efficient cooling of new high-capacity semiconductor power devices]. *Izvestiya vuzov. Privolzhskii region. Tekhnicheskie nauki* [Univ. proc. Volga region.

Engineering sciences], 2012, no. 4 (24), pp. 57–66. (In Russian)

3. Kiselev I. G. Tendentsii sovershenstvovaniia okhlazhdaiushchikh ustroystv v preobrazovatelnoi tekhnike [Trends in perfecting cooling devices in converter equipment]. *Sovershenstvovanie sistem okhlazhdeniia moshchnykh poluprovodnikovyykh preobrazovatelei zheleznodorozhnogo transporta* [Perfecting cooling systems of high-capacity semi-conductive converters in railway transport]. Ed. by I. G. Kiselev. Leningrad, LIIZhT Publ., 1988, pp. 5–10. (In Russian)

4. Burkov A. T., Pleshakov Iu. V., Chernykh V. N. & Iufereva L. M. Novyi vypriamitel dlia tiagovykh podstantsii elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog [New rectifier for traction substations of electrified railways]. *Sovershenstvovanie sistem okhlazhdeniia moshchnykh poluprovodnikovyykh preobrazovatelei zheleznodorozhnogo transporta* [Perfecting cooling systems of high-capacity semi-conductive converters in railway transport]. Ed. by I. G. Kiselev. Leningrad, LIIZhT Publ., 1988, pp. 10–19. (In Russian)

5. Kiselev I. G. & Krylov D. V. Matematicheskoe modelirovaniye kontaktnogo teploobmena v poluprovodnikovyykh preobrazovatelnykh ustanovkakh zheleznodorozhnogo transporta [Mathematical simulation of contact heat exchange in semi-conductive converter installations of railway transport]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [Peterburg Transport Univeristy Herald]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2012, vol. 1, pp. 66–71. (In Russian)

6. Kiselev I., A. Buyanov & Timofeev A. Coolers for power semiconductor modules of IGBT type. *Fifth International conference "Inconventional electro-mechanical and electrical systems"*. Szczecin (Poland), 2001, Sept. 05–08, pp. 639–642.

7. Buianov A. B. & Timofeev A. A. Dvukhfaznye termosifony dlia modulei IGBT vspomogatelnogo elektropivoda elektrovoza EP 200 [Two-phase thermosiphons for IGBT modules of secondary electric drive of EP200 electric locomotive]. *Paper abstracts of Inter. symposium "Eltrans–2001, elektrifikatsiia i razvitie zheleznodorozhnogo transporta Rossii. Traditsii, sovremennost, perspektivy"* [Eltrans–2001, electrification and development of Russia's railway transport. Traditions, modernity, perspectives]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2001, p. 115. (In Russian)

8. Kiselev I. G., Buianov A. B. & Nikol'skii D. V. Poluprovodnikovye preobrazovatelnye ustroystva s isparitelno-vozdushnym okhlazhdeniem dlia zheleznodorozhnogo transporta [Semi-conductive converter installations with fan and wet-pad cooling for railway transport]. *Inzhener putei soobshcheniia* [Transport engineer], 1999, no. 8, pp. 32–34. (In Russian)
9. Isakeev A. I., Kiselev I. G., Buianov A. B., Frolov V. V. & Noskov A. V. Aliuminievyi okhladitel silovykh poluprovodnikovyykh priborov [Aluminum cooler for semi-conductor power devices]. *Izvestiia vuzov SSSR. Elektromekhanika* [Proc. of the USSR univ. Electrical engineering], 1986, no. 7, pp. 84–87. (In Russian)
10. Buianov A. B., Zhukov P. L. & Boldyrev V. G. Poluprovodnikovyi modul dlia reversivnogo preobrazovatelya elektroprivoda [Semi-conductive module for reversible electric driver converter]. *Izvestiia vuzov SSSR. Energetika* [Proc. of the USSR univ. Energy engineering], 1989, no. 12, pp. 40–41. (In Russian)
11. Kiselev I. G. & Buianov A. B. *Raschety nagreva i okhlazhdeniia poluprovodnikovyykh preobrazovatelnykh ustanovok zheleznodorozhnogo transporta* [Calculations of heating and cooling of semi-conductive converter devices on railway transport]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2001, 80 p. (In Russian)
12. Buianov A. B. & Mitrofanova I. V. Vnutrennie protsessy teploobmena v dvukhfaznom termosifone [Internal thermal exchange processes in two-phase thermosiphon]. *Teploobmen v energeticheskikh ustanovkakh podvizhnogo sostava zheleznykh dorog i metropolitenov* [Thermal exchange in power-producing units of railway and metro services' rolling stock]. Ed. by I. G. Kiselev. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 1993, pp. 28–39. (In Russian)
13. Kiselev I. G., Efimov P. V., Buianov A. B. et al. Teplovye rezhimy silovogo oborudovaniia opytного trekhvagonnogo poezda s asinkhronnym privodom [Thermal regimes of power facilities of an experimental three-carriage train with asynchronous drive]. *Teploobmen v energeticheskikh ustanovkakh podvizhnogo sostava zheleznykh dorog i metropolitenov* [Thermal exchange in power-producing units of railway and metro services' rolling stock]. Ed. by I. G. Kiselev. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 1993, pp. 51–62. (In Russian)
14. Buianov A. B., Ianov V. P., Tal'ia I. I. et al. Sravnenie tekhnicheskikh pokazatelei razlichnykh sistem okhlazhdeniia silovykh preobrazovately lokomotivov [Comparison of technical indices of various cooling systems of locomotive power converters]. *Elektrovozostroyeniye* [Electric locomotive engineering], 1991, vol. 32, pp. 197–208. (In Russian)
15. Kiselev I. G. & Buianov A. B. Tiagovye poluprovodnikovye preobrazovately s isparitelno-vozdushnym okhlazhdeniem [Traction semi-conductive converters with fan and wet-pad cooling]. *Trudy 2-oi Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konferentsiya "Netraditsionnye elektromekhanicheskie i elektricheskie sistemy"* [Proc. of the 2nd International sci.-technical conference "Unconventional electromechanical and electrical systems"]. Szczecin (Poland), 1996, pp. 91–97. (In Russian)

КИСЕЛЕВ Игорь Георгиевич – д-р техн. наук, профессор, kiss-tatiana@yandex.ru; КРЫЛОВ Дмитрий Витальевич – канд. техн. наук, инженер, dontwrite@mail.ru; *ВОДОПЬЯНОВА Юлия Олеговна – аспирант, julia_gazonn@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 004.056

А. А. Корниенко, А. Б. Никитин, С. В. Диасамидзе, Е. Ю. Кузьменкова**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ АТАК
НА РАСПРЕДЕЛЕННУЮ ИНФОРМАЦИОННУЮ СИСТЕМУ**

Дата поступления: 02.10.2018

Решение о публикации: 17.10.2018

Аннотация

Цель: Оценка степени защищенности распределенной информационной системы от компьютерных атак с учетом всех особенностей построения и функционирования этой системы, в первую очередь использования в ней различных типов сетей, включая и открытые сетевые соединения.

Методы: Применяется математическое моделирование на основе марковских процессов применительно к процессу компьютерной атаки. **Результаты:** Предлагаемый метод апробирован на примере атаки сетевого червя Net-Worm.Win32.Sasser как одной из классических компьютерных атак с типовым набором параметров. Построена математическая модель имитации компьютерной атаки на распределенную информационную систему, включающая безопасные и потенциально опасные состояния системы и учитывающая вероятности реализации конкретных угроз безопасности для такой системы с заданными структурно-функциональными характеристиками и особенностями ее функционирования. **Практическая значимость:** Разработаны обобщенная методика моделирования компьютерной атаки и прототип программного модуля моделирования компьютерной атаки и реагирования на нее, что является актуальным для дальнейшего развития распределенных систем.

Ключевые слова: Распределенная информационная система, моделирование компьютерных атак, марковский процесс, граф переходов, цепь переходов, вероятность перехода, состояния системы, сетевой червь.

Anatolii A. Kornienko, D. Eng. Sci., professor; Aleksandr B. Nikitin, D. Eng. Sci., professor; *Svetlana V. Diasamidze, Cand. Eng. Sci., senior lecturer, sv.diass99@ya.ru; Elena Yu. Kuz'menkova, student (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) SIMULATION OF COMPUTER ATTACKS ON DISTRIBUTED SOFTWARE

Summary

Objective: Evaluation of the degree of protection of distributed software from computer attacks accounting for all specific features of design and functioning of this system, primarily its use of various types of networks, including open network connections. **Methods:** Mathematical simulation based on Markov processes is applied to the process of computer attack. **Results:** The proposed method is put to evaluation test using the example of Net-Worm.Win32.Sasser attack as one of the classic computer attacks with a conventional set of parameters. A mathematical model of imitation computer attack on distributed software is built, including safe and potentially dangerous states of the system and accounting for probabilities of realization of concrete security threats for such a system with set structural and functional characteristics and specific features of its functioning. **Practical importance:** A generalised method for simulating of a computer attack and a prototype program module for simulating computer attack and reaction to it were developed, which is essential for further development of distributed systems.

Keywords: Distributed software, simulation of computer attacks, Markov process, transition graph, skip chain, transition probability, states of the system, network worm.

Введение

В настоящее время вопросы защиты распределенных информационных систем (РИС) от компьютерных атак приобретают все большее значение. Одним из наиболее важных направлений в этой сфере считается разработка методов и средств, позволяющих обнаружить, смоделировать, проанализировать и оценить факт начала и проведения атаки на систему.

Распределенная система в широком смысле представляет собой набор независимых компьютеров, представляющий их пользователям как единая система. РИС – это совокупность взаимодействующих друг с другом программных компонент, каждая из которых может рассматриваться как программный модуль или приложение, исполняемое в рамках отдельного процесса. Пользователи и приложения могут работать в системе независимо от того, где и когда происходит это взаимодействие. Но все РИС должны иметь ряд характеристик, которые и являются отличительными чертами таких систем: сокрытие от конечных пользователей различий между компьютерами и способов связи между ними; относительно легкое масштабирование системы; невозможность отказа всей системы при выходе из строя некоторого отдельного элемента РИС.

Так как под РИС подразумевают взаимосвязанный набор автономных компьютеров, процессов или процессоров, то их можно называть узлами РИС. Чтобы быть взаимосвязанными, узлы должны иметь возможность обмениваться информацией, т. е. быть соединенными коммутирующей аппаратурой (коммуникационными модулями, каналами связи, концентраторами, межсетевыми экранами, шлюзами и т. д.).

Примерами РИС разного уровня в информационной инфраструктуре железнодорожного транспорта могут служить такие автоматизированные системы управления предприятием как автоматизированная система управления пассажирскими перевозками (АСУ «Экспресс-3»), единая автоматизированная система документооборота ОАО «РЖД» (ЕАСД) и некоторые

автоматизированные системы, входящие в состав системы организации движения поездов (СОДП) [1].

В настоящее время не существует общепринятых формальных, математических или автоматизированных методов для моделирования, оценивания и анализа безопасности системы, кроме наиболее простых, основанных на простых математических алгоритмах. В случае сложных информационных систем такие алгоритмы не применяются из-за больших затрат времени на их реализацию. Поэтому для оценивания безопасности систем используются методы, предполагающие экспертную оценку системы квалифицированными специалистами, что является чрезвычайно дорогостоящим.

Применение марковских процессов привлекает многих исследователей в области информационной безопасности, так как описание случайных процессов в виде вероятностных переходов из одного состояния системы в другое – наиболее удобный метод для моделирования атак на РИС. К тому же при таком математическом методе считается, что при переходе в другое состояние система не учитывает обстоятельства того, как она попала в него. Именно это условие делает такой подход применимым для распределенных систем, в отличие от методов, основанных на более сложных математических алгоритмах, например вероятностных автоматах и нейронных сетях.

Основные подходы к моделированию компьютерных атак

Для обеспечения более высокого уровня информационной безопасности РИС и обнаружения факта наличия ошибок, уязвимостей или недекларированных возможностей в их программном обеспечении проектируются и создаются методы и средства, при помощи которых можно будет не допустить нарушения безопасности системы. Именно на этапе разработки систем задачам поиска и исследования уязвимостям уделяется весьма боль-

шое внимание. Существуют методики и программные средства, позволяющие исключить ошибки использования языка или внешних интерфейсов (в частности, Microsoft Prefast) и устранить значительное количество ошибок, связанных с логикой обработки данных, реализацией протоколов и т. д. (PEACH и SPIKE). Однако многие автоматизированные методы дают возможность оценивать безопасность систем только в простых случаях. Методы, основанные на экспертной оценке со стороны квалифицированных специалистов, достаточно дорогие и занимают значительное время. Именно по этим причинам уже более 10 лет ведутся исследования в области моделирования компьютерных атак [2, 3].

Моделированию компьютерных атак на основе разных математических моделей, которые имеют как преимущества, так и недостатки, посвящен ряд научных работ.

Е. П. Тумоян [4] решает задачу теории автоматов для моделирования атак. Теория автоматов наиболее просто может описать проведение компьютерных атак на систему, однако прямая реализация подобной модели для большинства реальных информационных систем невозможна вследствие того, что информация о состоянии системы неполна и расчет функций переходов автомата сложен, а именно эти два ограничения недопустимы для моделирования компьютерных атак на РИС, так как при таком математическом методе переход из одного состояния в другое зависит от случайных входных сигналов или последовательности предыдущих состояний. В результате аналитическое представление функций выходов автомата для РИС в общем случае невозможно. В развитие этого подхода в работе [5] была рассмотрена новая формальная модель сетевых атак на основе нейронных сетей и вероятностных графов, но такая модель тоже сложна для анализа и расчета, так как содержит намного большее число состояний, чем в модели вероятностных автоматов.

Р. Н. Селин и С. А. Чурилов представляют модель сетевых атак и алгоритм обнаружения угроз безопасности в сети [6]. Данная модель

предназначена для аналитики и прогнозирования изменения уровня информационной безопасности системы в зависимости от происходящих событий в сети. При помощи ряда экземпляров автомата сетевой атаки можно спрогнозировать поведение злоумышленника на техническом уровне, предсказав наиболее вероятные следующие фазы атаки. Ряд экземпляров может иметь различные состояния и описывать действия с разными сетевыми узлами. В предложенном методе применяются графы состояний автомата и вероятности перехода. Интересно, что при таком подходе в разрабатываемой модели вводят понятие «срок актуальности» события информационной безопасности. Например, анализ события отправки запроса по некоторому протоколу актуально только до момента получения ответа на него. Таким образом, список событий информационной безопасности представляется в виде множества кортежей (источник, получатель, тип события, тип закрывающего события, время жизни). Данный метод немного упрощает задачу вероятностных автоматов и может быть использован для небольших распределенных систем.

В общем случае математические методы для моделирования компьютерных атак можно разделить на четыре больших класса, представленных на рис. 1 [7].

Табличные (матричные) методы моделирования компьютерных атак являются наиболее простыми в реализации. Но такие модели трудно использовать при моделировании атак на системы, в которых большое количество объектов, субъектов и связей между ними. Под объектами подразумеваются инциденты информационной безопасности, а субъекты – нарушители. Также такие типы моделей не совсем подходят для анализа циклических атак. Тем не менее подобные модели удобны в тех случаях, когда информация (входные данные модели) представляет собой набор малосвязанных друг с другом инцидентов или правил обнаружения атак. Этот метод может применяться для моделирования атак в небольших информационных системах (ИС).

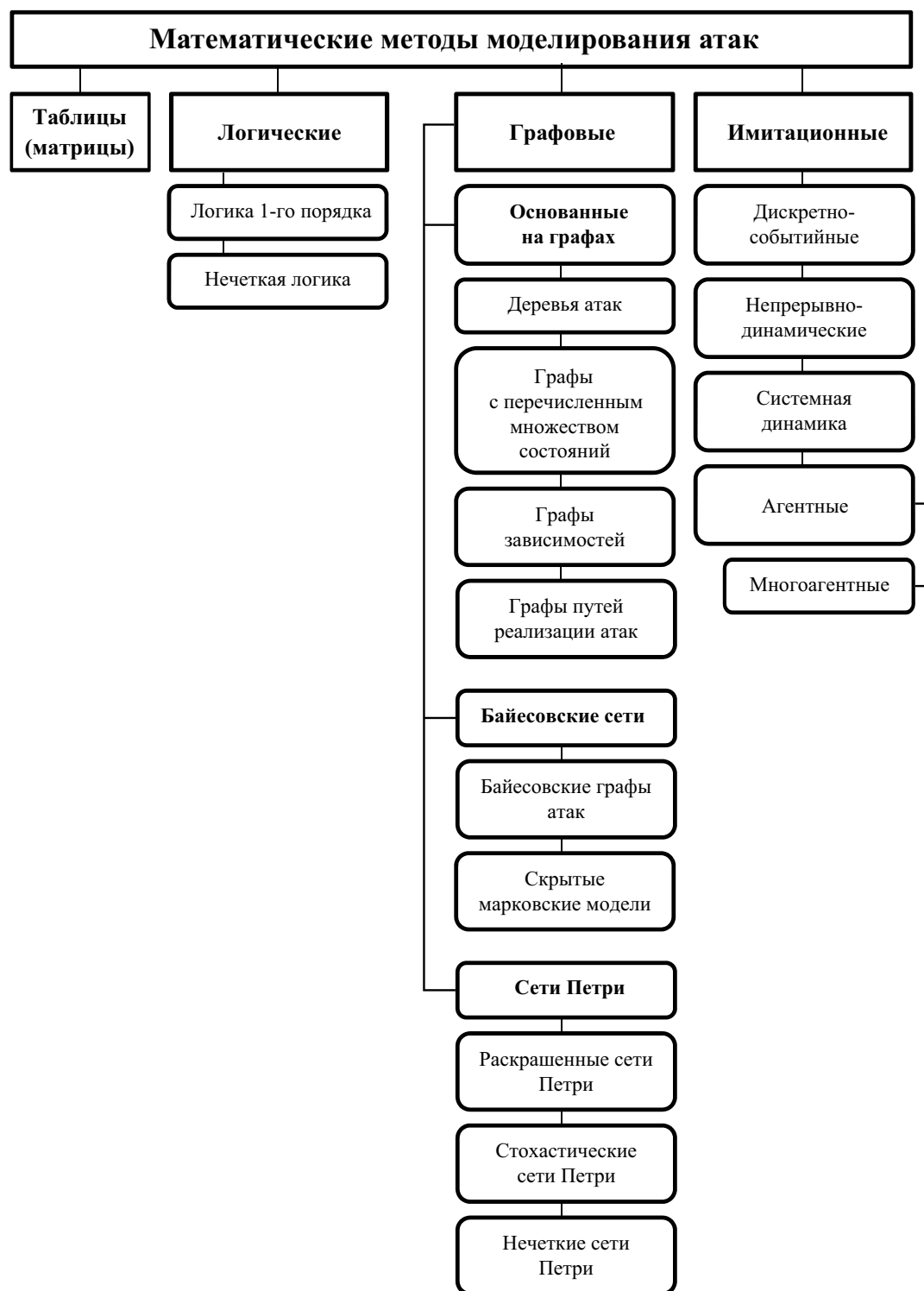


Рис. 1. Математические методы для моделирования компьютерных атак

Логические модели, основанные на логике первого порядка и нечеткой логике, более универсальны. Основными достоинствами данных подходов является возможность об-

работки математических цепочек взаимосвязи инцидентов и нарушителей при помощи использования языков представления знаний, максимально приближенных к естествен-

му языку, не требуется изучение специальных языков программирования. К тому же применение математического аппарата на нечеткой логике позволяет учитывать случаи неопределенности исходных данных при моделировании компьютерных атак. Впрочем, к главным недостаткам логических моделей можно отнести необходимость использования дополнительных и специальных программных средств для работы с языками программирования, при помощи которых возможно обеспечить механизмы логического вывода. Для логики первого порядка таким языком программирования может быть Пролог. Также для организации логического вывода требуется использование виртуальной машины. При моделировании атак при помощи логических методов на большие или распределенные сети требуются значительные вычислительные мощности, что является затратным.

При моделировании атак на РИС преимущественно применяются модели атак, основанные на графах, такие как байесовские сети, сети Петри и графы атак.

Граф, включающий в себя все известные траектории или пути реализации нарушителем угроз, называется графом атак. Для решения задач обнаружения возможных атак, анализа инцидентов информационной безопасности, оценки соответствия и адекватности средств защиты и минимизации рисков от реализации угрозы чаще всего анализируются графы атак. Однако подобные графы атак плохо масштабируются, что делает их неприменимыми для распределенных систем с огромным количеством хостов и уязвимостей.

Другой графовый метод, основанный на деревьях атак, позволяет достаточно легко решить проблему масштабируемости, но труден для моделирования циклических атак и невозможен для динамического моделирования. В простом моделировании деревьев атак вершины могут быть двух типов: «И» и «ИЛИ». Ребрами обозначаются разные параметры, характеризующие объемы используемых нарушителем ресурсов, например стоимость проведения атаки, время, затра-

ченное нарушителем, сложность реализации атаки и др. Применяются также расширенные версии деревьев атак, в которые вводятся дополнительные типы вершин, такие как «Order AND», показывающие, что подцели, соответствующие дочерним вершинам, должны достигаться нарушителем в строго определенном порядке [8].

Байесовские графы атак основаны на байесовских сетях и представляют собой направленные ациклические (не имеющие в своей структуре направленных циклов) графы, в котором вершины графа соотносятся с инцидентами информационной безопасности, а ребра – это операции конъюнкции (логическое «И») или дизъюнкции (логическое «ИЛИ»). Ребра имеют направления на тот инцидент, который может произойти при выполнении предшествующих ему условий. У графа атак такого типа есть только одна целевая вершина, которая соответствует конкретной атаке. Значения вероятностей задаются для каждой вершины графа, кроме целевой, отражают возможную вероятность возникновения инцидента и вычисляются по формуле условной вероятности. Байесовские графы атак похожи на деревья атак, отличием служит возможность учитывать случаи неопределенности исходных данных о моделируемых атаках. Среди разновидностей байесовских сетей следует отметить скрытые марковские процессы, которые часто используются при моделировании атак из-за удобства исследования путей в пространстве состояний, каждое из которых характеризуется заданной вероятностью.

Применение марковских процессов для целей обеспечения информационной безопасности

Изучение марковских случайных процессов привлекает многих исследователей в области информационной безопасности, ибо очень удобно описывать появление случайных событий в виде вероятностей переходов из одного состояния системы в другое, так как считает-

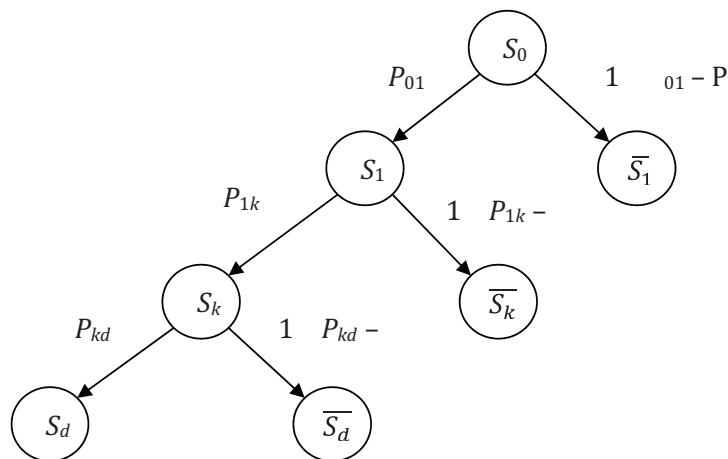


Рис. 2. Граф состояний ИС

ся, что, перейдя в одно из состояний, система не должна далее учитывать обстоятельства того, как она попала в него. Именно данное условие делает такой подход применимым для РИС в отличие от методов, основанных на вероятностных автоматах и нейронных сетях.

В качестве примера использования марковских процессов для моделирования атак можно рассмотреть алгоритм действий злоумышленника по реализации внутренних угроз с целью преодоления защитных механизмов доступности, целостности и конфиденциальности информации [9–11]. ИС в результате воздействия нарушителя переходит из состояния в состояние только в фиксированные моменты времени $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$, которые являются этапами марковского процесса. По тем состояниям, в которых может находиться ИС в различные моменты времени, составляется матрица переходных вероятностей системы и строится граф состояний при воздействии нарушителя. Пример подобного графа представлен на рис. 2. Используя его, можно получить аналитические выражения для определения вероятностей благополучного и неблагоприятного исхода при воздействии на ИС различных нарушителей.

Таким образом, метод моделирования компьютерных атак на основе марковских процессов является наиболее простым и в то же время наиболее эффективным для РИС. Его применение не требует построения больших

таблиц и матриц, как в табличных методах, или знания всех предыдущих состояний, как в методах вероятностных автоматов и нейронных сетях.

Моделирование компьютерных атак на распределенные информационные системы

В качестве исходных данных следует определить три множества, описывающие модель распределенной информационной системы с точки зрения возможной реализации компьютерной атаки:

- множество уязвимостей, характерных для РИС, – V (*Vulnerability*); $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, где $n \in N$;
- множество угроз информационной безопасности – Th (*Threats*); $Th = \{th_1, th_2, \dots, th_m\}$, где $m \in N$;
- множество возможных нарушителей информационной безопасности – Pt (*Perpetrators*); $Pt = \{pt_1, pt_2, \dots, pt_k\}$, где $k \in N$.

Под компьютерной атакой будем понимать любое действие нарушителя, которое может привести к реализации угрозы путем использования уязвимостей РИС. В результате атаки РИС может переходить из состояния в состояние в фиксированные моменты времени t_m , которые называются этапами марковского процесса.

Так как $T = \{t_m\}$, где $m = \overline{1, \infty}$, то такая последовательность называется цепью Маркова, если для каждого шага вероятность перехода РИС из любого состояния S_i в любое состояние S_j не зависит от того, когда и как она попала в состояние S_j , состояние тоже является случайным и характеризуется вероятностью P_{ij} .

Введем дополнительное множество состояний системы:

$$S = \{S_j\}, j = \overline{1, \infty}.$$

Модель марковского процесса представим в виде графа, в котором состояния (вершины) связаны между собой связями (переходами из одного состояния в другое). Пример графа переходов представлен на рис. 3. В конкретный момент времени система может переходить в одно из состояний из множества S . В результате компьютерной атаки она может не переходить в другое состояние или вернуться в первоначальное состояние.

Каждый переход характеризуется вероятностью перехода P_{ij} , которая показывает, как часто после попадания в i -е состояние осуществляется переход в j -е состояние. При этом для каждого состояния сумма вероятностей всех переходов из него в другие состояния должна быть всегда равна 1, для состояния S_1 приведенного примера это означает $P_{12} + P_{13} + P_{14} = 1$.

Вероятность реализации той или иной угрозы информации определяется экспертным путем на основании показателя, характеризующего, насколько вероятна реализация угрозы безопасности в РИС с заданными структурно-функциональными характеристиками и особенностями ее функционирования. Обозначим этот показатель γ и введем три его градации:

- низкая вероятность γ определяется, если отсутствуют: объективные предпосылки к реализации угрозы; требуемая статистика по фактам реализации угрозы; инциденты безопасности, связанные с этой угрозой. Возможная частота реализации угрозы не превы-

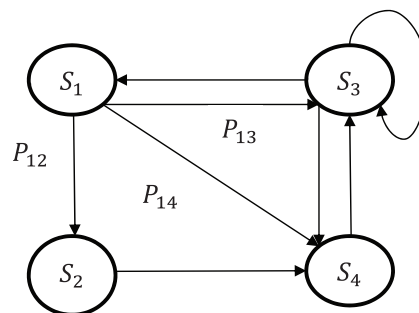


Рис. 3. Пример графа переходов РИС для четырех состояний

шает 1 раза в 5 лет. В числовом эквиваленте вероятность реализации такой угрозы находится в диапазоне $P = [0; 0,2]$;

- средняя вероятность γ – существуют предпосылки к реализации угрозы, зафиксированы случаи реализации угрозы или имеется другая информация, указывающая на возможность реализации угрозы, у нарушителя есть мотивация для реализации рассматриваемой угрозы. Возможная частота реализации угрозы – не более 1 раза в год. В числовом эквиваленте вероятность реализации угрозы попадает в диапазон $P = [0,2; 0,5]$;

- высокая вероятность γ – имеются определенные предпосылки к реализации угрозы, существует актуальная статистика реализации угрозы безопасности информации (возникновения инцидентов безопасности), у нарушителя есть мотивы для реализации угрозы. Частота реализации угрозы – чаще 1 раза в год. В числовом эквиваленте вероятность реализации угрозы попадает в диапазон $P = (0,5; 1]$.

Если отсутствуют необходимые актуальные данные для оценки вероятности реализации угрозы или в случае наличия сомнений в достоверности экспертных оценок при определении показателя γ , вероятность угрозы определяется на основе возможности ее реализации при помощи таблицы.

Реализация марковского процесса представляет собой вычисление последовательности (цепи) переходов из состояния в состояние. В результате строится цепь (цепи) переходов системы из одного состояния в другое. Слу-

Возможность реализации угрозы безопасности информации

Потенциал нарушителя	Уровень защищенности РИС		
	высокий	средний	низкий
Начинающий (низкий)	Низкая	Средняя	Высокая
Специалист (средний)	Средняя	Высокая	Высокая
Профессионал (высокий)	Высокая	Высокая	Высокая

Примечание. Уровни защищенности РИС соответствуют в числовом эквиваленте вероятности значений показателя γ .



Рис. 4. Цепь переходов для примера из четырех состояний

чаяная цепь перехода для примера, рассмотренного ранее, выглядит так, как представлено на рис. 4.

В этой цепи перехода РИС переходит из первоначального состояния S_1 в состояния S_2 , S_4 и S_3 , затем возвращается в первоначальное состояние S_1 . Такое поведение системы возможно, если в ней корректно настроена система защиты информации, которая своевременно среагирует на нарушителя. В противном случае при реализации угрозы система не вернется в первоначальное состояние, и потребуются вносить изменения в систему защиты информации.

В результате применения метода, основанного на построении марковских процессов, можно получить граф и цепи переходов для различных состояний системы при реализации угроз безопасности информации, что в конечном итоге позволяет построить надежную систему защиты информации и применять наиболее эффективные средства защиты. Этот метод является наиболее наглядным и простым для моделирования компьютерных атак на РИС.

Процесс моделирования компьютерных атак на примере атаки «сетевой червь»

Атака «сетевой червь» до сих пор одна из наиболее частых атак, применяемых нарушителями безопасности.

К сетевым червям относятся вредоносные программы, которые распространяют свои копии по локальным или глобальным сетям. Такие черви проникают на компьютер, используя сервисы компьютерных сетей. Активизация сетевого червя может вызывать уничтожение программ и данных, а также приводить к похищению персональных данных пользователя. В классическом варианте сетевого червя по сети рассылается специально оформленный сетевой пакет, в результате чего часть кода червя проникает на компьютер-жертву, инициирует скачивание основного вирусного файла и запускает его на исполнение на зараженном компьютере.

Рассмотрим в качестве примера классического сетевого червя Net-Worm.Win32.Sasser. Представители этого семейства вредоносных программ используют уязвимость в службе сервера проверки подлинности локальной системы (LSASS) операционной системы (ОС) Microsoft Windows. В результате проникновения в систему такой червь запускает FTP-службу на TCP-порту 5554, после чего выбирает любой IP-адрес для атаки и отправляет по нему запрос на другой порт, проверяя, запущена ли служба LSASS. В случае ответа на запрос червь отправляет на тот же порт эксплойт уязвимости в службе LSASS, затем выполняются загрузка и запуск копий вредоносного кода с запущенного ранее сервера,

тем самым завершая процесс проникновения и активации.

Сетевому червю рассматриваемого типа присущи определенные признаки, по которым можно определить, произошло заражение компьютера программ или файлов. К таким признакам относятся [12]:

- изменение размера файлов и даты создания;
- выдача сообщений типа «*Write protect error*» при чтении информации с защищенных от записи дисков;
- замедление работы программ, зависание и перезагрузка;
- уменьшение объема системной памяти и свободного места на диске без видимых причин;
- появление новых сбойных кластеров, дополнительных скрытых файлов или других изменений файловой системы;
- большое количество исходящих TCP/IP-пакетов, расползающихся по всей сети и в большинстве адресованных несуществующим получателям;
- наличие пакетов и сообщений с подозрительным или недопустимым содержанием.

Виды наносимого вирусом ущерба:

- разрушение отдельных файлов, управляющих блоков или файловой системы в целом;
- блокирование некоторых функций ОС;
- выдача ложных, раздражающих или отвлекающих сообщений;
- создание звуковых или визуальных эффектов;
- имитация ошибок или сбоев в программе или ОС;
- имитация сбоев аппаратуры (зависание компьютера через некоторое время после включения и т. д.).

Все вышеперечисленные признаки и виды наносимого червем ущерба можно применить к разработанной методике. В этом случае множества уязвимостей, угроз и нарушителей выглядят следующим образом:

$$V_1 = \{v_1\},$$

где v_1 – уязвимость в службе LSASS ОС Microsoft Windows;

$$Th = \{th_1\},$$

где th_1 = Net – Worm.Win32.Sasser;

$$Pt = \{pt_1\},$$

где pt_1 – сотрудники служб, отделов и подразделений РИС.

Определим множество возможных состояний системы при реализации угрозы «сетевой червь»:

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_8\},$$

где s_1 – первоначальное состояние РИС, в котором система корректно выполняет все свои функции; s_2 – разрушение отдельных файлов или управляющих блоков; s_3 – разрушение всей файловой системы; s_4 – блокирование некоторых функций ОС; s_5 – выдача ложных, раздражающих или отвлекающих сообщений; s_6 – создание звуковых/визуальных эффектов; s_7 – ошибки или сбои в ОС; s_8 – сбои аппаратуры.

Граф переходов для атаки «сетевой червь» на РИС без учета наличия подсистемы защиты информации представлен на рис. 5.

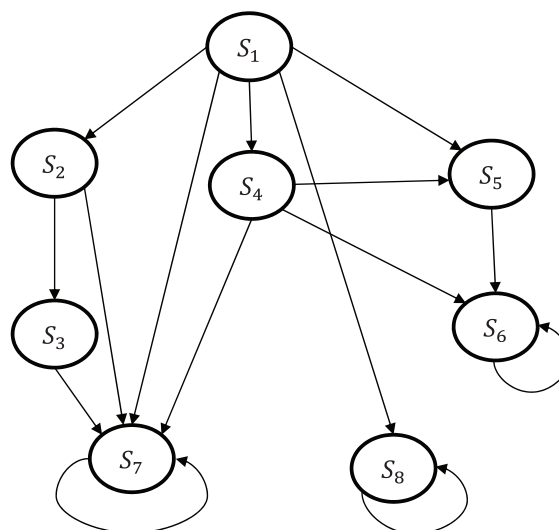


Рис. 5. Граф переходов состояний при атаке «сетевой червь» для РИС без системы защиты информации

Для того чтобы понять, возможен ли переход системы в первоначальное состояние S_1 , рассмотрим средства защиты информации, функционирующие в РИС. Для этого дополним модель множеством средств защиты информации Pr (*Protection*).

Допустим, в системе установлен антивирусный пакет, который включает антивирусный сканер, межсетевой экран и модуль проверки скриптов. Обновления системы безопасности, ОС и приложений могут происходить несвоевременно. Существует большая вероятность, что пользователи системы могут открыть вложенные в почтовые сообщения файлы, полученные из сомнительных источников. В системе предусмотрено резервирование данных, которое проводится 1 раз в неделю. Имеется системный администратор, и реализовано минимальное разграничение прав доступа. Тогда множество Pr выглядит следующим образом:

$$Pr = \{pr_1, pr_2, pr_3\},$$

где pr_1 – антивирусный пакет в составе антивирусного сканера, межсетевого экрана и модуля проверки скриптов; pr_2 – резервирование данных; pr_3 – реализация политики разграничения прав доступа.

В результате добавления к построенной модели подсистемы защиты информации РИС может в некоторых случаях вернуться в первоначальное состояние (рис. 6).

Следующим этапом является определение вероятностей перехода системы из одного состояния в другое.

Так как в рассматриваемой системе не сформирована экспертная база, то вероятности определяются по таблице: система имеет средний уровень защищенности; потенциал нарушителей из множества Pt можно определить как средний; возможность реализации угрозы – средняя, находится в диапазоне $P = [0, 2; 0, 5]$.

С учетом всего вышесказанного на рис. 7 представлены вероятности для перехода из одного состояния в другое.

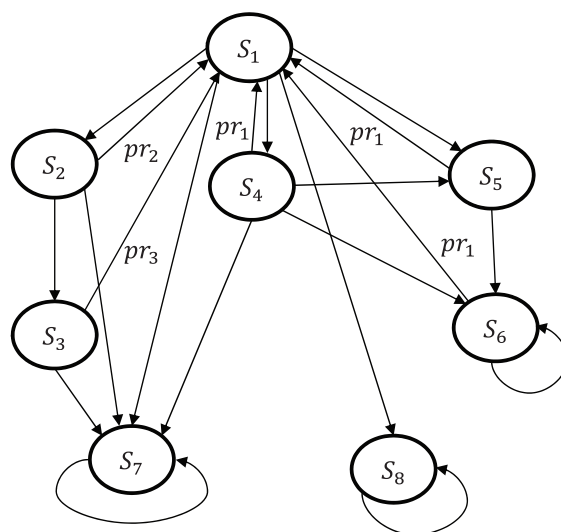


Рис. 6. Граф переходов состояний с применяемой системой защиты

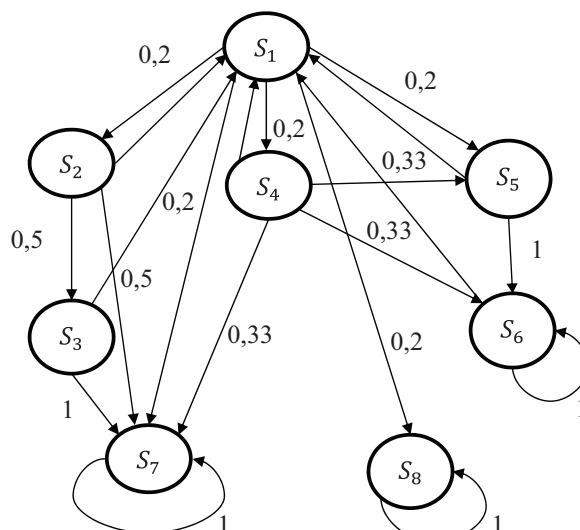


Рис. 7. Вероятности переходов для примера атаки «сетевой червь»

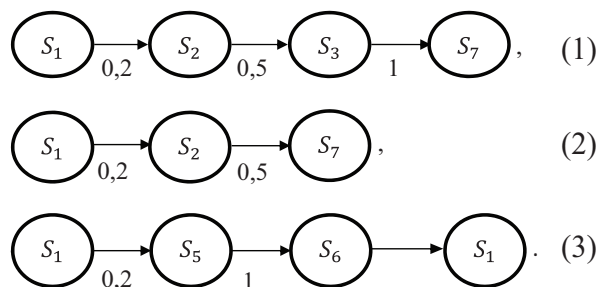


Рис. 8. Наиболее вероятные цепи переходов для примера атаки «сетевой червь»

Из построенного графа перехода можно выделить наиболее вероятные цепи переходов (рис. 8).

При анализе приведенных цепей переходов становится ясно, что только цепь (3) может позволить системе вернуться в первоначальное состояние. Для цепей (1) и (2) требуются рекомендации по улучшению существующей подсистемы защиты информации.

Апробация предлагаемой модели компьютерных атак

Для апробации предлагаемой модели компьютерных атак предложена архитектура программного средства, состоящего из 5 модулей, взаимосвязь которых иллюстрирует рис. 9.

Анализатор сети в режиме реального времени мониторит и диагностирует IP-сеть любого масштаба на наличие уязвимостей, угроз и нарушителей безопасности, таким образом выстраивая исходные множества для построения модели рассматриваемой компьютерной атаки.

В модуле «Описание РИС с существующими СЗИ» определяются все возможные состояния РИС с учетом существующей в ней подсистемы защиты информации на основе

результатов работы анализатора сети и дополнительно проведенного анализа защищенности исследуемой РИС.

Далее происходит определение вероятности реализации угрозы безопасности информации в РИС с заданными структурно-функциональными характеристиками и особенностями функционирования, выполняются построение графа переходов и формирование всех возможных цепей переходов для исследуемой РИС при реализации заданной угрозы информационной безопасности.

В зависимости от полученных результатов вырабатываются рекомендации по совершенствованию существующей системы защиты для улучшения защищенности РИС.

Программное средство разрабатывается в интегрированной среде разработки IntelliJIDEA с использованием библиотек классов языка Java 8.

В настоящее время полностью разработан модуль «Построение цепочек состояний» с возможностью формирования рекомендаций.

При запуске модуля необходимо загрузить исходные данные из текстовых файлов специальной структуры, содержащих описания всех возможных состояний системы и соответствующих вероятностей переходов в эти состояния (рис. 10).

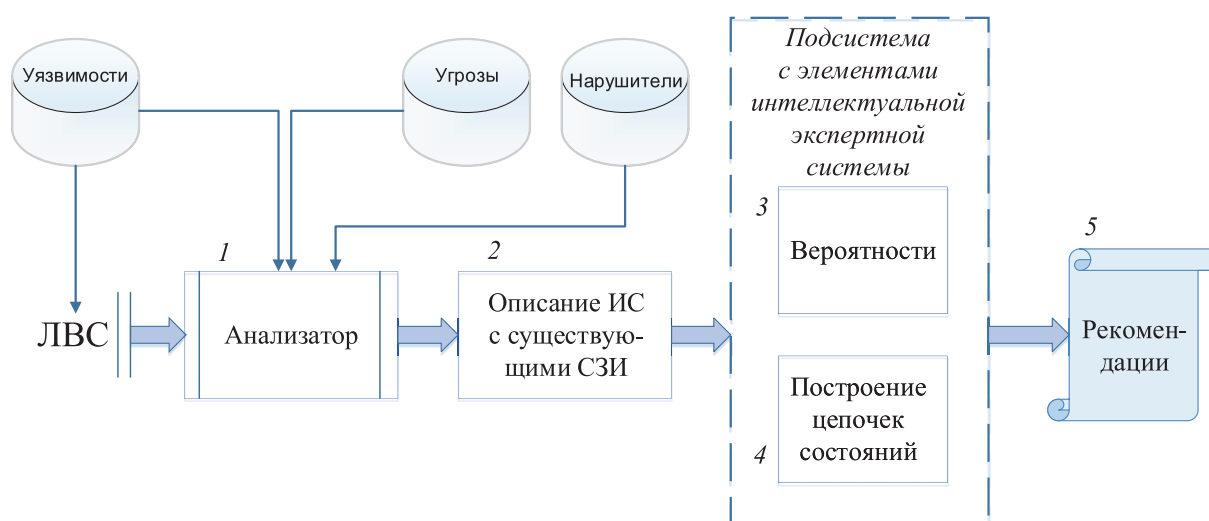


Рис. 9. Взаимосвязь модулей программного средства моделирования компьютерных атак:
ЛВС – локальная вычислительная сеть; СЗИ – средства защиты информации

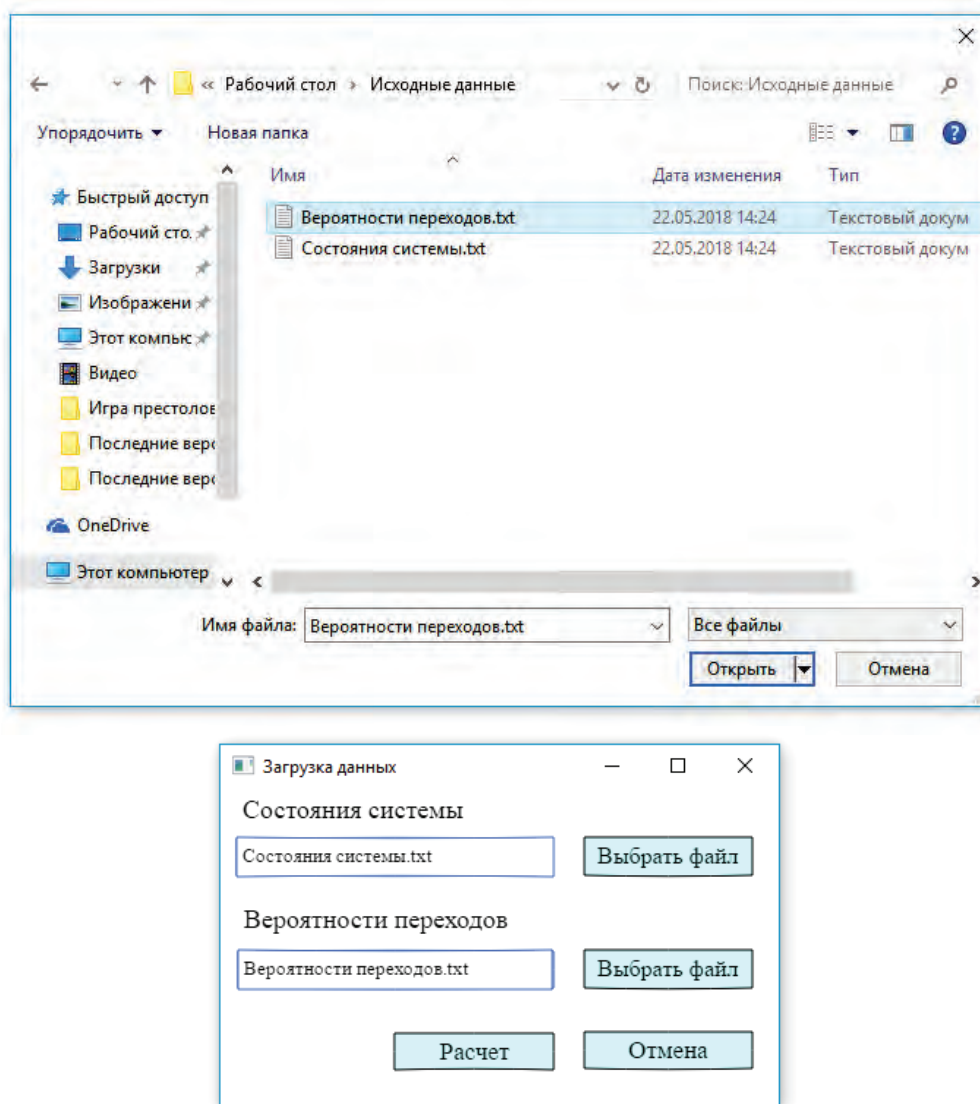


Рис. 10. Загрузка исходных данных

Примеры структуры и содержимого файлов исходных данных для дальнейшей обработки представлены на рис. 11 и 12.

Затем программа просчитывает все переходы между состояниями системы и на основе заданных вероятностей переходов формирует перечень всех возможных цепей состояний системы (рис. 13). Зеленым цветом выделяются цепи переходов с возвратом в первоначальное состояние (т.е. безопасные по отношению к заданной атаке), а красным – критичные цепи переходов, которые требуют принятия решений по улучшению подсистемы защиты информации. Для удобства визуального

представления построенной модели компьютерной атаки можно сформировать граф переходов РИС (рис. 14) и сохранить его в файл.

Для описанного выше примера компьютерной атаки «сетевой червь» на рис. 15 предложены рекомендации по совершенствованию существующей подсистемы защиты информации РИС.

Во-первых, требуется настроить обязательное своевременное обновление антивирусных баз, а также модулей системы безопасности, ОС и приложений. Вероятность цепочек событий, в которых причиной служит нерегу-

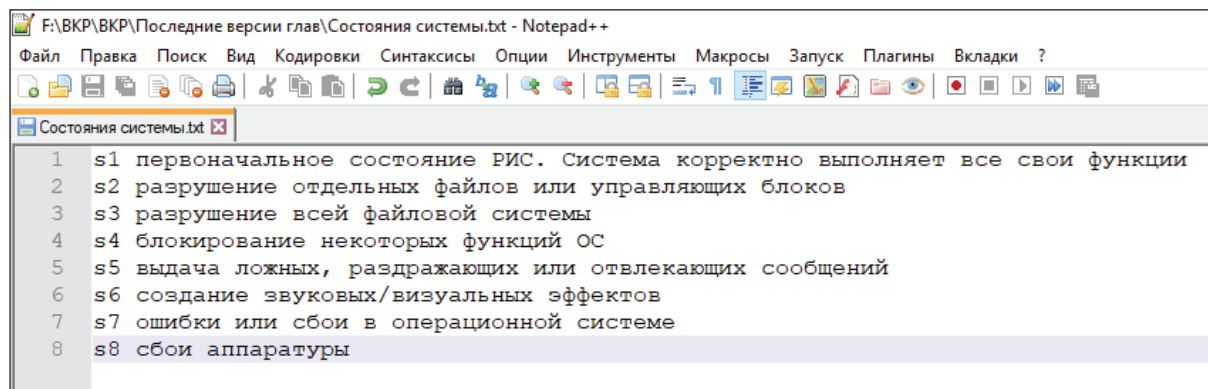


Рис. 11. Пример файла «Состояния системы.txt»

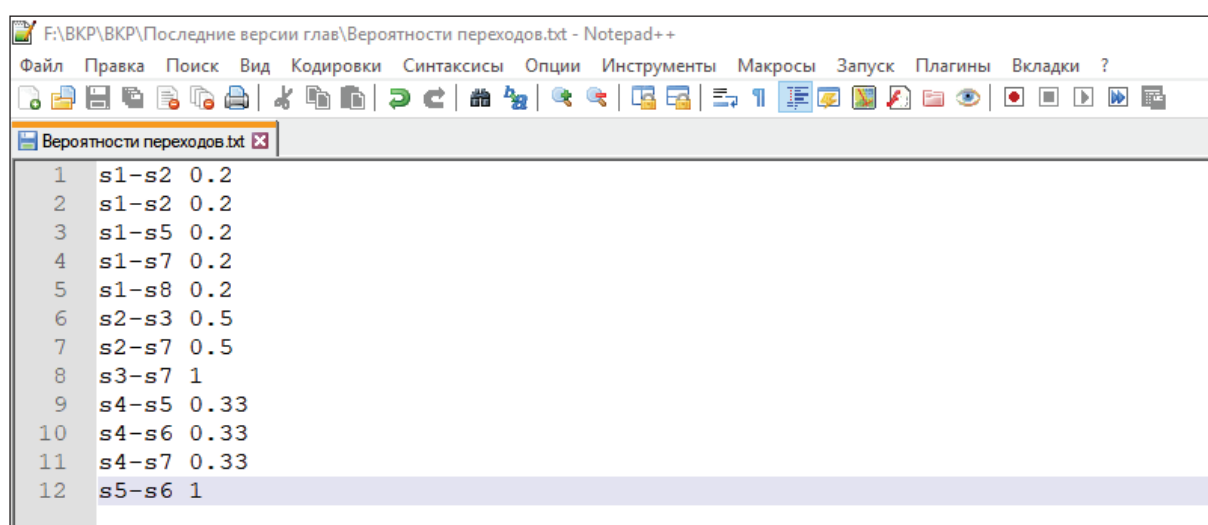


Рис. 12. Пример файла «Вероятности переходов.txt»

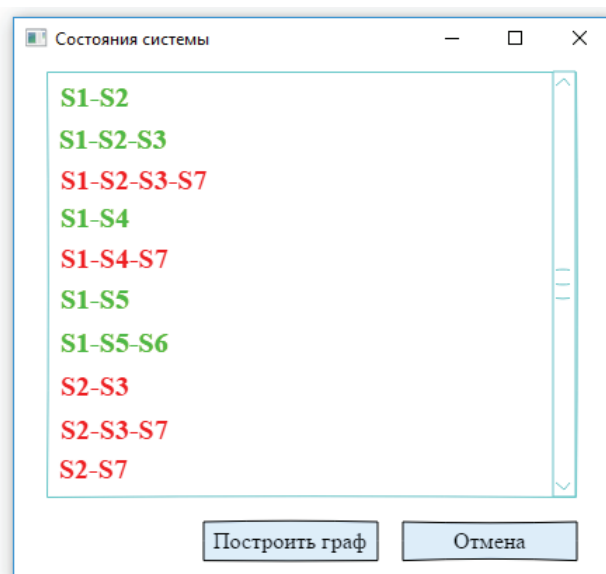


Рис. 13. Возможные цепи переходов исследуемой системы

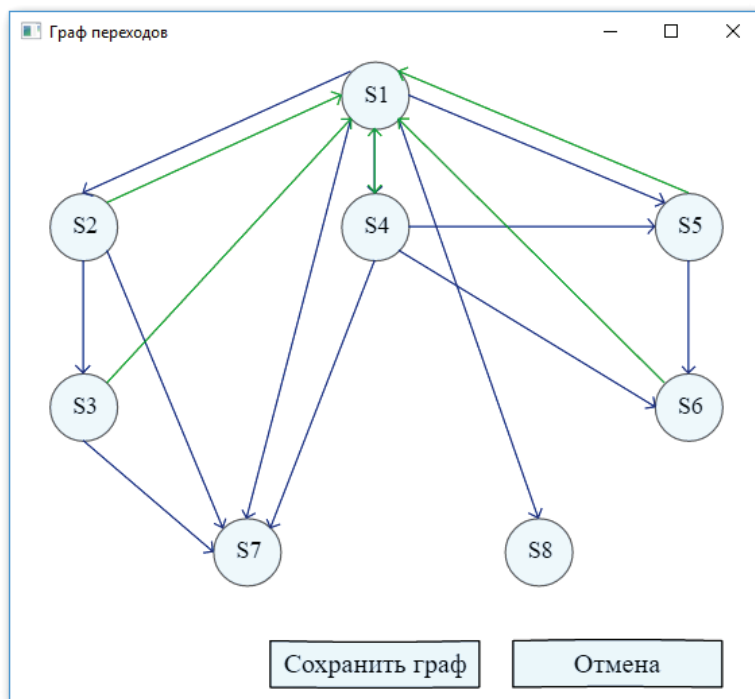


Рис. 14. Построенный граф переходов

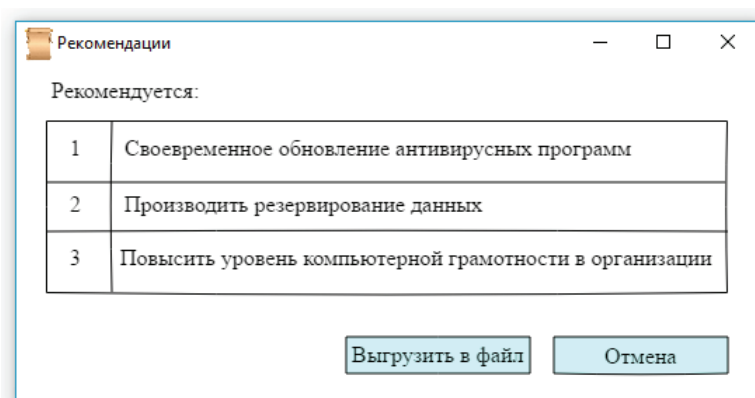


Рис. 15. Рекомендации по системе защиты РИС для примера атаки «сетевой червь»

лярное обновление антивирусных программ, является наиболее высокой.

Во-вторых, рекомендуется осуществлять резервирование критических данных в системе минимум 1 раз в сутки и повысить уровень компьютерной грамотности в организации путем проведения обучения, тренингов и семинаров с сотрудниками организации.

Заключение

В данной статье проведено исследование методического аппарата для построения математической модели имитации компьютерных атак на РИС. Рассмотренными методами моделирования компьютерных атак на РИС определен оптимальный подход к моделиро-

ванию атак на основе марковских процессов. Построена обобщенная модель компьютерной атаки применительно к РИС с учетом ее главных особенностей. В качестве апробации предлагаемой модели разработана архитектура программного средства моделирования компьютерных атак, один из модулей которого создан и протестирован на примере атаки «сетевой червь».

Библиографический список

1. Глухов А. П. Особенности обеспечения информационной безопасности системы организации движения поездов / А. П. Глухов // Транспорт Урала. – 2015. – № 3 (46). – С. 32–40.
2. Ададуров С. Е. Информационная безопасность и защита информации на железнодорожном транспорте : в 2 ч. Ч. 1. Методология и система обеспечения информационной безопасности на железнодорожном транспорте / С. Е. Ададуров, А. П. Глухов, А. А. Корниенко ; под ред. А. А. Корниенко. – М. : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2014. – 440 с.
3. Средства обеспечения безопасности. НОУ ИНТУИТ. Лекция 11. – URL : <https://www.intuit.ru/studies/courses/84/84/lecture/28267> (дата обращения : 20.03.2018).
4. Тумоян Е. П. Метод моделирования компьютерных атак на основе вероятностных автоматов / Е. П. Тумоян // Изв. ЮФУ. Технические науки. – 2007. – Тем. вып. – С. 120–126.
5. Тумоян Е. П. Разработка метода моделирования сетевых атак на основе нейронных сетей и вероятностных графов / Е. П. Тумоян // Изв. ЮФУ. Технические науки. – 2009. – Раздел IV. Технологии безопасности. – С. 148–153.
6. Селин Р. Н. Метод прогнозирования вариантов развития компьютерных атак / Р. Н. Селин, С. А. Чурилов // Изв. ЮФУ. Технические науки. – 2011. – Раздел VI. Новые информационные технологии в энергетике. – С. 233–237.
7. Platonov V. V. Detecting network attacks in computer networks by using data mining methods / V. V. Platonov, P. O. Semenov // Intellectual Technologies on Transport. – 2016. – N 2. – P. 1–6.

8. Котенко Д. И. Методы и средства моделирования атак в больших компьютерных сетях : состояние проблемы / Д. И. Котенко, И. В. Котенко, И. Б. Саенко // Труды СПИИРАН. – 2012. – Вып. 22. – С. 5–30.

9. Herbert G. Markov models of social dynamics : Theory and applications / G. Herbert // ACMTrans. Intell. Syst. Technol. – 2013. – Vol. 4, N 3. – Article 53. – P. 1–19.

10. Росенко А. П. Применение марковских случайных процессов с дискретным параметром для оценки уровня информационной безопасности / А. П. Росенко // Изв. ЮФУ. Технические науки. – 2009. – Раздел II. Защита информационных процессов в компьютерных системах. – С. 169–172.

11. Ерохин С. С. Оценка эффективности контрмер угрозам информационной безопасности с использованием скрытых марковских процессов / С. С. Ерохин // Докл. Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2008. – С. 123–124.

12. Лекция 3 : Классификация вирусов. НОУ ИНТУИТ. Вирусы и средства борьбы с ними. – URL : <https://www.intuit.ru/studies/courses/1042/154/lecture/4277?page=3> (дата обращения : 20.04.2018).

References

1. Glukhov A. P. Osobennosti obespecheniia informatsionnoi bezopasnosti sistemy organizatsii dvizheniia poezdov [Specific features of ensuring information safety of train movement organization system]. *Transport Urala [Urals transport]*, 2015, no. 3 (46), pp. 32–40. (In Russian)
2. Adadurov S. E., Glukhov A. P. & Kornienko A. A. *Informatsionnaia bezopasnost i zashchita informatsii na zheleznodorozhnom transporte [Information security and data protection on rail transport]*. In 2 pt. Pt 1. *Metodologiya i sistema obespecheniia informatsionnoi bezopasnosti na zheleznodorozhnom transporte [Methodology and system of information security on rail transport]*. Ed. by A. A. Kornienko. Moscow, Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte Publ., 2014, 440 p. (In Russian)

3. *Sredstva obespecheniia bezopasnosti* [Security facilities]. NOU INTUIT. Lecture 11. URL: <https://www.intuit.ru/studies/courses/84/84/lecture/28267> (accessed: 20.03.2018). (In Russian)
4. Tumoian E. P. Metod modelirovaniia komp'iuternykh atak na osnove veroiatnostnykh avtomatov [Method for simulating computer attacks on the basis of probabilistic automata]. *Izvestiia IuFU. Tekhnicheskie nauki* [Proc. of Southern Federal Univ. Eng. Sci.], 2007, theme issue, pp. 120–126. (In Russian)
5. Tumoian E. P. Razrabotka metoda modelirovaniia setevykh atak na osnove neironnykh setei i veroiatnostnykh grafov [Development of a method for simulating network attacks on the basis of neural networks and probable graphs]. *Izvestiia IuFU. Tekhnicheskie nauki* [Proc. of Southern Federal Univ. Eng. Sci.], 2009, section IV. *Tekhnologii bezopasnosti* [Security technologies], pp. 148–153. (In Russian)
6. Selin R. N. & Churilov S. A. Metod prognozirovaniia variantov razvitiia komp'iuternykh atak [Method for forecasting computer attack development scenarios]. *Izvestiia IuFU. Tekhnicheskie nauki* [Proc. of Southern Federal Univ. Eng. Sci.], 2011, section VI. *Novye informatsionnye tekhnologii v energetike* [New information technologies in energy engineering], pp. 233–237. (In Russian)
7. Platonov V. V. & Semenov P. O. Detecting network attacks in computer networks by using data mining methods. *Intellectual Technologies on Transport*, 2016, no. 2, pp. 1–6.
8. Kotenko D. I., Kotenko I. V. & Saenko I. B. Metody i sredstva modelirovaniia atak v bolshikh komp'iuternykh setiakh [Methods and instruments for simulating attacks in large computer networks: state of the problem]. *Trudy SPIIRAN* [SPIIRAS Proc.], 2012, vol. 22, pp. 5–30. (In Russian)
9. Herbert G. Markov models of social dynamics: Theory and applications. *ACMTrans. Intell. Syst. Technol.*, 2013, vol. 4, no. 3, article 53, pp. 1–19.
10. Rosenko A. P. Primenenie markovskikh sluchainykh protsessov s diskretnym parametrom dlia otsenki urovnia informatsionnoi bezopasnosti [Application of Markovian processes with a discrete parameter for evaluation of information security level]. *Izvestiia IuFU. Tekhnicheskie nauki* [Proc. of Southern Federal University. Eng. Sci.], 2009, section II. *Zashchita informatsionnykh protsessov v komp'iuternykh sistemakh* [Protection of information processes in computer systems], pp. 169–172. (In Russian)
11. Erokhin S. S. Otsenka effektivnosti kontrmer ugrozam informatsionnoi bezopasnosti s ispolzovaniem skrytykh markovskikh protsessov [Evaluation of efficiency of counter-measures against information security threats with the application of hidden Markovian processes]. *Dokl. Tomsk. gos. un-ta sistem upravleniia i radioelektroniki* [Reports of the Tomsk State University of control systems and radioelectronics], 2008, pp. 123–124. (In Russian)
12. *Klassifikatsiia virusov. Virusy i sredstva borby s nimi* [Classification of viruses. Viruses and methods of fighting against them]. NOU INTUIT. Lecture 3. URL: <https://www.intuit.ru/studies/courses/1042/154/lecture/4277?page=3> (accessed: 20.04.2018). (In Russian)

КОРНИЕНКО Анатолий Адамович – д-р техн. наук, профессор; НИКИТИН Александр Борисович – д-р техн. наук, профессор; *ДИАСАМИДЗЕ Светлана Владимировна – канд. техн. наук, доцент, sv.diass99@ya.ru; КУЗЬМЕНКОВА Елена Юрьевна – студент (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 519.668; 621.391.037.372

В. А. Ходаковский, В. Г. Дегтярев, П. В. Герасименко, С. В. Микони**СИНТЕЗ СИГНАЛОВ С ОПТИМАЛЬНЫМИ ПО УРОВНЮ
БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ**

Дата поступления: 07.04.2018

Решение о публикации: 22.06.2018

Аннотация

Цель: Изучение информационных характеристик финитных сигналов с целью выявления сигналов, обладающих наилучшими в смысле минимума уровня боковых лепестков автокорреляционными свойствами, и разработка способа синтеза таких сигналов. **Методы:** Применяются аналитическое исследование сигналов, их математическое моделирование и алгоритмы синтеза. **Результаты:** Показывается, что вся информация непрерывного финитного сигнала сосредоточена в информационном векторе, элементы которого располагаются в информационных точках, равномерно распределенных по длительности сигнала с интервалом, равным половине периода наивысшей частоты в его спектре. Обосновывается возможность полного описания финитного сигнала модулированной решетчатой функцией, амплитуда всплесков которой совпадает со значениями информационного вектора финитного сигнала, а временное положение – с его информационными точками. Приводится вывод о возможности синтеза финитного сигнала по модулированной решетчатой функции. **Практическая значимость:** Описываются способ и алгоритм для его реализации, позволяющие синтезировать сигналы, обладающие наилучшими автокорреляционными свойствами в смысле отношения центрального пика автокорреляционной функции к боковым пикам. Основой способа является алгоритм нелинейного программирования, использующий в качестве целевой функции отношение центрального пика автокорреляционной функции к среднему уровню ее боковых пиков. В качестве начального приближения для алгоритма предлагается использовать решетчатую функцию, фазы всплесков которой распределены по равномерному закону, а распределение огибающей амплитуд всплесков соответствует сумме нормальных распределений. Приводятся результаты синтеза оптимальных сигналов различной длительности, обладающих отношением уровня центрального пика к боковым пикам по мощности более 30 дБ. Предложенные варианты применения синтезированных сигналов для различных радиотехнических систем позволяют улучшить такие технические характеристики как пороговое отношение сигнал/шум, разрешающая способность сигнала по времени и дальности.

Ключевые слова: Теорема Котельникова, финитные сигналы, информационные точки, информационный вектор, модулированная решетчатая функция, автокорреляционная функция, код Баркера, нелинейное программирование, пороговое отношение сигнал/шум, потенциальная точность измерений.

***Valentin A. Khodakovskii**, D. Eng. Sci., professor, hval104@mail.ru; **Valentin G. Degtiarev**, D. Eng. Sci., professor, vdegt@list.ru; **Petr V. Gerasimenko**, D. Eng. Sci., professor, pv39@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University); **Stanislav V. Mikoni**, D. Eng. Sci., professor (Saint Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS))
DESIGN OF SIGNALS WITH AUTOCORRELATED QUALITIES THAT HAVE OPTIMISED SIDE-LOBE LEVEL

Summary

Objective: Study of information characteristics of finite signals with the purpose of identifying signals that possess the best autocorrelation qualities as regards minimum level of side-lobes, and development of

a method to design such signals. **Methods:** Analytical study of signals, their mathematical simulation and design algorithms. **Results:** It is shown that all information of a continuous finite signal is concentrated in an information vector, the elements of which are placed in information points uniformly distributed along the length of a signal at an interval equalling half of the highest frequency period in its spectrum. Possibility of full description of a finite signal by modulated lattice function, pulse-spike amplitude of which is equal to the values of information vector of the finite signal, and temporal position coincides with its information points, is justified. The conclusion concerning possibility of design of finite signal by modulated lattice function is presented. **Practical importance:** Method and algorithm for its implementation are described, permitting designing signals possessing best possible autocorrelation qualities as regards the relation of central peak of autocorrelation function to its side peaks. The method is based on a non-linear programming algorithm which deploys the relation of central peak of the autocorrelation function to the average level of its side peaks as its efficiency function. Application of lattice function is proposed as initial approximation for the algorithm, with its peak phases distributed by uniform law, and distribution of envelope amplitude corresponds to the sum of probability distributions. Results of design of optimum signals of varied length, with the relation of level of central peak to side peaks at over 30 dB, are presented. Proposed options of applying designed signals for various radio-technical systems permit improving such technical characteristics as threshold signal to noise ratio and wavelet resolution of signal by time and distance.

Keywords: Sampling theorem, finite signals, information points, information vector, modulated lattice function, autocorrelation function, Barker code, non-linear programming, threshold signal to noise ratio, potential accuracy of measurements.

Введение

В настоящее время большая часть радиотехнических систем выполняется на основе цифровых технологий. Появление высокопроизводительных цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) и аналого-цифровых преобразователей (АЦП) привело к тому, что цифровая обработка сигналов может вестись на частотах до 1 ГГц. Разработаны различные варианты цифровых фильтров [1–10], модуляторы и другие элементы систем передачи и приема сигналов. Широко применяются микропроцессоры цифровой обработки сигналов.

Вместе с тем при реализации цифровой обработки довольно часто используются принципы, которые закладывались еще на заре аналоговых радиотехнических систем. Например, современные высокоскоростные модели основаны на алгоритмах многоуровневой квадратурной модуляции и демодуляции типа 256 QAM и др., что требует вычисления квадратурных компонент сигнала, высокоточного слежения за фазой несущей и т. д. В результате цифровые системы повторяют основные

операции аналоговых устройств, что существенно увеличивает время обработки информации.

В локационных и радионавигационных системах также применяется цифровая обработка сигналов. Наиболее широко используются в этих системах псевдослучайные последовательности [8], обладающие хорошими автокорреляционными свойствами, что обеспечивает существенное повышение разрешающей способности систем по дальности за счет сжатия сигнала во времени. Методом модуляции в таких системах служит, как правило, фазовая манипуляция. Данные системы хорошо себя зарекомендовали, однако в них происходит резкий скачок фазы несущей, что существенно расширяет спектр передаваемого сигнала, и для правильного восстановления несущей и устойчивой работы контура фазового детектора необходимо часть мощности сигнала отдавать на передачу несущей частоты. Методы генерации псевдослучайных последовательностей хорошо изучены. Уровень боковых лепестков их автокорреляционной функции (АКФ) при длине последовательно-

сти, равной n , составляет величину $1/\sqrt{n}$. Для многих задач этого вполне достаточно.

В настоящей статье рассматривается вопрос синтеза сигналов с оптимальными автокорреляционными свойствами в смысле минимума уровня боковых лепестков АКФ. Ее цель – найти сигналы, обладающие максимально возможным отношением по мощности основного пика АКФ к уровню боковых лепестков.

Вычисление АКФ дискретных сигналов

Автокорреляционная функция $\psi(t)$ финитного временного процесса $u(t)$, имеющего длительность Δ и спектр, ограниченный частотой f_b , вычисляется как свертка

$$\psi(t) = 2 \cdot f_b \int_0^{t+\Delta} u(\tau) \cdot u(\tau - t) d\tau. \quad (1)$$

В соответствии с теоремой Котельникова функцию, имеющую ограниченный частотой f_b , спектр можно представить рядом

$$\begin{aligned} u(t) &= \sum_{i=1}^n A_i \cdot \frac{\sin[\pi \cdot (2 \cdot f_b \cdot t - i)]}{\pi \cdot (2 \cdot f_b \cdot t - i)} = \\ &= \sum_{i=1}^n A_i \cdot h(t, f_b, i). \end{aligned} \quad (2)$$

В разложении (2) функция

$$h(t, f, i) = \frac{\sin[\pi \cdot (2 \cdot f_b \cdot t - i)]}{\pi \cdot (2 \cdot f_b \cdot t - i)} \quad (3)$$

называется функцией отсчетов. Ее форма в (2) не изменяется, а для каждого i -го информационного элемента вектора $\{A\}$ происходит последовательный сдвиг функции отсчетов на π , т. е. на половину периода верхней частоты f_b .

Из представления (2) можно сделать вывод о том, что временной процесс $u(t)$ полностью определяется вектором A_i , $i = 1, 2, \dots, n$. То есть для получения хороших автокорреляционных свойств процесса $u(t)$ необходимо найти наилучший информационный вектор $\{A_n\}$.

Известно [8], что автокорреляция решетчатой функции может быть определена так:

$$r_i = \sum_{k=1}^{n-i-1} A_k \cdot A_{k-i}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n-1. \quad (4)$$

Выражение (4) позволяет вычислить АКФ только для положительных величин, т. е. половину возможных значений, но поскольку АКФ является четной функцией, то вторую половину можно не находить.

Определим АКФ для двух 13-элементных последовательностей: кода Баркера

$$A = \{1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1\} \quad (5)$$

и другого кода

$$A1 = \{1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1\}. \quad (6)$$

На рис. 1, а приведена последовательность (5), на рис. 1, б, в – соответственно АКФ кодов (5) и (6). Анализ рис. 1 позволяет заключить, что АКФ кода (6) имеет значительно более высокий уровень боковых лепестков, чем 13-элементный код Баркера (5). Для учета уровня боковых лепестков введем целевую функцию, позволяющую оценить уровень боковых лепестков по сравнению с уровнем центрального пика АКФ:

$$F(X, n) = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} X_i^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^{n-i-1} X_k \cdot X_{k+i}}. \quad (7)$$

Приведем значения данной целевой функции для рассмотренных кодов:

$$F(A) = 28,17 \quad F(A1) = 2,17,$$

т. е. код Баркера существенно лучше по критерию (7).

Для задач локации, навигации, а также для устойчивой связи в сильных шумах необходимы последовательности с длиной $n > 1000$, однако известно, что кодов Баркера с $n > 13$ не существует, но если снять ограничение на ис-

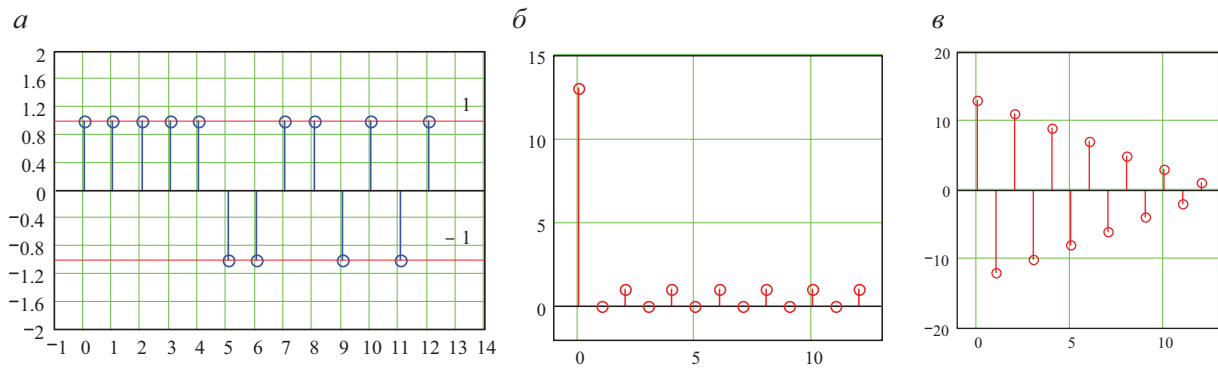


Рис. 1. Код Баркера (5) и АКФ кодов (5) и (6) (объяснение в тексте)

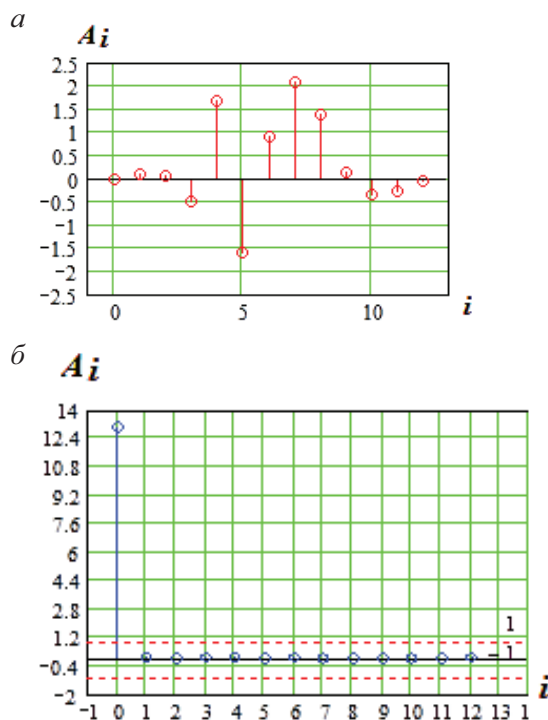


Рис. 2. Последовательность (a) и АКФ 13-элементного кода вида (8) (б)

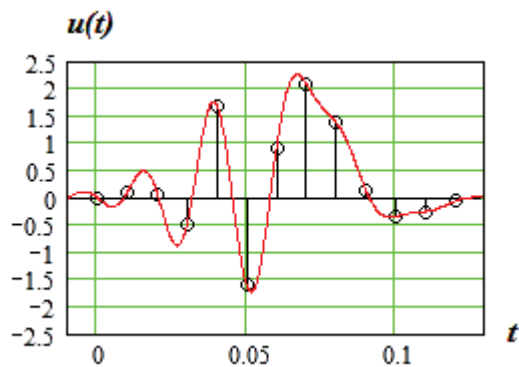


Рис. 3. Непрерывный сигнал, сформированный по последовательности (8)

пользование в последовательностях не только значений ± 1 , то можно найти последовательности, обладающие лучшими АКФ.

Рассмотрим, например, последовательность следующего вида:

$$A2 := (-0.01 \ 0.11 \ 0.06 \ -0.48 \ 1.69 \ -1.61 \ 0.89 \ 2.09 \ 1.38 \ 0.14 \ -0.35 \ -0.26 \ -0.07)^T \quad (8)$$

и построим для нее решетчатую функцию и АКФ (рис. 2)

Для последовательности (8) функция (7) принимает значение $F(A1) = 1317$, что существенно выше по сравнению с кодом Баркера. Нельзя не отметить, что сумма квадратов элементов последовательностей (5) и (8) равны.

Вычисление АКФ непрерывных сигналов

Используя функцию отсчетов (2), сформируем непрерывный сигнал $u(t)$ с хорошими свойствами АКФ на основе последовательности (8) для верхней граничной частоты $f_B = 50$ Гц:

$$u(t) = \sum_{i=1}^n A2_i \cdot \frac{\sin[\pi \cdot (2 \cdot f_B \cdot t - i)]}{\pi \cdot (2 \cdot f_B \cdot t - i)}.$$

Результат формирования приведен на рис. 3.

Синтез сигналов с наилучшими свойствами АКФ

Поставим задачу синтеза значительно более длительных последовательностей, оптимальных по критерию (7). Анализ решетчатой функции (рис. 2, а) и непрерывного сигнала, построенного на ее основе, позволяет отметить:

- амплитуда всплесков в последовательности (6) плавно возрастает, и к концу амплитуда также плавно спадает. Эта особенность позволяет снизить уровень боковых лепестков АКФ, формируемых в начале и конце сигнала;
- амплитудный спектр функции $u(t)$ является равномерным в диапазоне $[0 - f_b]$;
- среднее значение сигнала близко к нулю (постоянная составляющая мала);
- вероятности появления положительных и отрицательных всплесков равны;

• пикфактор (отношение максимальной мощности к средней за время длительности $u(t)$) должен быть ограничен.

На начальном этапе синтеза необходимо сформировать опорную последовательность, обладающую перечисленными выше свойствами. Затем следует учесть все ограничения, накладываемые на элементы последовательности. И, наконец, нужно решить задачу поиска такой последовательности, которая максимизирует целевую функцию (7) с учетом ограничений.

Математически задача может быть поставлена так.

Найти такой вектор $\{X\}$ размерности n , который максимизирует целевую функцию

$$F(X, n) = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} X_i^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^{n-i-1} X_k \cdot X_{k+i}} \rightarrow \max_{\{X\}},$$

$$\begin{aligned}
 & n := 31 \quad b := 3 \quad S := \text{runif}(n, -b, b) \quad i := 0..n-1 \\
 & \text{Kor}(X, n, i) := \sum_{k=0}^{n-1-i} (X_k \cdot X_{k+i}) \quad \text{bok}(X) := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} |\text{Kor}(X, n, i)| \quad F(X) := \frac{\text{Kor}(X, n, 0)}{\text{bok}(X)} \\
 & \text{Given} \quad |S| > 0.1 \cdot b \quad \max(S) < b \quad \min(S) > -b \\
 & \left| \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} S_i \right| < 0.05 \quad \text{bok}(S) := \frac{1}{n} \quad \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} (S_i)^2 \\
 & V := \text{Maximize}(F, S) \quad F(V) = 66.6 \quad \text{ma} := \text{Kor}(V, n, 0) \quad \text{ma} = 30 \quad \text{bok}(V) = 0.032
 \end{aligned}$$

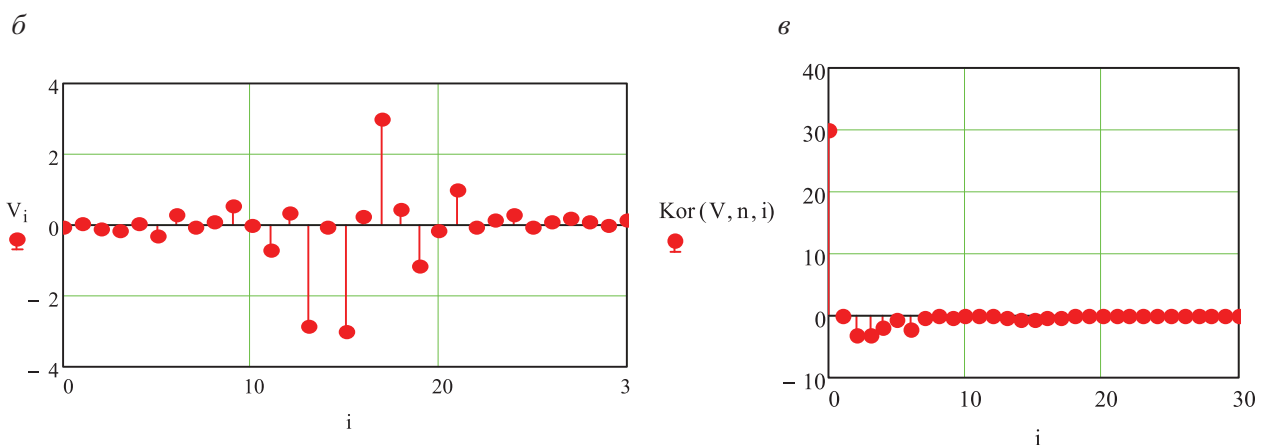


Рис. 4. Текст программы в среде MathCad для поиска оптимальной последовательности (а); оптимизированная последовательность (б) и ее АКФ (в)

при следующих ограничениях:

$$\max(S) < a, \min(S) > -a, \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} \left| \sum_{k=0}^{n-i-1} X_k \cdot X_{k+i} \right| < \frac{1}{n}, \quad (11)$$

$$\left| \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} X_k \right| < b, \quad (12)$$

$$\frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} X_k^2 > c. \quad (13)$$

Ограничение (10) требует, чтобы элементы искомого вектора находились в заданном диапазоне допустимых значений, ограничение (11) – сумма модулей боковых всплесков АКФ не должна быть больше заданного порога, ограничение (12) – постоянная составляющая (среднее значение элементов) не выше заданного значения, ограничение (13) – среднее значение квадратов элементов искомого вектора должно быть не ниже заданного значения.

На рис. 4 приведен текст программы в среде MathCad, реализующей предложенный алгоритм.

Потенциальная точность измерений параметров при использовании сигналов с оптимальными свойствами АКФ

Теорема. Если в интервале времени $[t_n, t_k]$ задан временной процесс $u(t)$, имеющий ограниченный частотой f_B спектр, то наилучшая АКФ такого процесса может быть представлена выражением

$$\psi(t) = P_B \cdot \frac{\sin[\pi \cdot (2 \cdot f_B \cdot t)]}{\pi \cdot (2 \cdot f_B \cdot t)},$$

где P_B – мощность (дисперсия) случайного процесса, имеющего спектр, ограниченный частотой f_B .

По сути идеальная АКФ является аналогом δ -функции для процесса, ограниченного сверху частотой f_B .

Доказательство. Подставим (2) в (1) и, поскольку функция $u(t)$ является финитной, то заменим несобственный интеграл в (2) определенным с пределами интегрирования t_n, t_k и поменяем порядок суммирования и интегрирования

$$\psi(t) = 2 \cdot f_B \int_{t_n}^{t_k} u(\tau) \cdot u(\tau - t) d\tau = \int_{t_n}^{t_k} \sum_{i=1}^N A_i \times \quad (14)$$

$$\times h(\tau, f_B, i) \cdot \sum_{j=1}^N A_j \cdot h(\tau - t, f_B, j) d\tau = \\ = \sum_{i=1}^N A_i \cdot \sum_{j=1}^N A_j \cdot 2 \cdot f_B \int_{t_n}^{t_k} h(\tau, f_B, i) \cdot h(\tau - t, f_B, j) d\tau.$$

Внутренний интеграл в (14) – это свертка весовых функций идеального низкочастотного фильтра:

$$2 \cdot f_B \int_{t_n}^{t_k} h(\tau, f_B, i) \cdot h(\tau - t, f_B, j) d\tau. \quad (15)$$

Значение интеграла (15) зависит от комбинаций индексов i и j :

– первый вариант, когда $i = j = 0$, т.е. сдвига между весовыми функциями нет и (15) есть свертка не смещенных относительно друг друга весовых функций идеального низкочастотного фильтра:

$$2 \cdot f_B \int_{t_n}^{t_k} h(\tau, f_B, 0) \cdot h(\tau - t, f_B, 0) d\tau = \\ = h(t, f_B, 0); \quad (16)$$

– второй вариант, когда $i \neq j$, т.е. сдвиг есть и равен разности: $i - j$.

В данном случае (16) формирует весовую функцию вида (3), максимум всплеска которой находится в точке $t = (i - j)/2f_B$, что приводит к следующему выражению для АКФ:

$$\psi(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot \sum_{j=1}^N A_j \cdot h\left(f_B, t, \frac{i - j}{2 \cdot f_B}\right). \quad (17)$$

При $i = j$, т.е. при нулевом сдвиге, автокорреляционная функция (17) упрощается:

$$\begin{aligned}\psi(t) &= \sum_{i=1}^N A_i^2 \cdot \operatorname{si}\left(f_B, t, \frac{i}{2 \cdot f_B}\right) = \\ &= D \cdot \operatorname{si}(f_B, t, 0),\end{aligned}\quad (18)$$

здесь D – энергия сигнала.

Как известно, потенциальная точность оценки (дисперсия) времени прихода сигнала, обладающего автокорреляционной функцией $\psi(t)$ и при отношении мощности сигнала к мощности шума ρ , может быть определена по формуле

$$\sigma_\tau^2 = \frac{1}{\rho \cdot |\Psi''(0)|}, \quad (19)$$

в которой ρ – отношение сигнал/шум.

Вычислим вторую производную от (18) по времени, и найдем ее предел при стремлении времени к нулю. Результат подставим в (19):

$$\begin{aligned}&\frac{d^2}{dt^2} \psi(t) = \\ &= p \cdot \left[\frac{\sin(2 \cdot \pi \cdot f_B \cdot t)}{\pi \cdot f_B \cdot t^3} - 2 \cdot \frac{\cos(2 \cdot \pi \cdot f_B \cdot t)}{t^2} - \right. \\ &\quad \left. - 2 \cdot \frac{\pi \cdot f_B \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_B \cdot t)}{t} \right] \times \\ &\quad \times \lim_{t \rightarrow 0} \left| \frac{d^2}{dt^2} \Psi(t) \right| = \frac{4}{3} p \cdot \pi^2 \cdot f_B^2.\end{aligned}$$

Таким образом, для дисперсии оценки времени прихода сигнала получим

$$\sigma_\tau^2 = \frac{1}{\rho \cdot |\Psi''(0)|} = \frac{3}{\rho \cdot D \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot f_B^2},$$

или для оценки средней квадратической погрешности оценки дальности

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{0,4886}{\sqrt{\rho \cdot D \cdot f_B}} = \frac{0,4886 \cdot c}{\sqrt{\rho \cdot D \cdot f_B}} = \\ &= \frac{0,2757 \cdot \lambda}{\sqrt{\rho \cdot D}},\end{aligned}$$

где c – скорость света; λ – длина волны сигнала; ρ – отношение сигнал/шум; D – энергия сигнала.

Заключение

Приведенные в статье результаты исследования сигналов показывают, что метод синтеза сигналов с использованием задачи нелинейной оптимизации вполне работоспособен и может быть рекомендован специалистам, занимающимся синтезом сигналов с хорошими автокорреляционными свойствами.

Предложенный метод синтеза сигналов позволит создать радиотехнические устройства с существенно более высокими техническими характеристиками по точности измерения времени и дальности и скорости передачи информации в каналах с низким отношением сигнал/шум.

Библиографический список

1. Культин В. Б. Полосовой цифровой фильтр с временной обработкой в аппаратуре тональных рельсовых цепей / В. Б. Культин, С. А. Суханов, В. А. Ходаковский // Автоматика и телемеханика железных дорог России. Новая техника и новые технологии : сб. науч. трудов / ред. Вл. В. Сапожников, В. В. Сапожников, А. А. Прокофьев. – СПб. : ПГУПС, 2007. – С. 94–97.
2. Ходаковский В. А. Имитационное моделирование рельсовых цепей. Методы и инструментальные средства / В. А. Ходаковский, Д. С. Марков, М. Б. Соколов // Бюл. результатов науч. исследований. – 2014. – № 2 (11). – С. 30–44.
3. Ходаковский В. А. Методы и инструментальные средства имитационного моделирования рельсовых цепей / В. А. Ходаковский, Д. С. Марков, М. Б. Соколов // Развитие элементной базы и совершенствование методов построения устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. трудов / под ред. Вл. В. Сапожникова. – СПб. : ПГУПС, 2014. – С. 48–54.
4. Ходаковский В. А. Мера сходства узкополосных сигналов / В. А. Ходаковский, Т. В. Ходаковский // Автоматика на транспорте. – СПб. : ПГУПС, 2015. – Т. 1, № 2. – С. 180–194.
5. Ходаковский В. А. Моделирование многополосного фильтра / В. А. Ходаковский // Междунар.

конференция по мягким вычислениям и измерениям. – СПб. : СПбГЭТУ (ЛЭТИ), 2015. — Т. 1. – С. 145–148.

6. Ходаковский В. А. Синтез многополосного фильтра с требуемой частотной характеристикой / В. А. Ходаковский, Т. В. Ходаковский // Интеллектуальные технологии на транспорте. – СПб. : ПГУПС, 2015. – № 1. – С. 38–42.

7. Ходаковский В. А. О теореме отсчетов и ее применении для синтеза и анализа сигналов с ограниченным спектром / В. А. Ходаковский // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2017. – Т. 14, вып. 4. – С. 727–737.

8. Варакин Л. Е. Теория сложных сигналов / Л. Е. Варакин. – М. : Сов. радио, 1970. – 376 с.

9. Броннов С. А. Синтез уникальных фазоманипулированных сигналов для интеллектуальной системы обнаружения подвижных объектов / С. А. Броннов, А. В. Малеев, Я. В. Михайленко. – URL: <http://jurnal.org/articles/2008/izmer9.html> (дата обращения : 12.02.2018).

10. Стандарт беспроводной связи ШЕЕ 802.11. – URL : <http://compress.ru/article.aspx?id=17782> (дата обращения : 12.02.2018).

References

1. Kul'tin V. B., Sukhanov S. A. & Khodakovskii V. A. Polosovoi tsifrovoy filtr s vremennoi obrabotkoi v apparature tonalnykh relsovykh tsepei [Banded data filter with time processing in audio frequency track circuit hardware]. *Avtomatika i telemekhanika zheleznykh dorog Rossii. Novaia tekhnika i novye tekhnologii* [Russian railways' automatics and teleautomatics. New hardware and new technologies]. Coll. papers. Eds by V. I. V. Sapozhnikov, V. V. Sapozhnikov, A. A. Prokof'ev. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2007, pp. 94–97. (In Russian)

2. Khodakovskii V. A., Markov D. S. & Sokolov M. B. Imitatsionnoe modelirovanie relsovykh tsepei. Metody i instrumentalnye sredstva [Simulation modelling of track circuits. Methods and tools]. *Bulleten rezultatov nauch. issledovani* [Sci. research results bulletin], 2014, no. 2 (11), pp. 30–44. (In Russian)

3. Khodakovskii V. A., Markov D. S. & Sokolov M. B. Metody i instrumentalnye sredstva imitat-

sionnogo modelirovaniia relsovykh tsepei [Methods and tools for simulation modelling of track circuits]. *Razvitie elementnoi bazy i sovershenstvovanie metodov postroeniia ustroistv zheleznodorozhnoi avtomatik i telemekhaniki* [Development of element base and perfecting the methods for designing railway automation and telemechanics devices]. Coll. papers. Ed. by V. I. V. Sapozhnikov. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2014, pp. 48–54. (In Russian)

4. Khodakovskii V. A. & Khodakovskii T. V. Mera skhodstva uzkopolosnykh signalov [Similarity of narrow-band signals]. *Avtomatika na transporte* [Transport automatics], 2015, vol. 1, no. 2, pp. 180–194. (In Russian)

5. Khodakovskii V. A. Modelirovanie mnogopolosnogo filtra [Simulation of multiple band pass filter]. *Mezhdunarodnaia konferentsiia po miagkim vychisleniiam i izmereniiam* [Intern. conference on soft computing and measurements]. Saint Petersburg, SPbGETU (LETI) Publ., 2015, vol. 1, pp. 145–148. (In Russian)

6. Khodakovskii V. A. & Khodakovskii T. V. Sintez mnogopolosnogo filtra s trebuemoi chastotnoi kharakteristikoi [Designing multiple band pass filter with required frequency characteristics]. *Intellektualnye tekhnologii na transporte* [Intelligent technologies in transport], 2015, no. 1, pp. 38–42. (In Russian)

7. Khodakovskii V. A. O teoreme otschetov i ee primeneniia dlia sinteza i analiza signalov s ogranichenym spektrom [On sampling theorem and its application to synthesis and analysis of limited-spectrum signals]. *Izvestiia Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia* [Petersburg Transport University Herald], 2017, vol. 14, issue 4, pp. 727–737. (In Russian)

8. Varakin L. E. Teoriia slozhnykh signalov [Complex signal theory]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1970, 376 p. (In Russian)

9. Bronov S. A., Maleev A. V. & Mikhailenko Ya. V. Sintez unikalnykh fazomanipulirovannykh signalov dlia intellektualnoi sistemy obnaruzheniia podvizhnykh ob'ektov [Design of unique phase-shift keyed signals for intelligent system of mobile object detection]. URL: <http://jurnal.org/articles/2008/izmer9.html> (accessed: 12.02.2018). (In Russian)

10. Standart besprovodnoi sviazi SheEE 802.11 [Wireless communication standard SheEE 802.11]. URL: <http://compress.ru/article.aspx?id=17782> (accessed: 12.02.2018). (In Russian)

*ХОДАКОВСКИЙ Валентин Аветикович – д-р техн. наук, профессор, hva1104@mail.ru; ДЕГТЯРЕВ Валентин Григорьевич – д-р техн. наук, профессор, vdegt@list.ru; ГЕРАСИМЕНКО Петр Васильевич – д-р техн. наук, профессор, pv39@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); МИКОНИ Станислав Витальевич – д-р техн. наук, профессор (Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)).

621.314.21.042.53

М. А. Шакиров, А. А. Ткачук**Ф-ИНВАРИАНТНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ В ОБМОТКАХ
БРОНЕВОГО ДВУХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

Дата поступления: 18.06.2018

Решение о публикации: 17.10.2018

Аннотация

Цель: Подтверждение существования внутри первичной обмотки силового трансформатора броневых типа Φ -инвариантной поверхности, т. е. такой поверхности, которая охватывает магнитный поток Φ , не изменяющийся при вариациях нагрузки на вторичной обмотке. **Методы:** Доказательство базируется на разработанной авторами методике получения кривых распределения непрерывной функции магнитного потока $\Phi(r)$ вдоль радиуса r в стержне, окне и боковом ярме трансформатора с осевой симметрией на основе численного расчета и построения картин магнитных полей с использованием пакетов отечественной программы ELCUT. **Результаты:** Показано, что существование Φ -инвариантных поверхностей вытекает из анализа магнитоэлектрической 4Т-образной схемы замещения трансформатора, благодаря тому, что в ней одновременно с электрическими величинами отображаются магнитные потоки в отдельных частях магнитопровода и окна, а также потоки рассеяния, возникающие из-за конечного значения магнитной проницаемости стали. Практическое совпадение радиусов Φ -инвариантных поверхностей, полученных численно (по картинам полей) и по формулам, вытекающим из анализа 4Т-образной схемы замещения, подтверждают корректность этих формул. **Практическая значимость:** Определена роль Φ -инвариантных поверхностей в передаче мощности от обмотки к обмотке и понимании возникновения сверх- и антипотоков (в сравнении с потоком холостого хода) в отдельных частях стали в режимах короткого замыкания, от которых зависит электродинамическая стойкость силовых трансформаторов в этом режиме. Представлены соображения о существовании Φ -инвариантных поверхностей в условиях насыщения стали и наличия в ней активных потерь.

Ключевые слова: Трансформатор, первичная и вторичная обмотки, магнитный поток, схема замещения, короткое замыкание, холостой ход.

Mansur A. Shakirov, D. Eng. Sci., professor, manshak@mail.ru (Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University); ***Anton A. Tkachuk**, Cand. Eng. Sci., senior lecturer, associate professor, a.a.tkachuk@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) Φ -INVARIANT SURFACES IN DOUBLE-WOUND SHELL-TYPE TRANSFORMER COILS

Summary

Objective: Confirmation of the existence of Φ -invariant surface inside the primary coil of shell-type power transformer, i. e. a surface which encircles the magnetic flux Φ which does not change despite fluctuations of loads in secondary coils. **Methods:** The proof is based on a method, developed by the authors, of obtaining distribution curves of continuous function of magnetic flux $\Phi(r)$ along the r radius in the core, window and yoke of the transformer with axial symmetry on the basis of numerical calculation and building the picture of magnetic fields with the use of Russian software package ELCUT. **Results:** It is shown that the existence of Φ -invariant surfaces proceeds from the analysis of electromagnetic 4T-circuit for transformer substitution as it reflects magnetic flows in individual parts of magnetic core and window as well as leakage flux which occur due to finite value of steel's magnetic inductivity. Practical agreement of Φ -invariant surfaces' radii, obtained numerically (from field pictures) and by

formulae produced by analysis of 4T-circuit's equivalent circuit confirms correctness of these formulae.

Practical importance: The role of Φ -invariant surfaces in transferring capacity from coil to coil and in understanding the appearance of super- and anti-flows (in comparison with x.x. flow) in isolated parts of steel in short-circuit regime, on which the electro-dynamic withstand of power transformers in this regime depends, is determined. Considerations on the existence of Φ -invariant surfaces under conditions of saturation of steel and occurrence of resistance losses in it are presented.

Keywords: Transformer, primary and secondary coils, magnetic flux, equivalent circuit, short circuit, no load operation (x.x.).

Введение

Уровень состояния железнодорожного транспорта напрямую зависит от развития объектов его инфраструктуры, одним из самых распространенных элементов которой является силовой трансформатор. По своему назначению и конструкции он представляет собой едва ли ни одно из простейших устройств электроэнергетики, в частности тягового электроснабжения. Тем удивительнее непереставшее, наблюдаемое в течение более 100 лет количество работ, посвященных исследованию его свойств и поведения. Причина такой ситуации – явно и неявно выражаемая авторами неудовлетворенность традиционной теорией трансформаторов с ее Т-, П- и Г-образными схемами замещения [1–8]. Отсутствие убедительной физической основы данных моделей вызывает непрекращающиеся диспуты вокруг того, какая из них *попригоднее* в том или ином случае [9], что в итоге приводит к сомнительным выводам при анализе аварийных ситуаций, являющихся также предметом беспрестанных обсуждений на сессиях СИГРЕ и МОК [10].

Прервать это беспрецедентное по своей продолжительности состояние можно только полным отказом от надуманных догм традиционной теории, включая лежащий в ее основе принцип действия трансформатора, основанный на сомнительной концепции об определяющей роли так называемого «*намагничивающего тока*». Несуразность проявляется в том, что по такой логике выходит, что трансформатор с наилучшей сталью ($\mu_{\text{сталь}} = \infty$) работать не сможет, так как в

этом случае *намагничивающий ток* обращается в нуль, что порождает абсурдные высказывания вроде: «... нельзя использовать понятие $\mu_{\text{сталь}} = \infty$, особенно, если речь идет о физическом понимании работы трансформатора ...» [11, с. 61].

Здесь проходит линия размежевания традиционной и новой теорий [12, 13], которая начинается с объяснения передачи энергии в трансформаторе с $\mu_{\text{сталь}} = \infty$ посредством вектора Пойнтинга, направленного от обмотки к обмотке в окне трансформатора; в этом случае потери в стали отсутствуют и ток намагничивания (ток холостого хода (х.х.)) равен нулю. При $\mu_{\text{сталь}} \neq \infty$ возникают дополнительные составляющие вектора Пойнтинга, направленные от обмоток в магнитопровод и определяющие *утечку мощности* на покрытие активных и реактивных потерь в стали; теперь ток намагничивания не равен нулю и служит признаком некачественности стали. Чем выше качество стали, тем он меньше. Как видно, в новой теории ток намагничивания проявляется как паразитный эффект, принимая смысл *тока утечки* (а не движущей силой рабочего процесса) в трансформаторе, что наглядно проявляется в его физико-математической модели в виде 4Т-образной схемы замещения [13, 14]. Адекватность этой схемы проявляется в отображении на ней наряду с электрическими величинами также *реальных* (т. е. поддающихся измерению) магнитных потоков в толще обмоток, промежутке между ними, а также в отдельных участках стали магнитопровода с учетом насыщения в любых условиях работы трансформатора. Еще одним подтверждением фи-

зичности и адекватности 4Т-образной схемы замещения является обнаружение с ее помощью нового физического эффекта – образования *А-инвариантной* (или *Ф-инвариантной*) *поверхности* в толще первичной обмотки трансформатора, т. е. такой поверхности, внутри которой магнитный поток Φ не зависит от нагрузки. Это открытие в случае идеализированного трансформатора ($\mu_{\text{сталь}} = \infty$) получило строгое математическое подтверждение в работе [14], в которой также установлено, что условием передачи активной мощности является наличие угла между потоками, ограниченными *Ф-инвариантными* поверхностями обмоток.

Цель настоящей работы – проверка существования *Ф-инвариантных поверхностей* в реальных трансформаторах ($\mu_{\text{сталь}} \neq \infty$) и осмысление их роли в понимании динамической стойкости трансформаторов в режиме короткого замыкания (к.з.), что связано с оценкой возникающих в этом режиме *сверх- и антипотоков* в сравнении с потоком х.х. Φ_0 [15]. В качестве инструмента исследования, помимо 4Т-образной схемы замещения, использовался отечественный пакет программ анализа полей ELCUT.

Смысл картины переменного магнитного поля

Линии магнитного поля, очевидно, имеют методическое значение лишь тогда, когда их форма не зависит от времени, что возможно, если индукции во всех точках линии совпадают по фазе или находятся в противофазе. Тогда за период синусоидального колебания линия сохранит свою конфигурацию при синхронном изменении интенсивности индукций во всех ее точках. Теоретически такое условие достигается при следующих допущениях:

- сопротивления обмоток трансформатора постоянному току $R_1 = R_2 = 0$;
- нагрузка чисто реактивная или нулевая (режим к. з.);

- активные потери в стали равны нулю;
- магнитная проницаемость стали конечна, причем в любом k -м участке магнитопровода $\mu_k = \text{const}$.

При этих допущениях не имеет значения, для какого момента строится картина магнитного поля. В настоящей работе она строится для токов, совпадающих с их действующими значениями, что позволяет все вычисления вести относительно действующих значений магнитных величин (индукций и потоков) и в них же представлять картины магнитных полей, которые рассчитываются, таким образом, в магнитостатической постановке.

Все картины полей будем строить для повышающего трансформатора броневых типа с кольцевым ярмом и высотой обмоток, равных высоте окна (рис. 1, А). Габариты трансформатора: $D_{\text{leg}} = 430$ мм, высота окна $h = 870$ мм. Геометрические данные: $\delta_1 = 30$ мм, $a = 60$ мм, $\delta = 50$ мм, $b = 40$ мм, $\delta_2 = 50$ мм, $D_a = 550$ мм, $D_\delta = D_{12} = 660$ мм, $D_b = 750$ мм. Радиусы граничных поверхностей стержня, обмоток и бокового ярма составляют: $r_{\text{leg}} = 215$ мм, $r_1^a = 245$ мм, $r_2^a = 305$ мм, $r_1^b = 355$ мм, $r_2^b = 395$ мм, $r_{\Delta 1} = \frac{D_{\Delta 1}}{2} = 445$ мм, $r_{\Delta 2} = \frac{D_{\Delta 2}}{2} = \sqrt{r_{\text{leg}}^2 + r_{\Delta 1}^2} \approx 495$ мм.

Цилиндрический бак находится на расстоянии $\Delta = 150$ мм от магнитопровода. Высота обмоток принимается равной высоте окна h . Число витков $w_a = 130$. Коэффициент трансформации $k = (w_a / w_b) = 11 / 12$.

Индуктивность к. з. L_{sh}^a , приведенная к a -обмотке, рассчитывается с помощью соотношений [14]

$$L_a = \frac{\mu_0 \pi (D_a + a / 2) a}{3h} w_a^2,$$

$$L_\delta = \frac{\mu_0 \pi D_\delta \delta}{h} w_a^2,$$

$$L_b' = \frac{\mu_0 \pi (D_b - b / 2) b}{3h} w_a^2,$$

($r = 0$) оказываются всегда равными напряжениям на зажимах трансформатора:

$$k_0 \dot{\Phi}_{r_0^a} = \dot{U}_a, \quad k_0 \dot{\Phi}_{r_0^b} = \dot{U}'_b,$$

где $k_0 = j\omega w_a$. Отсюда вытекает, что если напряжения на входах заданы, то потоки

$$\dot{\Phi}_{r_0^a} = \frac{\dot{U}_a}{k_0} = \dot{\Phi}_0, \quad (2)$$

$$\dot{\Phi}_{r_0^b} = \frac{\dot{U}'_b}{k_0} = \dot{\Phi}_0 \quad (3)$$

внутри цилиндрических поверхностей соответственно радиуса r_0^a и r_0^b окажутся *стро-го детерминированными* и равными потоку х. х. $\dot{\Phi}_0$.

Из (2) вытекает следующее. При заданном напряжении U_a на первичной a -обмотке поток внутри r_0^a -поверхности не зависит от нагрузки и равен потоку х. х. Это означает, что r_0^a является радиусом Φ -инвариантной (*характеристической*) поверхности относительно нагрузки на b -обмотке, что иллюстрирует рис. 1, Г. Кривые на нем построены с помощью соотношения

$$\Phi(r) = 2\pi r \cdot A(r),$$

где $A(r)$ – векторный потенциал, формулы которого приведены в [14].

Аналогичным образом, исходя из рис. 1, В и соотношения (3), доказывается Φ -инвариантность r_0^b -поверхности относительно нагрузки на a -обмотке, когда первичной является b -обмотка и задано напряжение U_b (или U'_b).

Одновременно *характеристическая* поверхность играет роль *нуль-поверхности* в режиме к. з. обмотки, внутри которой она находится, как охватывающая нулевой поток в этом режиме и, следовательно, определяющая *линию раздела потоков* в окне при к. з.

Формулы для определения радиусов Φ -инвариантных поверхностей в идеализированном трансформаторе получены в [14]:

$$r_0^a \approx r_1^a + \frac{a}{\sqrt{6}} \sqrt{1 + \frac{r_1^a}{r_2^a}} \approx r_1^a + \frac{a}{\sqrt{3}}, \quad (4)$$

$$r_0^b \approx r_2^b - \frac{b}{\sqrt{6}} \sqrt{1 + \frac{r_2^b}{r_1^b}} \approx r_2^b - \frac{b}{\sqrt{3}}. \quad (5)$$

Для рассматриваемого примера, согласно кривым (рис. 1, Г),

$$r_0^a = 280,7 \text{ мм}, \quad r_0^b = 372,5 \text{ мм}. \quad (6)$$

Практически такие же результаты получаем по формулам (4) и (5):

$$r_0^a \approx 278 \text{ мм}, \quad r_0^b = 371,3 \text{ мм}. \quad (7)$$

Обе характеристические поверхности и их радиусы (6) показаны на рис. 1, А. В работе [14] показано, что условием передачи активной мощности является наличие угла между потоками, ограниченными поверхностями этих радиусов.

Кривая $\Phi(r)$ для режима х. х. на рис. 1, Г поясняет проблему *электротонического состояния* материи на языке, доступном для электротехников в обход сложного квантово-механического его подтверждения в условиях постоянного магнитного поля, выполненного Д. Бомом и Ю. Ароновым в 1956 г. [16, 17]. Названное явление в идеализированном трансформаторе проявляется в возникновении (при отсутствии тока в первичной a -обмотке, находящейся под действием синусоидально изменяющегося напряжения U_a) электродвижущей силы (ЭДС) в разомкнутой вторичной b -обмотке при полном отсутствии в зоне ее расположения поля магнитной индукции, тогда как векторный потенциал в этой зоне характеризуется распределением $A(r) = \Phi(r)/2\pi r$. Тем самым выявляется тождественность количественного выражения интенсивности электротонического состояния с векторным потенциалом, а через соотношение $\mathbf{E} = -\partial \mathbf{A} / \partial t$ (или $\dot{E}(r) = -j\omega \dot{A}(r)$) объясняется появление ЭДС в b -обмотке при х. х., а так-

Часть потоков из стали вытесняется в пространство между ней и баком ($\dot{\Phi}_a^o, \dot{\Phi}_b^o, \dot{\Phi}_\Delta$), другая – в зоны окна ($\dot{\Phi}_{\delta 1}, \dot{\Phi}_{\delta 2}$), прилегающих к стали. Эти потоки как следствия конечности $\mu_{\text{сталь}}$ являются *истинными* потоками рассеяния. Между ними и основными потоками, а также функцией $\dot{\Phi}(r)$ имеют место следующие связи, вытекающие из аналога первого закона Кирхгофа для магнитных цепей:

$$\dot{\Phi}(r_1^a) = \dot{\Phi}_{leg} + \dot{\Phi}_{\delta 1}, \quad (10)$$

$$\dot{\Phi}(r_2^a) = \dot{\Phi}_{a\delta} + \dot{\Phi}_a^o = \dot{\Phi}(r_1^a) - \dot{\Phi}_a, \quad (11)$$

$$\dot{\Phi}(r_1^b) = \dot{\Phi}_{\delta b} + \dot{\Phi}_b^o = \dot{\Phi}(r_2^a) - \dot{\Phi}_\delta, \quad (12)$$

$$\dot{\Phi}(r_2^b) = \dot{\Phi}_{side} + \dot{\Phi}_{\delta 2} + \dot{\Phi}_\Delta = \dot{\Phi}(r_1^b) - \dot{\Phi}_b. \quad (13)$$

На данном этапе активными потерями пренебрегаем. Для учета магнитных сопротивлений участков стали к схеме замещения идеализированного трансформатора (см. рис. 1, Б) подключены четыре поперечные ветви *намагничивания* с линейными индуктивностями $L_{leg}, L_{a\delta}, L'_{\delta b}, L'_{side}$, к которым добавлены четыре *индуктивности рассеяния* $L_{\delta 1}, L_a^o, L_b^o$ и $(L'_\Delta + L'_{\delta 2})$ (рис. 2, Б). Формулы для их вычисления приведены в [12]. Для простоты здесь, как и в [12], не представлены индуктивности рассеяния, отражающие вытесненные потоки из стержня в зону внутренней *a*-обмотки и из бокового ярма в зону внешней *b*-обмотки, что для силовых трансформаторов вполне допустимо.

Из физических соображений с учетом симметрии конструкции трансформатора относительно его средней плоскости ($z = 0$) вытекает, что в данной плоскости должны существовать Φ -инвариантные *окружности*. Это доказывается также путем цепочки эквивалентных преобразований схемной модели (рис. 2, Б), приводящих ее к схеме, приведенной на рис. 2, В. Вначале выполнена замена параллельного соединения двух ветвей – ветви, состоящей из индуктивности $(-L_a / 2)$ и ЭДС $\dot{E} = \dot{U}_a$, и ветви с индуктивностью $(L_{leg} + L_{\delta 1})$ – одной эквива-

лентной ветвью, представленной на рис. 2, В индуктивностью $(-\xi_a L_a / 2)$ и ЭДС $\xi_a \dot{U}_a$, где

$$\xi_a = \frac{L_{leg} + L_{\delta 1}}{L_{leg} + L_{\delta 1} - L_a / 2} = 1 + \frac{L_a / 2}{L_{leg} + L_{\delta 1} - L_a / 2} \approx 1 + \frac{L_a}{2(L_{leg} + L_{\delta 1})}. \quad (14)$$

Далее в этой схеме произведено расщепление величины $3L_a / 2$ по аналогии с (1), но с учетом коэффициента ξ_a :

$$\frac{3L_a}{2} = \xi_a \frac{L_a}{2} + \frac{(3 - \xi_a)}{2} \cdot L_a. \quad (15)$$

Узел между образовавшимися элементами обозначен через r_0^a . Аналогичные преобразования представлены в правой части схемы:

$$\frac{3L'_b}{2} = \xi_b \frac{L'_b}{2} + \frac{(3 - \xi_b)}{2} \cdot L'_b, \quad (16)$$

где

$$\xi_b = \frac{L'_{side} + L'_{\delta 2} + L'_\Delta}{L'_{side} + L'_{\delta 2} + L'_\Delta - L'_b / 2} \approx 1 + \frac{L_b}{2(L'_{side} + L'_{\delta 2} + L'_\Delta)}, \quad (17)$$

с образованием узла r_0^b . Кроме того, на рис. 2, В наряду с потоками (при учете выражений (14)–(17)) отображены значения функции потока $\Phi(r)$ на окружностях в средней части обмоток радиусов $r_1^a, r_2^a, r_1^b, r_2^b$ в соответствии с соотношениями (10)–(13). Непосредственно из рис. 2, В заключаем, что напряжения от r_0^a - и r_0^b -узлов в направлении общего узла ($r = 0$) оказываются независимо от нагрузки равными напряжениям:

$$k_0 \dot{\Phi}_{r_0^a} = \xi_a \dot{U}_a, \quad k_0 \dot{\Phi}_{r_0^b} = \xi_b \dot{U}'_b, \quad (18)$$

откуда вытекает, что если напряжения на входах заданы, то потоки

$$\dot{\Phi}_{r_0^a} = \frac{\xi_a \dot{U}_a}{k_0} = \dot{\Phi}_{r_0^a}^{x.x}, \quad (19)$$

$$\dot{\Phi}_{r_0^b} = \frac{\xi_b U'_b}{k_0} = \dot{\Phi}_{r_0^b}^{x,x}, \quad (20)$$

внутри окружностей соответственно радиуса r_0^a или r_0^b в средней части обмоток ($z = 0$) будут *детерминированными* и равными соответствующим потокам х.х., охватываемыми этими окружностями (как и в случае идеализированного трансформатора, в котором $\dot{\Phi}_{r_0^a}^{x,x} = \dot{\Phi}_{r_0^b}^{x,x} = \dot{\Phi}_0$). Выражения (18)–(20) подтверждают наличие общей точки пересечения семейства кривых (рис. 2, Г), построенных для функции $\dot{\Phi}(r) / \dot{\Phi}_{r_0^a}^{x,x}$ в средней плоскости ($z = 0$) с помощью программы ELCUT на основе методики, представленной в Приложении. Выбор функции $\dot{\Phi}(r) / \dot{\Phi}_{r_0^a}^{x,x}$ обусловлен тем, чтобы это семейство при $\mu_{\text{сталь}} \neq \infty$ пересекалось в точке $(r_0^a, 1)$, как и в случае идеализированного трансформатора на рис. 1, Г, где $\dot{\Phi}_0 \equiv \dot{\Phi}_{r_0^a}^{x,x}$.

Из рис. 2, Г следует, что при $\mu_{\text{сталь}} = 100\mu_0$ значения r_0^a и r_0^b практически совпадают с (6) и (7). Из кривой для х.х. следует, что в данном случае величины $\dot{\Phi}_{r_0^a}^{x,x} \approx \dot{\Phi}_{r_{\text{leg}}}^{x,x} \approx \dot{\Phi}_0$. Благодаря этому, как и для идеализированного трансформатора, по кривой к.з. находим (рис. 2, Г):

– сверхпоток к.з. в стержне характеризуется отрезком $p_1 q_1 = 1,0955$ (при $\mu_{\text{сталь}} = \infty$ на рис. 1, Г: отрезок $p_1 q_1 = 1,105$),

– антипоток к.з. в ярме характеризуется отрезком $p_2 q_2 = -0,08787$ (при $\mu_{\text{сталь}} = \infty$ на рис. 1, Г: отрезок $p_2 q_2 = -0,088$).

Как видно, эти величины отличаются от представленных на рис. 1, Г менее чем на 1%.

Ф-инвариантные поверхности в трансформаторе при $\mu_{\text{сталь}} \neq \infty$

Из допущения о параллельности линий магнитного поля в окне относительно оси стержня следует, что Ф-инвариантные окружности при достаточно больших значениях $\mu_{\text{сталь}}$ должны находиться на Ф-инвариантных поверхностях. Это подтверждается кривыми $\dot{\Phi}(r)$ для случая $\mu_{\text{сталь}} = 100\mu_0$ и $h_{\text{обм}} = h$, построенными с помо-

щью программы ELCUT в плоскости $z = 3h/8$, которые практически совпадают с кривыми рис. 2, Г и потому здесь не приводятся. При этом и значения радиусов r_0^a и r_0^b практически равны величинам (6) и (7). Таким образом, при $\mu_{\text{сталь}} = 100\mu_0$ можно говорить о существовании Ф-инвариантных *поверхностей*, радиусы которых можно определять по формулам (4), (5) для идеализированного трансформатора. Потому Ф-инвариантные поверхности на рис. 2, А показаны совпадающими с Ф-инвариантными поверхностями на рис. 1, А.

Ф-инвариантные поверхности в реальном трансформаторе

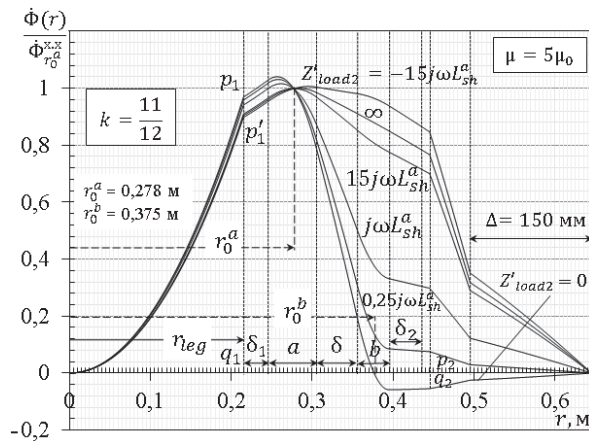
Сказанное с большой вероятностью можно отнести также к *реальным* силовым трансформаторам с активными потерями в стали и обмотках в условиях насыщения стали. Это косвенно подтверждается семейством кривых $\dot{\Phi}(r)$ для рассматриваемого примера при сильно заниженном значении $\mu_{\text{сталь}} = 5\mu_0$, построенных в плоскости как $z = 0$ (рис. 3, А), так и $z = 3h/8$ (рис. 3, Б), и практическим совпадением радиусов r_0^a и r_0^b (они представлены непосредственно на графиках) в обоих случаях с результатами (6) и (7). Более того, практически такие же значения имеют радиусы r_0^a и r_0^b и в случае $\mu_{\text{сталь}} = \mu_0$ (рис. 4, А, Б).

Однако, если при $\mu_{\text{сталь}} \geq 100\mu_0$, как отмечалось выше, $\dot{\Phi}_{r_0^a}^{x,x} \approx \dot{\Phi}_{r_{\text{leg}}}^{x,x} \approx \dot{\Phi}_0$, то при $\mu_{\text{сталь}} = 5\mu_0$ это условие не соблюдается, и для оценки сверхпотока в стержне и антипотока в ярме при к.з. следует воспользоваться отношениями, которые для случая, приведенного на рис. 3, А ($z = 0$), принимают вид

$$k_{\text{leg}} = \frac{\dot{\Phi}_{r_{\text{leg}}}^{\text{к.з.}}}{\dot{\Phi}_{r_{\text{leg}}}^{x,x}} = \frac{p_1 q_1}{p'_1 q_1} = 1,072$$

(при $\mu_{\text{сталь}} = \infty$ на рис. 1, Г: $\frac{\dot{\Phi}_{r_{\text{leg}}}^{\text{к.з.}}}{\dot{\Phi}_{r_{\text{leg}}}^{x,x}} = p_1 q_1 = 1,105$),

А



Б

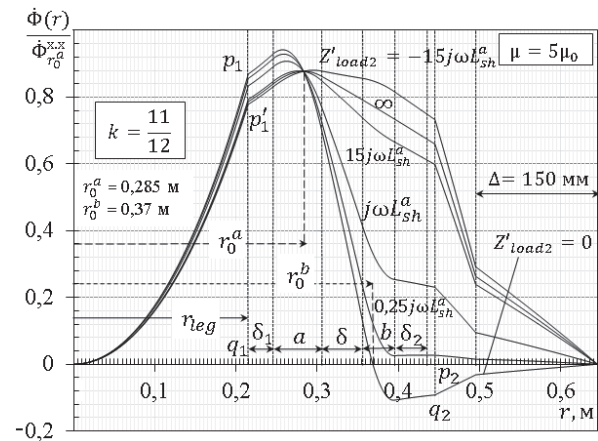
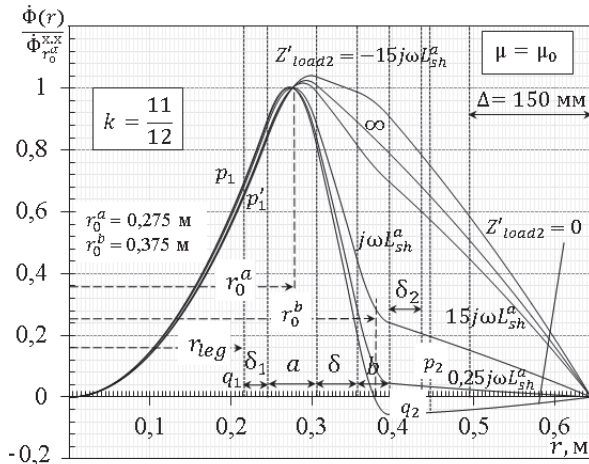


Рис. 3. Кривые $\Phi(r)$ в плоскостях $z=0$ (А) и $z=3h/8$ (Б) трансформатора при $\mu_{\text{сталь}} = 5\mu_0$ для реактивных нагрузок

А



Б

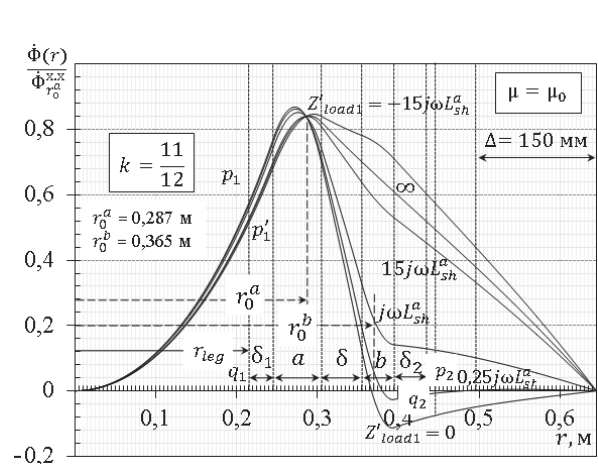


Рис. 4. Кривые $\Phi(r)$ в плоскостях $z=0$ (А) и $z=3h/8$ (Б) трансформатора при $\mu_{\text{сталь}} = \mu_0$ для реактивных нагрузок

$$k_{\text{side}} = \frac{\dot{\Phi}_{r\Delta 1}^{\text{К.З}}}{\dot{\Phi}_{\eta_{\text{leg}}}^{\text{X.X}}} = \frac{p_2 q_2}{p'_1 q_1} = 0,060$$

(при $\mu_{\text{сталь}} = \infty$ на рис. 1, Г: $\frac{\dot{\Phi}_{r\Delta 1}^{\text{К.З}}}{\dot{\Phi}_{\eta_{\text{leg}}}^{\text{X.X}}} = p_2 q_2 = -0,088$).

Для случая рис. 3, Б ($z=3h/8$) имеем $k_{\text{leg}} = 1,105$ и $k_{\text{side}} = -0,115$. Как видно, даже при $\mu_{\text{сталь}} = 5\mu_0$ эти оценки близки к полученным при $\mu_{\text{сталь}} = \infty$.

В случае $\mu_{\text{сталь}} = \mu_0$ из рис. 4, А следует, что в плоскости $z=0$

$$k_{\text{leg}} = \frac{p_1 q_1}{p'_1 q_1} = 1,064, \quad k_{\text{side}} = \frac{p_2 q_2}{p'_1 q_1} = -0,077,$$

а в плоскости $z=3h/8$ (рис. 4, Б)

$$k_{\text{leg}} = \frac{p_1 q_1}{p'_1 q_1} = 1,104, \quad k_{\text{side}} = \frac{p_2 q_2}{p'_1 q_1} = -0,145,$$

что также вместе с результатами анализа кривых $\Phi(r)/\Phi_{r_0^a}^{\text{X.X}}$ при $\mu_{\text{сталь}} = 100\mu_0$ и $\mu_{\text{сталь}} = 5\mu_0$ (см. рис. 2, Г и рис. 3) можно принять в качестве доводов о наличии (приблизительно) в реальном трансформаторе Φ -инвариантных поверхностей. Можно также считать прибли-

женно выполняющимися свойства, перечисленные в замечании, которые проявляются тем очевиднее, чем выше значение $\mu_{\text{сталь}}$.

Заключение

Результаты выполненного численного построения и анализа картин магнитных полей в трансформаторе броневых типа подтверждают вытекающее из его 4Т-образной схемной модели существование Φ -инвариантных поверхностей. Это свидетельствует о корректности физико-математических идей, которые привели к созданию 4Т-образной схемы замещения. Установлена связь Φ -инвариантных поверхностей с явлением возникновения сверх- и антипоток при к.з. трансформатора, что важно для оценки электродинамической стойкости трансформаторов в аварийных ситуациях.

Задачей следующего этапа является разработка алгоритма построения семейства кривых распределения потока при любой активно-реактивной нагрузке с целью подтверждения явления Φ -инвариантности в общем случае с учетом потерь в стали трансформатора. В методическом отношении по-прежнему актуален поиск доступного физического толкования этого открытия и его значения для понимания работы трансформатора в любых условиях его работы.

Правомерность постановки этих задач вытекает из предварительных наблюдений изложенных открытий, полученных авторами в результате построения и анализа полей в броневых трансформаторах с дисковыми и чередующимися обмотками, а также в стержневых и тороидальных трансформаторах.

Приложение

Алгоритм построения магнитного поля двухобмоточного трансформатора при реактивных нагрузках с применением программы ELCUT

Рассмотрим алгоритм для трансформатора с данными, приведенными в примере при

сильно заниженном значении $\mu_{\text{сталь}} = 5\mu_0$. Поле осесимметрично. Поэтому в файл исходных данных программы ELCUT заносятся:

- осесимметричная геометрия магнитопровода и обмоток;
- граничные условия на поверхности бака; поскольку он экранирует магнитное поле, то на его поверхности векторный потенциал принимается равным нулю;
- значения относительной магнитной проницаемости участков магнитопровода, например μ_{leg} , μ_{side} и др.; в изучаемом случае примем, что

$$\mu_{\text{leg}} = \mu_{\text{side}} = 5\mu_0;$$

- плотности электрических токов δ_1 и δ_2 в сечении соответственно внутренней и внешней обмоток:

$$\delta_1 = \frac{w_1 I_1}{ah_{\text{о61}}}, \quad \delta_2 = \frac{w_2 I_2}{bh_{\text{о62}}},$$

где I_1 и I_2 – токи обмоток, предварительно вычисляемые (при известном напряжении U_1 первичной обмотки) с целью построения магнитного поля для заданного значения реактивной нагрузки $Z_{\text{load}} = \pm jx_{\text{load}}$.

Величины I_1 и I_2 находим по формулам для токов трансформатора с линейными характеристиками, что требует предварительного определения собственных (L_1, L_2) и взаимной (M) индуктивностей обмоток при заданном $\mu_{\text{сталь}} = 5\mu_0$, которые здесь рассчитываются по методу конечных элементов (МКЭ) с помощью программы ELCUT. Методика их вычислений и расчета индуктивности к.з. включает четыре этапа.

Э т а п 1. *Определение собственной индуктивности L_1 внутренней обмотки трансформатора.* Задаемся токами $I_1 = 1$ А и $I_2 = 0$. Находим плотность тока внутренней обмотки трансформатора, учитывая, что ее высота равна высоте окна:

$$\delta_1 = \frac{I_1 w_1}{ah_{\text{о6м}}} = \frac{1 \cdot 130}{0,06 \cdot 0,87} = 2,49042 \cdot 10^3 \text{ А/м}^2.$$

Плотность тока внешней обмотки $\delta_2 = 0$. Выполнив в программе ELCUT расчет энергии магнитного поля, создаваемого током внутренней обмотки, получаем $W_1 = 0,002665$ Дж. Так как во время моделирования магнитного поля рассматривалась только 1/4 часть всего трансформатора, то результирующее значение энергии определяется как $W_{\text{м.рез1}} = 4W_1 = 4 \cdot 0,002665 = 0,01066$ Дж. Воспользовавшись выражением $W_1 = LI_1^2 / 2$ (и учитывая, что $I_1 = 1$ А), находим индуктивность внутренней обмотки $L_1 = 2W_{\text{м.рез1}} = 2 \cdot 0,01066 = 0,02132$ Гн.

Э т а п 2. Определение собственной индуктивности L_2 внешней обмотки трансформатора. Задаемся токами $I_1 = 0$ и $I_2 = 1$ А. Определяем плотность тока внешней обмотки трансформатора:

$$\delta_2 = \frac{I_2 w_2}{bh_{\text{обм}}} = \frac{1 \cdot 142}{0,04 \cdot 0,87} = 4,08046 \cdot 10^3 \text{ А/м}^2.$$

Плотность тока внешней обмотки $\delta_1 = 0$. В результате расчета энергии магнитного поля, создаваемого внешней обмоткой, получаем $W_2 = 0,003543$ Дж. Результирующее значение энергии определяется как $W_{\text{м.рез2}} = 4W_2 = 4 \cdot 0,003543 = 0,014172$ Дж. Воспользовавшись выражением $W_2 = LI_2^2 / 2$ (и учитывая, что $I_2 = 1$ А), находим индуктивность внутренней обмотки $L_2 = 2W_{\text{м.рез2}} = 2 \cdot 0,014172 = 0,028344$ Дж.

Э т а п 3. Определение взаимной индуктивности M между обмотками. В отличие от предыдущих этапов задаемся ненулевыми значениями токов обеих обмоток, например $I_1 = 1$ А и $I_2 = -1$ А. Очевидно, плотности токов в каждой обмотке совпадают с полученными выше:

$$\delta_1 = 2,49042 \cdot 10^3 \text{ А/м}^2,$$

$$\delta_2 = -4,08046 \cdot 10^3 \text{ А/м}^2.$$

Энергия магнитного поля 1/4 части трансформатора в этом случае, выданная программой ELCUT, $W_{12} = 0,001048$ Дж. Результирующее значение энергии магнитного поля

$W_{12\text{рез}} = 4W_{12} = 0,004192$ Дж. Так как $I_1 = -I_2 = 1$ А, то, согласно [15], взаимная индуктивность M определяется из соотношения

$$\begin{aligned} M &= W_{\text{м.рез1}} + W_{\text{м.рез2}} - W_{12\text{рез}} = \\ &= 0,01066 + 0,014172 - 0,004192 = \\ &= 0,02064 \text{ Гн.} \end{aligned}$$

Э т а п 4. Вычисление L_{sh}^a . Индуктивность к. з. трансформатора при $\mu_{\text{сталь}} = 5\mu_0$ равна

$$\begin{aligned} L_{sh}^a &= L_1 - M^2 / L_2 = 0,02132 - \\ &- 0,02064^2 / 0,028344 = 6,29 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \end{aligned}$$

В целях удобства сопоставления магнитных полей трансформаторов с $\mu_{\text{сталь}} \neq \infty$ и $\mu_{\text{сталь}} = \infty$ при реактивной нагрузке полезно воспользоваться следующими рекомендациями (важными также при анализе работ типа [18–20]).

1. Реактивную нагрузку следует представлять, как и на рис. 2, G , в долях сопротивления к. з. трансформатора:

$$Z_{\text{loud}} = \pm jx_{\text{loud}} = j\lambda\omega L_{sh}^a,$$

где λ – любой вещественный коэффициент (на рис. 2, G использованы значения $\lambda = 0; 0,25; 1; 15; -15$). Тогда в соответствии с известными соотношениями для трансформатора с линейными характеристиками выражения для токов обмоток при заданном $\pm jx_{\text{loud}}$ упрощаются:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{U_1}{\omega L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{\omega L_2 \pm x_{\text{loud}}}} = \\ &= \frac{U_1}{\omega L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{\omega L_2 + \lambda \omega L_{sh}^a}} = \frac{U_1}{\omega \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2 + \lambda L_{sh}^a} \right)}, \\ I_2 &= -\frac{M}{L_2 + \lambda L_{sh}^a} I_1. \end{aligned}$$

В частности, при к. з. внешней обмотки ($\lambda \rightarrow 0$) имеем

$$I_1^{к.з. \text{ внеш}} = \frac{U_1}{\omega \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2} \right)},$$

$$I_2^{к.з. \text{ внеш}} = -\frac{M}{L_2} I_1^{к.з. \text{ внеш}}.$$

Токи в режиме х. х. ($\lambda \rightarrow \infty$)

$$I_0 = \frac{U_1}{\omega L_1}, \quad I_2 = 0.$$

2. Поскольку кривые $\Phi(r) / \Phi_{r_0^a}^{x.x}$ строятся в относительных единицах, то можно задаться любым первичным напряжением U_1 , которому будет соответствовать определенная величина $\dot{\Phi}_{r_0^a}^{x.x}$. Найдя при этом напряжении и заданной реактивной нагрузке величины $\Phi(r)$, далее необходимо поделить все значения $\dot{\Phi}(r)$ на $\dot{\Phi}_{r_0^a}^{x.x}$ ($\dot{\Phi}_{r_0^a}^{x.x}$ и r_0^a можно получить по пересечению кривых $\Phi(r)$ при х. х. и к. з.). Далее действия повторяются для новой реактивной нагрузки с последующим делением на ту же величину $\dot{\Phi}_{r_0^a}^{x.x}$. Однако деления можно избежать, если выбрать U_1 таким, что соответствующее ему значение $\dot{\Phi}_{r_0^a}^{x.x} = 1$ Вб. Чтобы найти такое напряжение для трансформатора при $\mu_{\text{сталь}} = 5\mu_0$, с помощью ELCUT вначале зададимся произвольной величиной $U_1 = U_1'$, например

$$U_1' = 2\pi f w_1 \Phi_{r_0^a}^{x.x} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 130 \cdot 1 = 40820 \text{ В},$$

при этом ток х. х., протекающий по внутренней обмотке трансформатора, оказывается равным

$$I_0' = \frac{U_1'}{2\pi f L_1} = \frac{40820}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,02132} = 6097,561 \text{ А},$$

а плотность его составляет

$$\begin{aligned} \delta_0' &= \frac{I_0' w_1}{ah_{\text{обм}}} = \\ &= \frac{6097,561 \cdot 130}{0,06 \cdot 0,87} = 15,1855 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2. \end{aligned}$$

Введя это значение плотности тока в ELCUT, находим поток х. х.

$$\Phi_{r_0^a}^{x.x} = 0,08684 \text{ Вб},$$

отвечающий напряжению $U_1' = 40820 \text{ В}$. Можем написать пропорцию

$$U_1' = 40820 \Leftrightarrow \Phi_{r_0^a}^{x.x} = 0,08684,$$

$$U_1 = ? \Leftrightarrow \Phi_{r_0^a}^{x.x} = 1,0,$$

откуда определяем напряжение питающей обмотки, обеспечивающее $\Phi_{r_0^a}^{x.x} = 1$ Вб при $\mu_{\text{сталь}} = 5\mu_0$:

$$U_1 = \frac{U_1' \cdot \Phi_{r_0^a}^{x.x}}{\Phi_{r_0^a}^{x.x}} = \frac{40820 \cdot 1}{0,08684} = 470059,88 \text{ В}.$$

Для проверки вычисляем ток х. х. при найденном U_1 :

$$\begin{aligned} I_0 &= \frac{U_1}{2\pi f L_1} = \\ &= \frac{470059,88}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,02132} = 70216,0407 \text{ А} \end{aligned}$$

и соответствующую ему плотность тока внутренней обмотки

$$\delta_0 = \frac{70216,132172 \cdot 130}{0,06 \cdot 0,87} = 174,8675 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Введя в программу ELCUT значения $\delta_1 = \delta_0$ и $\delta_2 = 0$, получаем картину магнитного поля трансформатора с $\mu_{\text{сталь}} = 5\mu_0$ и его кривую $\Phi(r)$ в режиме х. х., при котором поток внутри окружности радиуса r_0^a , лежащей в плоскости $z = 0$, должен быть равен $\Phi_{r_0^a}^{x.x} = 1$ Вб. Поэтому эта кривая одновременно представляет автоматически кривую $\Phi(r) / \Phi_{r_0^a}^{x.x}$.

3. При выбранном напряжении точке пересечения кривых $\Phi(r) / \Phi_{r_0^a}^{x.x}$ при любой нагрузке будут соответствовать координаты $(r_0^a, 1)$. В табл. 1 приведены выражения для токов при $L_{\text{load}} = 0,25L_{sh}^a$, $L_{\text{load}} = L_{sh}^a$, $L_{\text{load}} = 15L_{sh}^a$, $L_{\text{load}} = -15L_{sh}^a$, а в табл. 2 – расчетные значения плотностей токов в сечениях обмоток,

ТАБЛИЦА 1. Токи обмоток броневого трансформатора при реактивных нагрузках

Значения L_{load}	Выражение для тока I_1	Выражение для тока I_2
$0,25L_{sh}^a$	$\frac{U_1}{\omega \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2 + 0,25L_{sh}^a} \right)}$	$-I_1 \frac{M}{L_2 + 0,25L_{sh}^a}$
L_{sh}^a	$\frac{U_1}{\omega \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2 + L_{sh}^a} \right)}$	$-I_1 \frac{M}{L_2 + L_{sh}^a}$
$15L_{sh}^a$	$\frac{U_1}{\omega \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2 + 15L_{sh}^a} \right)}$	$-I_1 \frac{M}{L_2 + 15L_{sh}^a}$
$-15L_{sh}^a$	$\frac{U_1}{\omega \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2 - 15L_{sh}^a} \right)}$	$-I_1 \frac{M}{L_2 - 15L_{sh}^a}$

ТАБЛИЦА 2. Плотности токов обмоток броневого трансформатора при чисто реактивных нагрузках ($\mu_{сталь} = 5\mu_0$)

Значения L_{load}	Величина плотности токов, А/м ²	
	δ_1	δ_2
$0,25L_{sh}^a$	$5,265778 \cdot 10^8$	$-5,952476 \cdot 10^8$
L_{sh}^a	$4,133402 \cdot 10^8$	$-4,035995 \cdot 10^8$
$15L_{sh}^a$	$2,088874 \cdot 10^8$	$-5,757493 \cdot 10^7$
$-15L_{sh}^a$	$1,32233 \cdot 10^8$	$6,877322 \cdot 10^7$

заносимые в программу ELCUT для рассматриваемого трансформатора при $\mu_{сталь} = 5\mu_0$. Очевидно, каждой величине $\mu_{сталь}$ будет соответствовать свое значение U_1 .

Библиографический список

1. Boyajian A. Resolution of transformer reactances into primary and secondary reactances / A. Boyajian // AIEETrans. – 1925. – Jun. – P. 805–810.

2. Марквардт Е. Г. Электромагнитные расчеты трансформаторов / Е. Г. Марквардт. – М. : ОНТИ, Ред. энергетич. лит., 1938. – 136 с.

3. Пенчев П. Р. Върхуразсейването в трансформаторите / П. Р. Пенчев. – София : Техника, 1969. – 123 с.

4. Cherry E. C. The duality between interlinkend electric and magnetic circuits and the formulation of transformer equivalent circuits / E. C. Cherry // Proceedings of the Physical Society. – 1949. – Vol. 1, (B) 62. – P. 101–111.

5. Blume L. F. Transformer engineering : A treatise on the theory, operation and application of transformer / L. F. Blume, A. Boyajian, G. Gamilly, T. C. Lenox, S. Minnec, M. V. Montsinger. – New York : Wiley, 1951. – 239 p.
6. Slemon G. R. Equivalent circuits for transformers and machines including nonlinear effects / G. R. Slemon // Proc. Inst. Elect. Eng., IV. – 1953. – Vol. 100. – P. 129–143.
7. Лейтес Л. В. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов / Л. В. Лейтес, А. М. Пинцов. – М. : Энергия, 1974. – 192 с.
8. Leon F. Transformers in power system transients / F. Leon, P. Gomez, Martinez-Velasco, M. Rioual // Parameter Determination. – Boca Raton, FL : CRC, 2009. – Pt 4. – P. 177–250.
9. Leon F. Comparing the T and π equivalent circuits for the calculation of transformer inrush currents / F. Leon, A. Farazmand, P. Joseph // IEEE Trans. Power Delivery. – 2012. – Vol. 27, N 4. – P. 2390–2397.
10. Лурье А. И. Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротком замыкании / А. И. Лурье. – М. : Знак, 2005. – 520 с.
11. Малыгин В. М. Локализация потока энергии в трансформаторе / В. М. Малыгин // Электричество. – 2015. – № 4. – С. 60–65.
12. Шакиров М. А. Вектор Пойнтинга и новая теория трансформаторов. Ч. 1 : Трансформатор с тонкими обмотками / М. А. Шакиров // Электричество. – 2014. – № 9. – С. 52–59.
13. Шакиров М. А. Теория трансформаторов. Ч. 2 : Идеализированный трансформатор с обмотками конечной толщины / М. А. Шакиров // Науч.-технич. ведомости СПбГПУ. Наука и образование. – 2012. – № 4 (159). – С. 21–52.
14. Шакиров М. А. Вектор Пойнтинга и новая теория трансформаторов. Ч. 4 : Анатомия трансформатора / М. А. Шакиров // Электричество. – 2017. – № 3. – С. 37–49.
15. Шакиров М. А. Картины магнитных сверх- и анипотоков в короткозамкнутом двухобмоточном трансформаторе. Ч. 1 : Броневого трансформатор / М. А. Шакиров, Ю. В. Варламов // Электричество. – 2015. – № 8. – С. 9–18.
16. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике. Т. 6 : Электродинамика / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сендс. – М. : Мир, 1977. – 347 с.
17. Поливанов К. М. К 100-летию «Трактата об электричестве и магнетизме» Дж. К. Максвелла / К. М. Поливанов // Электричество. – 1974. – № 2. – С. 1–4.
18. Ким К. К. Метрология и техническое регулирование : учеб. пособие / К. К. Ким, В. Ю. Барбарович, Б. Я. Литвинов. – М. : Маршрут, 2006. – 255 с.
19. Ким К. К. Рыхление смерзшегося угля электрогидравлическим методом / К. К. Ким, М. А. Шпилев // Мир транспорта. – 2013. – № 2. – С. 48–56.
20. Антонов Ю. А. Модель взаимодействия токоприемника с контактным проводом / Ю. А. Антонов, К. К. Ким // Наука и техника транспорта. – 2008. – № 4. – С. 9–12.

References

1. Boyajian A. Resolution of transformer reactances into primary and secondary reactances. *AIEE Trans.*, 1925, Jun, pp. 805–810.
2. Markvardt E. G. *Elektromagnitnye raschety transformatorov* [Electromagnetic transformer engineering]. Moscow, ONTI Publ., Red. Energetich. Lit. Publ., 1938, 136 p. (In Russian)

3. Penchev P.R. *Vorkhu razseivaneto v transformatorite* [On scattering in transformers]. Sofia, Tekhnika Publ., 1969, 123 p. (In Bulgarian)
4. Cherry E. C. The duality between interlinkend electric and magnetic circuits and the formulation of transformer equivalent circuits. *Proceedings of the Physical Society*, 1949, vol. 1, (B) 62, pp. 101–111.
5. Blume L. F., Boyajian A., Gamilly G., Lennox T. C., Minnec S. & Montsinger M. V. *Transformer engineering: A treatise on the theory, operation and application of transformer*. New York, Wiley Publ., 1951, 239 p.
6. Slemon G. R. Equivalent circuits for transformers and machines including nonlinear effects. *Proc. Inst. Elect. Eng.*, IV, 1953, vol. 100, pp. 129–143.
7. Leites L. V. & Pintsov A. M. *Skhemy zameshcheniia mnogoobmotochnykh transformatorov* [Equivalent circuits for multi-circuit transformers]. Moscow, Energiia Publ., 1974, 192 p. (In Russian)
8. Leon F., Gomez P., Martinez-Velasco J. A. & Rioual M. Transformers in power system transients. *Parameter Determination*. Boca Raton, FL, CRC Publ., 2009, pt 4, pp. 177–250.
9. Leon F., Farazmand A. & Joseph P. Comparing the T and π equivalent circuits for the calculation of transformer inrush currents. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, vol. 27, no. 4, pp. 2390–2397.
10. Lur'e A. I. *Elektrodynamicheskaia stoikost transformatorov i reaktorov pri korotkom замыкании* [Electrodynamic withstand of transformers and reactors in case of short circuit]. Moscow, Znak Publ., 2005, 520 p. (In Russian)
11. Malygin V. M. Lokalizatsiia potoka energii v transformatore [Localisation of energy flow inside transformer]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2015, no. 4, pp. 60–65. (In Russian)
12. Shakirov M. A. Vektor Pointinga i novaiia teoriia transformatorov [Poynting vector and a new transformer theory]. Pt 1. Transformator s tonkimi obmotkami [Thin-winding transformer]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2014, no. 9, pp. 52–59. (In Russian)
13. Shakirov M. A. Teoriia transformatorov [Transformer theory]. Pt 2. Idealizirovannyi transformator s obmotkami konechnoi tolshchiny [Idealized transformer with finite-thickness winding]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovanie* [Science and eng. proc. of Saint Petersburg Polytechnic University. Science and education], 2012, no. 4 (159), pp. 21–52. (In Russian)
14. Shakirov M. A. Vektor Pointinga i novaiia teoriia transformatorov [Poynting vector and a new transformer theory]. Pt 4: Anatomii transformatora [Anatomy of a transformer]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2017, no. 3, pp. 37–49. (In Russian)
15. Shakirov M. A. & Varlamov Yu. V. Kartiny magnitnykh sverkh- i antipotokov v korotkozamknutom dvukhobmototchnom transformatore [Pictures of magnetic super- and anti-flows in short-circuited double-winding transformer]. Pt 1. Bronevoi transformator [Shell-type transformer]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2015, no. 8, pp. 9–18. (In Russian)
16. Feinman R., Leiton R. & Sends M. *Feinmanovskie lektsii po fizike* [The Feynman lectures on physics]. Vol. 6. *Elektrodinamika* [Electrodynamics]. Moscow, Mir Publ., 1977, 347 p. (In Russian)
17. Polivanov K. M. K 100-letiiu “Traktata ob elektrichestve i magnetizme” Dzh. K. Maksvella [On the centenary of J. C. Maxwell’s “A Treatise on Electricity and Magnetism”]. *Elektrichestvo* [Electricity], 1974, no. 2, pp. 1–4. (In Russian)
18. Kim K. K., Barbarovich V. Yu. & Litvinov B. Ya. Metrologiya i tekhnicheskoye regulirovaniye [Metrology and technical regulation]. Uchebnoye posobiye [Tutorial]. Moscow, Marshrut Publ., 2006, 255 p. (In Russian)

19. Kim K. K. & Shpilev M. A. Rykhlenie smerzshegosya uglya elektrogidravlivcheskim metodom [Frozen coal ripping by means of electro-hydraulic method]. *Mir transporta* [*The world of transport*], 2013, no. 2, pp. 48–56. (In Russian)
20. Antonov Yu. A. & Kim K. K. Model vzaimodeistviya tokopriyemnika s kontaktnym provodom [A current collecting device and contact wire interaction model]. *Nauka i tekhnika transporta* [*Science and technology of transport*], 2008, no. 4, pp. 9–12. (In Russian).

ШАКИРОВ Мансур Акмелович – доктор техн. наук, профессор, manshak@mail.ru (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого); *ТКАЧУК Антон Андреевич – канд. техн. наук, доцент, a.a.tkachuk@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 528.482

Г. Г. Шевченко, Д. А. Гура, Ю. В. Лобанова

ОБ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ МАРОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОИСКОВОГО СПОСОБА МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

Аннотация

Цель: Описать способ наблюдения за пространственным положением деформационных марок при проведении геодезического мониторинга с использованием электронного тахеометра, устанавливаемого в любых доступных для выполнения измерений местах без закрепления станций наблюдения, с последующей обработкой данных способами численных методов. **Методы:** При обработке измерений рассматривается возможность уравнивания координат способом сопряженных градиентов через надстройку «Поиск решения» программы Microsoft Excel. Отмечаются недостатки данной функции. Для автоматизации и облегчения процесса уравнивания результатов разработан алгоритм, который представляет собой специально написанный языком Visual Basic в виде макроса в программном комплексе Excel. Программа осуществляет поиск минимума целевой функции поисковым способом метода наименьших квадратов. **Результаты:** Выполнено сравнение двух способов. Разработанный алгоритм позволил ускорить процесс сходимости и определить минимум целевой функции. **Практическая значимость:** Приведен пример использования надстройки «Поиск решения» и разработанного алгоритма для уравнивания результатов измерений для определения пространственных координат деформационных марок и опорных пунктов многоэтажного жилого здания в Краснодаре. Результаты проведенного анализа подтвердили целесообразность применения поискового способа для установления пространственного положения деформационных марок при наблюдениях за стабильностью здания.

Ключевые слова: Мониторинг, осадка, смещения, метод наименьших квадратов, поисковый способ, пространственные координаты, целевая функция.

Grittel' G. Shevchenko, senior teacher, grettel@tandex.ru; **Dmitrii A. Gura**, Cand. Eng. Sci., senior lecturer, gda-kuban@mail.ru (Kuban State Technological University); **Yuliia V. Lobanova**, senior teacher, lobanova_@mail.ru (Emperor Alexander I Petersburg State Transport University) ON PROCESSING THE RESULTS OF DETERMINATION OF DEFORMATION CONTROL BENCHMARKS' SPATIAL POSITION BY LEAST SQUARE METHOD

Summary

Objective: Description of a method of observation of deformation control benchmarks' spatial position when conducting geodesic monitoring by a total station placed at any locations available for conducting measurements without securing observation stations, followed by data processing by numerical methods. **Methods:** During processing of measurements, an option for adjustment of co-ordinates by conjugate gradients method through the Solver add-in of the Microsoft Excel program is described. Shortcomings of this option are noted. For automation and easing of the process of data adjustment an algorithm was developed, which is a macros in the Excel program written in Visual Basic language. The program searches for minimum efficiency function by least square method. **Results:** Comparison of two methods was carried out. The newly developed algorithm allowed speeding up the process of convergence and determining the minimum efficiency function. **Practical importance:** Examples of the application of the Solver add-in and the developed algorithm are presented for adjustment of data to determine

spatial co-ordinates of deformation control benchmarks and control stations of a multi-story block of flats in Krasnodar. Results of analysis confirmed the expediency of application of the search method for determination of spatial position of deformation control benchmarks when controlling building stability.

Keywords: Monitoring, caulking, displacement, least squares method, search method, spatial co-ordinates, efficiency function.

Введение

Наблюдения за деформациями зданий и сооружений в большинстве случаев выполняются от цикла к циклу с закрепленных на местности пунктов геодезической сети [1]. Однако не всегда можно обеспечить их сохранность. Кроме того в условиях города высокая плотность застройки зачастую усложняет процесс организации работ [2]. Особенно это проявляется, когда необходимо определить плано-высотное положение деформационных марок на объекте, в связи с чем в данной статье рассматривается возможность выполнения угловых и линейных измерений на опорные пункты и деформационные марки электронным тахеометром, устанавливаемым в любых доступных для проведения измерений местах без закрепления станций наблюдения. Измерения с каждой точки установки тахеометра осуществляют на все видимые опорные пункты и деформационные марки, а результаты измерений планируется обрабатывать поисковым методом наименьших квадратов (МНК).

Порядок организации работ на объекте

Для проведения наблюдений за стабильностью объекта предлагается следующий порядок организации работы:

- установка деформационных марок;
- установка опорных пунктов;
- проведение измерений горизонтальных направлений, зенитных и наклонных расстояний на все деформационные марки и опорные пункты;
- обработка результатов измерений опорных пунктов поисковым способом МНК.

Сначала выполняется установка деформационных марок. Марки закрепляются на объекте согласно проекту, согласованному с проектной организацией. Марками в данном случае могут быть отражательные пленки, использование которых в настоящее время на различных работах существенно возросло [3–6].

Далее устанавливаются опорные пункты двух типов. Одни закрепляются в наиболее стабильных местах, желательно за пределами строительной площадки, другие – на незначительном удалении от объекта работ [7–9].

При определении положения прибора (станции) необходимо соблюдать такие условия:

- 1) с каждой станции должно быть видно как можно больше деформационных марок и опорных пунктов;
- 2) визирный луч должен составлять с плоскостью отражательной пленки угол не менее 45° [10–12];
- 3) с каждой последующей станции должны быть видны, как минимум, 3 точки, измеренные с предыдущей станции. Это условие является одним из основополагающих, для того чтобы между станциями была обеспечена «жесткая связь», что позволит уравнивать все измерения между собой и определить координаты искомых марок.

В силу того, что последнее условие должно быть выполнено, во время измерений могут быть установлены вспомогательные (связующие) точки, которые будут необходимы, если опорных и деформационных марок недостаточно для обеспечения «жесткой связи» [9].

Порядок обработки измерений

Предлагается следующая последовательность выполнения работ нулевого цикла.

Шаг 1. На каждой точке стояния, на все видимые марки и опорные пункты измеряются три величины: горизонтальное направление ($\beta_{изм}$), зенитное расстояние ($Z_{изм}$) и наклонное расстояние ($d_{изм}$) при двух положениях круга. Учитывая, что точность определения положения опорных пунктов должна быть в 2–3 раза выше, чем для деформационных марок, предлагается наблюдение опорных пунктов выполнять двумя приемами.

Шаг 2. Результаты измерений импортируются в электронные таблицы Excel.

Выбор данной программы обусловлен тем, что в ней имеется встроенная надстройка по решению задач оптимизации – «Поиск решения».

Измерения структурируются в табличную форму, где будет содержаться следующая информация:

- номер измерения;
- измеренное горизонтальное направление;

- измеренное зенитное расстояние;
- измеренное наклонное расстояние.

Чтобы структурирование данных проводилось автоматически и в соответствующих ячейках формировалась необходимая информация, для удобства в Microsoft Excel была создана функция «Spectra...». Она имеет несколько видов. Так, функция «Spectra№» позволяет выбрать из исходного массива данных значение, которое является номером точки, а функция «SpectraD» – значение наклонного расстояния. Полный перечень всех используемых видов функций «Spectra» показан в табл. 1.

Шаг 3. Обрабатываются измеренные углы и расстояния в двух полуприемах. Определяются их средние значения. Таким образом, они образуют так называемый блок «измеренных» величин.

Шаг 4. В отдельной таблице указываются произвольные величины координат X , Y , H деформационных марок, опорных пунктов, связующих точек и станций. Используя их,

ТАБЛИЦА 1. Алгоритм разработанных вариантов функции «Spectra» для структурирования данных с тахеометра в Microsoft Excel

Алгоритмы функции	Описание
Function Spectra№(Jach) y = Split(Jach, «,») Spectra№ = Val(y(1)) End Function	Позволяет выбрать данные о номерах точек визирования
Function SpectraГK(Jach) y = Split(Jach, «,») SpectraГK = Val(y(4)) End Function	Позволяет выбрать значения измеренных горизонтальных направлений
Function SpectraBK(Jach) y = Split(Jach, «,») SpectraBK = Val(y(5)) End Function	Позволяет выбрать значения измеренных зенитных расстояний
Function SpectraD(Jach) y = Split(Jach, «,») SpectraD = Val(y(3)) End Function	Позволяет выбрать значения измеренных наклонных расстояний
Function SpectraBP(Jach) y = Split(Jach, «,») SpectraBP = y(6) End Function	Позволяет выбрать данные о времени наблюдений

по формулам обратной геодезической задачи определяются величины горизонтальных направлений, зенитных расстояний и наклонных расстояний. Эти данные составляют блок «вычисленных» величин.

Шаг 5. Так как поисковые методы предполагают изменение введенных координат на некоторую величину, предлагается произвольно введенные координаты в автоматизированном режиме изменять на некоторый параметр дельта (Δ). Расчет будет вестись до тех пор, пока сумма квадратов отклонений «измеренных» значений от «вычисленных» не станет минимальной. Результат будет отображаться в целевой ячейке.

Разработка автоматизированной программы поиска минимума целевой функции поисковым способом

Минимум целевой функции можно отыскать с помощью известных градиентных методов [13–16]. Однако в задачах с достаточно большим числом переменных довольно трудно получить производные в виде аналитических функций, необходимых для градиентного алгоритма, в связи с чем не всегда удается достичь минимума целевой функции. Методы поиска не требуют регулярности и непрерывности целевой функции и существования производных.

Так как в предлагаемом способе определения деформаций добавляются в качестве неизвестных координаты опорных точек и станций, то целесообразно применить в этом случае прямой способ (поисковый) нахождения минимума суммы квадратов приближения на ЭВМ

$$[pv^2] = \min,$$

где p_i – вес измерения; v_i – поправки к измерениям.

При этом число поправок равно числу измерений. Для i -го измерения будем иметь

$$v_i = L_i - l_i,$$

здесь L_i – вычисленное по уравненным значениям неизвестных i -е измерение, l_i – измеренное значение [17].

Для решения такой задачи была использована надстройка «Поиск решения» меню «Данные» Microsoft Excel. Эта функция отыскивает минимум целевой функции методом сопряженных градиентов. Однако опыт использования такой функции позволил определить следующий недостаток: по неизвестным причинам, когда минимум суммы квадратов отклонений уже близок, программа иногда прекращает дальнейший поиск и выдает сообщение «Решение найдено...». С целью полноценного решения задачи была составлена отдельная программа поиска минимума с использованием поискового способа уравнивания.

Для выполнения программы следует присвоить имя целевой ячейке, в которой и будет отражаться значение минимума, выделить ячейки с координатами определяемых марок, указать число циклов приближений, величину Δ и запустить программу.

Программа работает по следующему алгоритму. Пусть для первоначальной величины переменной x_0 имеем с учетом весов p сумму квадратов отклонений

$$y_0 = [pv^2].$$

Далее по заранее введенной величине Δ программа находит y_1 и y_2 для двух переменных: $x_1 = x_0 - \Delta$ и $x_2 = x_0 + \Delta$.

В результате имеем три величины целевой ячейки y_0, y_1 и y_2 . По ним программа строит параболу, минимум которой находится в некоторой точке с абсциссой $(x_0 + z)$, где z – поправка в x_0 , вычисляемая программой по формуле

$$z = \Delta \frac{(y_1 - y_2)}{2(y_1 - 2y_0 + y_2)}. \quad (1)$$

Формула (1) рассмотрена в работе [18], однако минимум целевой функции может быть определен и введением поправок в значения x_1 и x_2 . Такие поправки вычисляются следующим образом:

$$z_1 = \Delta \frac{(3y_1 - 4y_0 + y_2)}{2(y_1 - 2y_0 + y_2)}, \quad (2)$$

$$z_2 = \Delta \frac{(-y_1 + 4y_0 - 3y_2)}{2(y_1 - 2y_0 + y_2)}, \quad (3)$$

где z_1 и z_2 – поправки в значения x_1 и x_2 соответственно.

Таким образом, контролем правильности выведенных формул (2), (3), а значит, определения минимума целевой функции является равенство абсцисс $(x_0 + z)$, $(x_1 + z_1)$ и $(x_2 + z_2)$ для точки минимума функции.

После введения поправки программа переходит к следующей переменной, выполняя с ней такие же операции. После перебора всех переменных программа переходит к следующему циклу приближений. Вычисления прекращают, когда число в целевой ячейке уже не уменьшается. При этом в программе введено условие, пропускающее вычисления по данным переменным, если знаменатель формулы равен нулю. Используемая программа поиска минимума написана на языке Visual Basic и представлена в Microsoft Excel в виде макроса. Блок-схему разработанного алгоритма иллюстрирует рис. 1.

Отметим, что *alfa1* – это имя целевой ячейки, его можно задавать любым; *delta* – это шаг поиска, его можно менять. На данную программу поиска минимума получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [19].

Разности измеренных и вычисленных значений перед нахождением суммы их квадратов умножают на $\sqrt{p}$. Вопрос назначения весов рассмотрен в статье [20].

Результаты работы программы поиска минимума целевой функции поисковым способом

Приведем пример поиска минимума целевой функции в нулевом цикле при наблюдениях за деформациями многоэтажного жилого здания в Краснодаре. Схема расположения дефор-

мационных марок (М1–М6), опорных пунктов (Рп1–Рп2) и вспомогательных (связующих) точек (Всп1–Всп2) на объекте показана на рис. 2. Измерения были выполнены с четырех станций (на рис. 2 не обозначены), между которыми была обеспечена связь по 2–3 точкам.

Так, в схеме содержится 14 точек, т.е. необходимо определить 42 неизвестных. В нулевом цикле было выполнено 16 наведений, т.е. 48 измерений. Имеют место избыточные измерения, что является важным условием для выполнения уравнивания поисковым способом. В табл. 2 в графах 2–4 приведены произвольно введенные координаты всех определяемых точек в нулевом цикле. После введения таких координат величина в целевой ячейке составила 405 474 243,1. После запуска надстройки «Поиск решения» координаты определяемых точек изменились (графы 5–7 табл. 2), в целевой ячейке величина составила 3197,4. Изменение параметров «Поиска решения» результата не дало, надстройка дальше не считала, выдавая сообщение о том, что «Решение найдено...». После была запущена составленная нами программа поиска минимума. Расчет велся в течение 10 мин, величина целевой ячейки, в которой отражается сумма квадратов отклонений «измеренных» величин от «вычисленных», составила 7,6. Итоговые уравненные координаты после использования программы представлены в графах 8–10 табл. 2.

Подтвердим правильность предложенного алгоритма и сравним координаты, вычисленные «Поиском решения» и разработанной программой поиска минимума целевой функции следующим образом. Примем, что отметки опорных пунктов, определенные при уравнивании системы «Поиском решения», истинные. По формулам тригонометрического нивелирования рассчитаем отметки станций, с которых проводились наблюдения на все пункты и марки. Затем от значений отметок станций тахеометра рассчитаем величины отметок деформационных марок и связующих точек.

Аналогичные вычисления выполняются для отметок, установленных разработанной

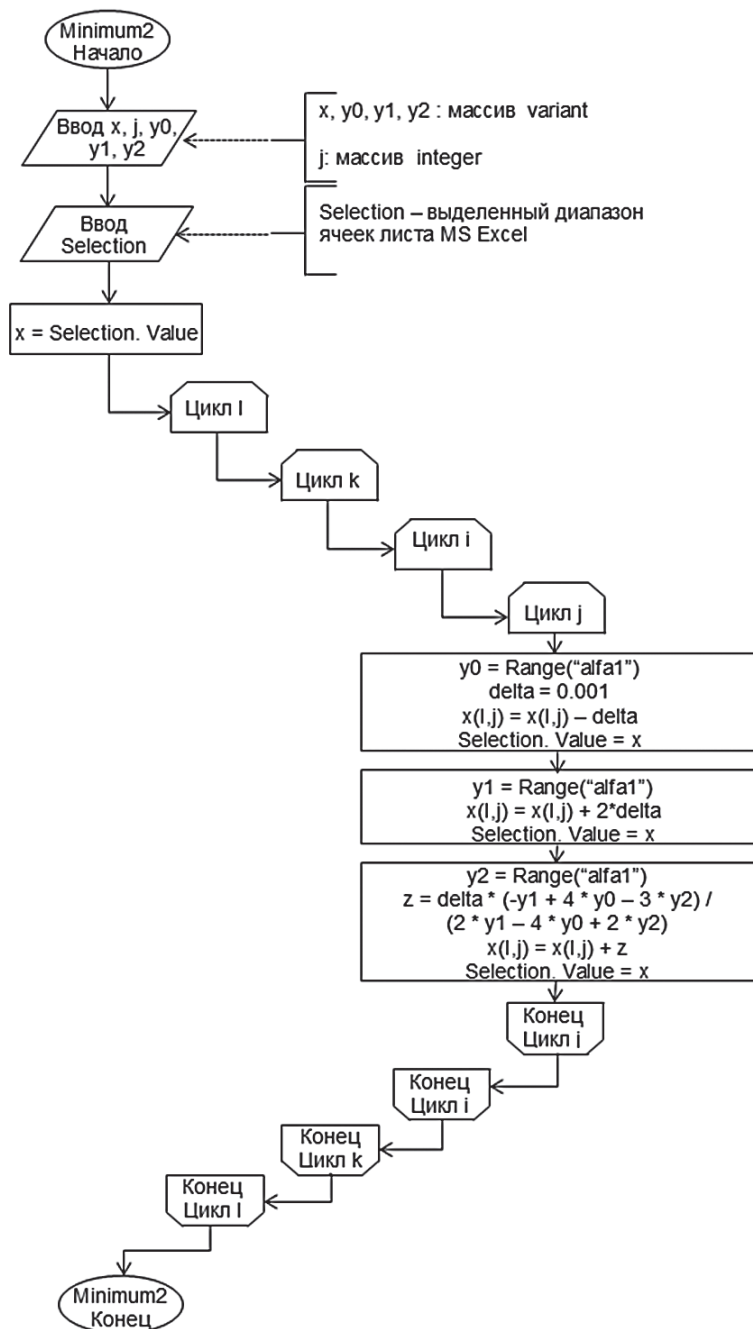


Рис. 1. Блок-схема программы поиска минимума

программой поиска минимума целевой функции.

Если программы уравнивали измерения верно, то значения отметок станций, деформационных марок и связующих точек из табл. 1 совпадут с вычисленными по известным формулам. Результаты приведены в табл. 3, из которой видно, что отметки, уравненные

«Поиском решения» (градиентным способом), отличаются от вычисленных по формулам тригонометрического нивелирования в пределах от 3 до 77 мм. Отметки, уравненные поисковым способом по разработанной программе, отличаются от вычисленных не более чем на 1–2 мм на некоторых точках. Данный сравнительный анализ показывает целесо-

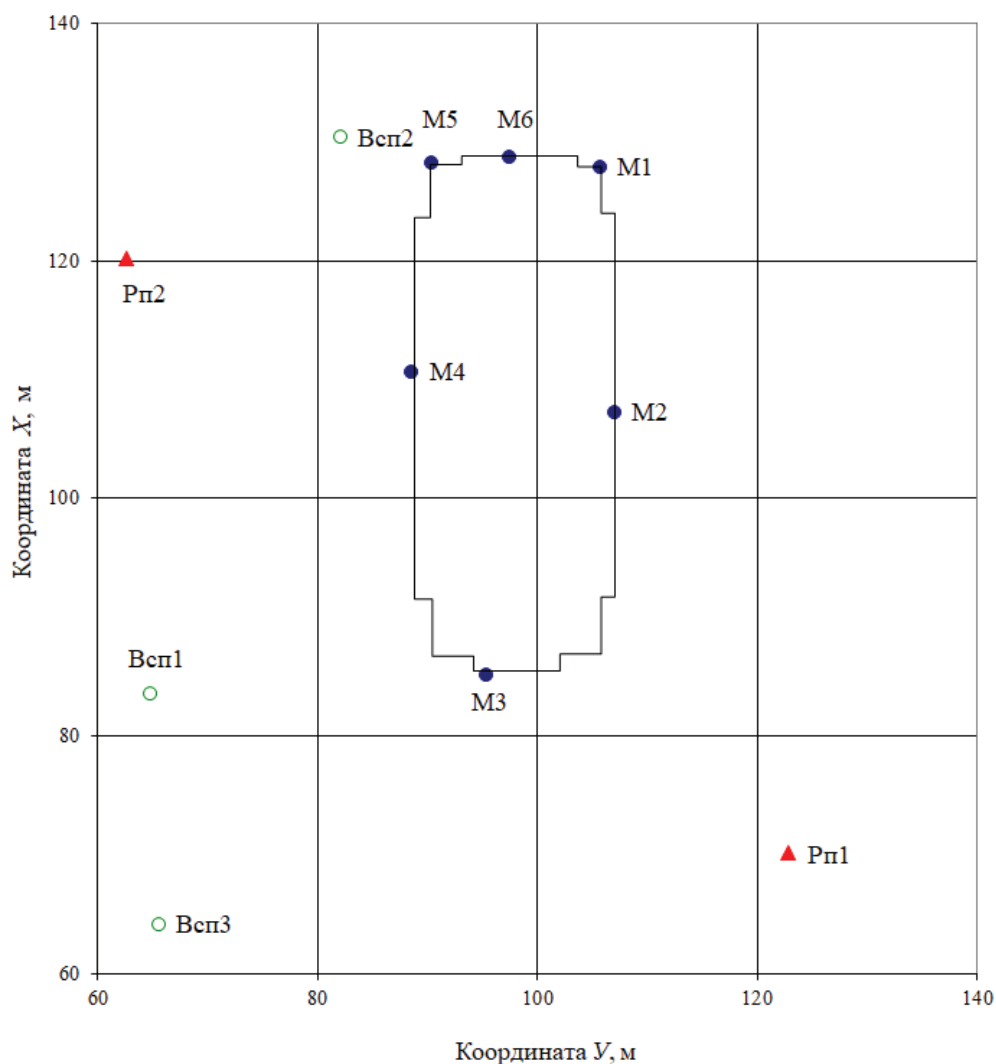


Рис. 2. Схема расположения точек на объекте в Краснодаре

ТАБЛИЦА 2. Координаты определяемых точек в нулевом цикле, рассчитанные надстройкой «Поиск решения» Excel и составленной программой поиска минимума целевой функции

Номер точки	Произвольно введенные координаты			Координаты, найденные надстройкой «Поиск решения» Excel			Координаты, найденные составленной программой поиска минимума		
	X, м	Y, м	H, м	X, м	Y, м	H, м	X, м	Y, м	H, м
M1	129,034	106,532	25,165	125,069	98,708	23,341	128,015	105,594	25,165
M2	108,287	107,894	25,210	104,790	101,365	23,370	107,314	106,950	25,208
M3	86,264	96,122	20,992	81,972	90,272	19,085	85,299	95,150	20,992
M4	111,694	89,405	20,932	106,476	81,808	19,121	110,682	88,445	20,932
M5	129,389	91,201	25,203	124,314	82,971	23,411	128,376	90,256	25,204
M6	129,821	98,280	25,202	125,323	90,423	23,381	128,806	97,343	25,202
Ст1	79,816	125,294	23,364	74,783	116,327	20,163	77,810	121,308	22,074

Окончание табл. 2

Номер точки	Произвольно введенные координаты			Координаты, найденные надстройкой «Поиск решения» Excel			Координаты, найденные составленной программой поиска минимума		
	X, м	Y, м	H, м	X, м	Y, м	H, м	X, м	Y, м	H, м
Ст2	143,171	119,094	25,255	130,400	101,930	22,145	133,150	109,159	23,965
Ст3	126,213	89,753	25,227	121,087	81,637	22,145	125,201	88,805	23,938
Ст4	81,645	115,888	23,039	77,619	109,832	19,831	80,651	114,908	21,749
Всп1	131,444	83,824	26,080	125,995	75,658	22,979	130,436	82,882	24,790
Всп2	85,581	66,478	30,968	80,009	59,610	27,721	83,659	64,537	29,681
Рп1	71,175	125,767	22,717	67,190	117,854	20,804	70,175	122,767	22,717
Рп2	121,150	68,599	21,885	115,233	56,279	20,143	120,15	62,599	21,885

ТАБЛИЦА 3. Сравнение отметок станций, деформационных марок и вспомогательных (связующих) точек, полученных «Поиском решения», разработанной программой и по формулам тригонометрического нивелирования

Обозначение	«Поиск решения»		Программа поиска минимума	
	Отметки, урвнен-ные, м (из табл. 1)	Отметки, вычисленные по формулам тригонометрического нивелирования, м	Отметки, урвненные, м (из табл. 1)	Отметки, вычисленные по формулам тригонометрического нивелирования, м
$H_{Ст1}$	20,163	20,160	22,074	22,073
$H_{М2}$	23,370	23,295	25,208	25,208
$H_{М3}$	19,085	19,077	20,992	20,991
$H_{Ст2}$	22,145	22,127	23,965	23,965
$H_{М1}$	23,341	23,327	25,165	25,165
$H_{М6}$	23,381	23,364	25,202	25,202
$H_{М5}$	23,411	23,365	25,204	25,203
$H_{Всп1}$	22,979	22,952	24,790	24,790
$H_{Ст3}$	22,145	22,196	23,938	23,938
$H_{М5}$	23,411	23,461	25,204	25,203
$H_{Всп1}$	22,979	23,049	24,790	24,791
$H_{М4}$	19,121	19,190	20,932	20,933
$H_{Всп2}$	27,721	27,939	29,681	29,681
$H_{Ст4}$	19,831	19,835	21,749	21,749
$H_{Всп2}$	27,721	27,763	29,681	29,679
$H_{М2}$	23,370	23,296	25,208	25,209
$H_{М3}$	19,085	19,079	20,992	20,993

ТАБЛИЦА 4. Рассчитанные координаты станций обратной угловой засечкой и сравнение с программой поиска минимума

Наименование станций	Координаты, рассчитанные разработанной программой поиска минимума (из табл. 1)		Координаты, вычисленные по формулам Гаусса	
	X, м	Y, м	X, м	Y, м
Ст1	77,810	121,308	77,810	121,308
Ст2	133,150	109,159	133,150	109,160
Ст3	125,201	88,805	125,201	88,804
Ст4	80,651	114,908	80,651	114,908

образность применения поискового способа для уравнивания измерений и определения отметок наблюдаемых точек.

Для расчета плоских прямоугольных координат точек стояния электронного тахеометра были использованы формулы обратной угловой засечки и формулы Гаусса.

Вначале за исходные значения были приняты координаты опорных пунктов и деформационных марок, полученные «Поиском решения», затем координаты, вычисленные по программе поиска минимума. По формулам Гаусса были рассчитаны координаты станций тахеометра, с которых проводились наблюдения на опорные пункты и марки.

Для контроля аналогичные измерения и вычисления выполнялись, опираясь на другую сторону. За окончательные значения координат определяемой точки принималось среднее. Рассчитанные координаты точек стояния электронного тахеометра по известным формулам и сравнение с вычисленными программой поиска минимума представлены в табл. 4. Как из нее видно, расхождение в прямоугольных координатах станций не превысило 1 мм.

Заключение

Наличие избыточных измерений – одно из необходимых условий для проведения съемки в настоящей работе.

Как было отмечено, перечисленная пошаговая последовательность измерений и об-

работки соответствует начальному циклу. Во-первых, для последующих циклов при проведении полевых измерений целесообразно стремиться к тому, чтобы места установки электронных тахеометров от цикла к циклу совпадали, чтобы не нарушать геометрию измерений по сравнению с первоначальными. Во-вторых, за произвольные координаты лучше принять их значения, полученные в начальном цикле. Это позволит ускорить процесс сходимости, т.е. сократить время поиска минимума суммы квадратов отклонений. В-третьих, необходимо выполнить контроль стабильности опорных пунктов, который осуществляется в каждом последующем цикле по отдельной программе. Порядок проведения такого контроля с использованием поисковых методов представляет предмет самостоятельных исследований.

Далее, сравнив координаты деформационных марок между циклами, можно судить об изменении пространственного положения деформационных марок.

Возможности уравнивания данных на ЭВМ поисковыми методами были рассмотрены В. И. Мицкевичем [21, 22], Д. Химмельблау [23], Г. В. Макаровым [24] и другими авторами [18, 25].

Таким образом, уравнивание пространственных координат поисковым способом МНК может составить альтернативу традиционным способам уравнивания, особенно при полевых измерениях с незакрепленных на местности станций наблюдения. Опыт ра-

бот показал значительное сокращение времени полевых работ. Время, затрачиваемое на обработку результатов измерений и поиск минимума целевой функции, безусловно, зависит от числа неизвестных, количества выполненных измерений и мощности компьютера, но среднее время работы программы составляет от 5 до 50 мин.

Таким образом, были решены следующие задачи:

1) рассмотрена возможность наблюдений за пространственным положением опорных пунктов и деформационных марок с использованием электронного тахеометра без закрепления станций наблюдения;

2) разработан алгоритм программы автоматизированного уравнивания результатов измерений поисковым способом МНК;

3) проведено уравнивание результатов измерений поисковым способом МНК;

4) выполнен сравнительный анализ уравнивания результатов измерений градиентным способом, представленным в программе Microsoft Excel, и поисковым способом МНК по разработанному алгоритму. Результаты анализа подтвердили целесообразность применения поискового способа для определения пространственного положения деформационных марок.

Библиографический список

1. СП 126.13330.2012. Свод правил. Геодезические работы в строительстве. – Актуализир. ред. СНиП 3.01.03–84. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». – URL : <http://www.consultant.ru> (дата обращения : 10.09.2018).
2. Mustafin M. G. Monitoring of deformation processes in buildings and structures in metropolises / M. G. Mustafin, V. A. Valkov, A. I. Kazantsev // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 2017, N 189. – P. 729–736.
3. Шоломицкий А. А. Высокоточные геодезические измерения при деформационном мониторинге аквапарка / А. А. Шоломицкий, Е. К. Лагутина, Е. Л. Соболева // *Вестн. СГУГиТ*. – 2017. – Т. 22, № 3. – С. 45–59.
4. Горяинов И. В. Экспериментальные исследования применения обратной линейно-угловой засечки для оценки стабильности пунктов плановой деформационной геодезической сети / И. В. Горяинов // *Вестн. СГУГиТ*. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 28–38.
5. Никонов А. В. Конструкция визирной цели для выполнения высокоточного тригонометрического нивелирования / А. В. Никонов // *Вестн. СГГА*. – 2014. – Вып. 2 (26). – С. 19–26.
6. Bryn M. J. Geodetic monitoring of deformation of building surrounding an underground construction / M. J. Bryn, D. A. Afonin, N. N. Bogomolova // *Proceedings of the Intern. scientific conference transportation geotechnics and geoecology, TGG–2017*. – Saint Petersburg. – 2017. – 17–19 May. – P. 386–392.
7. Симонян В. В. Геодезический мониторинг зданий и сооружений / В. В. Симонян, Н. А. Шмелин, А. К. Зайцев ; под ред. В. В. Симоняна. – М. : НИУ МГСУ, 2015. – 140 с.
8. Шульц Р. В. Статистическое исследование перемещений подпорных стенок по результатам геодезических измерений / Р. В. Шульц, А. А. Анненков, А. М. Хайлак, В. С. Стрилец // *Вестн. СГГА*. – 2014. – Вып. 3 (27). – С. 35–53.
9. Шевченко Г. Г. Определение координат точек электронным тахеометром для мониторинга сооружений / Г. Г. Шевченко, Д. А. Гура, Ч. Н. Желтко // *Вестн. Кыргыз.-Рос. славянск. ун-та*. – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 174–176.
10. Афонин Д. А. Построение геодезической разбивочной сети, закрепляемой плечными отражателями / Д. А. Афонин // *Зап. Горн. ин-та*. – 2012. – Т. 199. – С. 301–308.
11. ГОСТ 24846–2012. Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений. – М. : Стандартинформ, 2014. – 24 с.
12. Горяинов И. В. Влияние положения визирной цели – отражательной марки на точность измерений по схеме обратной линейно-угловой засечки / И. В. Горяинов, А. А. Кодиров, А. А. Шевчук, С. В. Аверьянов, Е. В. Дельфонцев // *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. – 2017. – № 3. – С. 29–35.
13. Дегтярев А. М. Использование методов оптимизации для решения инженерно-геодезических

задач / А. М. Дегтярев, В. В. Ялтыхов // Вестн. СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1 (29). – С. 24–33

14. Muoi P. Q. Descent gradient methods for non-smooth minimization problems in ill-posed problems / P. Q. Muoi, D. N. Hào, P. Maass, M. Piddcock // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. – 2016. – 15 May. – Vol. 298. – P. 105–122.

15. Wilke D. N. The application of gradient-only optimization methods for problems discretized using non-constant methods / D. N. Wilke, S. I. Kok, A. A. Groenwold // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. – 2010. – Vol. 40, N 1–6. – P. 433–451.

16. Nesterov Yu. Gradient methods for minimizing composite functions / Yu. Nesterov // *Mathematical Programming*. – 2013. – Vol. 140, issue 1. – P. 125–161.

17. Шевченко Г. Г. Метод определения смещений и осадок сооружений с учетом особенностей работ на строительной площадке / Г. Г. Шевченко, Ч. Н. Желтко, Д. А. Гура, М. А. Пастухов // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2012. – № 11. – С. 23–24.

18. Лабутин В. О. Разработка способа оценки точности неизвестных в методе наименьших квадратов : автореф. дис. ... канд. техн. наук, специальность : 25.00.32 / В. О. Лабутин. – Ростов н/Д. : РГСУ, 2006. – 23 с.

19. Шевченко Г. Г. Универсальная программа определения трехмерных координат точек через обработку измерений горизонтальных, вертикальных углов и расстояний поисковым способом: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / Г. Г. Шевченко, Ч. Н. Желтко, Д. А. Гура, М. А. Пастухов ; правообладатель Кубан. гос. технол. ун-т. – Рег. № 2015617205 от 03.07.2015 г. – М. : Роспатент, 2015.

20. Желтко Ч. Н. Алгоритм определения координат при мониторинге сооружений с использованием поискового метода уравнивания / Ч. Н. Желтко, Г. Г. Шевченко, Д. А. Гура, А. А. Кузнецова // *Наука. Техника. Технологии (политехн. вестн.)*. – 2013. – № 3. – С. 60–64.

21. Мицкевич В. И. Математическая обработка геодезических построений методами нелинейного программирования : автореф. дис. ... д-ра техн. наук, специальность : 25.00.32 / В. И. Мицкевич. – СПб. : СПбГУ, 2004. – 29 с.

22. Мицкевич В. И. Об оценке точности при определении положения пункта из решения системы нелинейных уравнений / В. И. Мицкевич // *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. – 1980. – № 5. – С. 21.

23. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау ; пер. с англ. ; под ред. М. Л. Быховского. – М. : Мир, 1975. – 536 с.

24. Макаров Г. В. Оценка точности при поисковых методах уравнивания / Г. В. Макаров, В. В. Афанасьев, Б. В. Афанасьев // *Геодезия и картография*. – 1981. – № 11. – С. 20–22.

25. Желтко А. Ч. Разработка и исследование методов определений осадок, смещений и деформаций элементов автомобильных мостов : автореф. дис. ... канд. техн. наук ; специальность : 25.00.32 / А. Ч. Желтко. – СПб. : СПбГУ, 2017. – 20 с.

References

1. *Construction rules 126.13330.2012. Geodezicheskie raboty v stroitelstve* [Survey operations in construction]. *Code of practice*. Revised edition of code of practice SNIIP 3.01.03–84. Accessed via legal reference system Konsultant Plus. URL: <http://www.consultant.ru> (accessed: 10.09.2018). (In Russian)

2. Mustafin M. G., Valkov V. A. & Kazantsev A. I. Monitoring of deformation processes in buildings and structures in metropolises. *Procedia Engineering*, 2017, no. 189, pp. 729–736.

3. Sholomitskii A. A., Lagutina E. K. & Soboleva E. L. Vysokotochnye geodezicheskie izmereniia pri deformatsionnom monitoringe akvaparka [High-precision geodetic measurements in deformation monitoring of water park]. *Vestnik SGUGiT* [Proc. of Siberian State University of Geosystems and Technologies], 2017, vol. 22, no. 3, pp. 45–59. (In Russian)

4. Goriainov I. V. Eksperimentalnye issledovaniia primeneniia obratnoi lineino-uglovoi zasechki dlia otsenki stabilnosti punktov planovoi deformatsionnoi geodezicheskoi seti [Experimental studies of application of reverse linear and angular cross-bearing for evaluation of stability of control benchmarks of systematic deformation geodetic network]. *Vestnik SGU-*

GiT [Proc. of Siberian State University of Geosystems and Technologies], 2018, vol. 23, no. 1, pp. 28–38. (In Russian)

5. Nikonov A. V. Konstruktsiia vizirnoi tseli dlia vypolneniia vysokotochnogo trigonometricheskogo nivelirovaniia [Construction of a surveying target for high-precision trigonometrical levelling]. *Vestnik SGGA* [Proc. of Siberian State University of Geosystems and Technologies], 2014, issue 2 (26), pp. 19–26. (In Russian)

6. Bryn M. J., Afonin D. A. & Bogomolova N. N. Geodetic monitoring of deformation of building surrounding an underground construction. *Proceedings of the Intern. scientific conference transportation geotechnics and geocology, TGG–2017*. Saint Petersburg, 2017, 17–19 May, pp. 386–392.

7. Simonian V. V., Shmelin N. A. & Zaitsev A. K. *Geodezicheskii monitoring zdanii i sooruzhenii* [Geodetic monitoring of buildings and structures]. Ed. by V. V. Simonian. Moscow, NIU MGSU Publ., 2015, 140 p. (In Russian)

8. Shul'ts R. V., Annenkov A. A., Khailak A. M. & Strilets V. S. Statisticheskoe issledovanie peremeshchenii podpornykh stenok po rezultatsam geodezicheskikh izmerenii [Statistical study of displacement of bulkheads from results of geodetic measurements]. *Vestnik SGGA* [Proc. of Siberian State University of Geosystems and Technologies], 2014, issue 3 (27), pp. 35–53. (In Russian)

9. Shevchenko G. G., Gura D. A. & Zheltko Ch. N. Opredelenie koordinat tochek elektronnykh takheometrom dlia monitoringa sooruzheniia [Point determination by total station for structure monitoring]. *Vestnik Kyrgyz.-Ros. Slav. Un-ta* [Kyrgyz Russian Slavic University Proc.], 2017, vol. 17, no. 1, pp. 174–176. (In Russian)

10. Afonin D. A. Postroenie geodezicheskoi razbivochnoi seti, zakrepliaemoi plenochnymi otrazhateliami [Development of geodetic mark out network consolidated by film reflectors]. *Zap. Gor. In-ta* [Mining Inst. Journal], 2012, vol. 199, pp. 301–308. (In Russian)

11. State standard GOST 24846–2012. *Grunty. Metody izmereniia deformatsii osnovanii zdanii i sooruzhenii* [Sub-soils. Methods for measuring deformations of building and structure foundations]. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 24 p. (In Russian)

12. Goriainov I. V., Kodirov A. A., Shevchuk A. A., Aver'ianov S. V. & Del'fontsev E. V. Vliianie polozheniia vizirnoi tseli – otrazhatelnoi marki na tochnost izmerenii po skheme obratnoi lineino-uglovoi zasechki [Influence of the position of reflective-benchmark surveying target on accuracy of measurements made by reverse linear and angular cross-bearing scheme]. *Izvestiya vuzov. Geodeziia i aerofotos'emka* [Univ. Proc. Surveying and aerial photographic survey], 2017, no. 3, pp. 29–35. (In Russian)

13. Degtiarev A. M. & Ialtykhov V. V. Ispolzovanie metodov optimizatsii dlia resheniia inzhenerno-geodezicheskikh zadach [Application of optimization methods to solve engineering and surveying problems]. *Vestnik SGUGiT* [Proc. of Siberian State University of Geosystems and Technologies], 2015, issue 1 (29), pp. 24–33. (In Russian)

14. Muoi P. Q., Hao D. N., Maass P. & Pidcock M. Descent gradient methods for nonsmooth minimization problems in ill-posed problems. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2016, 15 May, vol. 298, pp. 105–122.

15. Wilke D. N., Kok S. I. & Groenwold A. A. The application of gradient-only optimization methods for problems discretized using non-constant methods. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2010, vol. 40, no. 1–6, pp. 433–451.

16. Nesterov Yu. Gradient methods for minimizing composite functions. *Mathematical Programming*, 2013, vol. 140, issue 1, pp. 125–161.

17. Shevchenko G. G., Zheltko Ch. N., Gura D. A. & Pastukhov M. A. Metod opredeleniia smeshchenii i osadok sooruzhenii s uchetom osobennosti rabot na stroitelnoi ploshchadke [Method for identifying dislocation and subsidence accounting for specific features of works at the construction site]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo* [Industrial and civil construction], 2012, no. 11, pp. 23–24. (In Russian)

18. Labutin V. O. *Razrabotka sposoba otsenki tochnosti neizvestnykh v metode naimenshikh kvadratov* [Development of a method for evaluation of accuracy of estimation of unknown variables in the least squares method]. Extended abstract of Cand. Eng. Sci. dissertation: 25.00.32. Rostov-on-Don, RGSU Publ., 2006, 23 p. (In Russian)

19. Shevchenko G. G., Zheltko Ch. N., Gura D. A. & Pastukhov M. A. *Universalnaia programma opredele-*

niia trekhmernykh koordinat tochek cherez obrabotku izmerenii gorizontalnykh, vertikalnykh uglov i rasstoianii poiskovym sposobom [Universal program for determination of three-dimensional co-ordinates of point via processing measurements of horizontal and vertical corners and distances by search method]. Certificate of state registration of computer program: registration no. 2015617205 dated 03.07.2015. Moscow, Rospatent Publ., 2015. (In Russian)

20. Zheltko Ch. N., Shevchenko G. G., Gura D. A. & Kuznetsova A. A. Algoritm opredeleniia koordinat pri monitoringe sooruzhenii s ispolzovaniem poiskovogo metoda uravnivaniia [Algorithm for determining co-ordinates in monitoring structures deploying searching method of compensation]. *Nauka. Tekhnika. Tekhnologii (politekhn. vestnik)* [Science. Engineering. Technologies (polytechn. herald)], 2013, no. 3, pp. 60–64. (In Russian)

21. Mitskevich V. I. *Matematicheskaia obrabotka geogezicheskikh postroenii metodami nelineinogo programmirovaniia* [Mathematical treatment of geodetic formulations by non-linear programming methods. Extended abstract of D. Eng. Sci. dissertation: 25.00.32. Saint Petersburg, SPGU Publ., 2004, 29 p. (In Russian)

22. Mitskevich V. I. Ob otsenke tochnosti pri opredelenii polozheniia punkta iz resheniia sistemy nelineinykh uravnenii [On accuracy evaluation of determination of point location from the solution to a system of non-linear equations]. *Izvestiya vuzov. Geodeziia i aerofotos'emka* [Univ. Proc. Surveying and aerial photographic survey], 1980, no. 5, p. 21 (In Russian)

23. Khimmel'bau D. *Prikladnoe nelineinoe programmirovaniie* [Applied Nonlinear Programming]. Per. s angl. M. M. Bykhovskii. Moscow, Mir Publ., 1975, 536 p. (In Russian)

24. Makarov G. V., Afanas'ev V. V. & Afanas'ev B. V. Otsenka tochnosti pri poiskovykh metodakh vyravnivaniia [Evaluation of accuracy in searching methods of compensation]. *Geodeziia i kartografiia* [Geodetic surveying and cartography], 1981, no. 11, pp. 20–22. (In Russian)

25. Zheltko A. Ch. *Razrabotka i issledovanie metodov opredelenii osadok, smeshchenii i deformatsii elementov avtomobilnykh mostov* [Development and study of methods for determination of subsidence, dislocations and deformation of elements of motor bridges]. Extended abstract of Cand. Eng. Sci. dissertation: 25.00.32. Saint Petersburg, SPGU Publ., 2017, 20 p. (In Russian).

ШЕВЧЕНКО Гриттель Геннадьевна – старший преподаватель, grettel@tandex.ru; ГУРА Дмитрий Андреевич – канд. техн. наук, доцент, gda-kuban@mail.ru (Кубанский государственный технологический университет); *ЛОБАНОВА Юлия Васильевна – старший преподаватель, lobanowa@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 624.044.3

В. Э. Юрченко

РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ БАЛОЧНОГО ТИПА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ УПРУГОСТИ

Дата поступления: 06.07.2018

Решение о публикации: 17.10.2018

Аннотация

Цель: Демонстрация модификации общепринятой применительно к конструкциям балочного типа постановки метода конечных элементов, выражающейся во включении в расчет переменных параметров упругости бетона и приведения жесткостных характеристик железобетона. **Методы:** Используется математическое моделирование железобетонной конструкции, а именно метод конечных элементов с необходимыми дополнениями в общепринятый алгоритм расчета. **Результаты:** Предлагаемый способ итерации параметров упругости бетона в процессе нагружения материала позволяет более точно оценить напряженно-деформированное состояние в конечном элементе в условиях воздействия сложных нагрузок. Иллюстрируются разбиение железобетонной конструкции на слои и последовательное приведение упругих характеристик материала, исходя из объемного соотношения арматуры и бетона. Преимуществом рассматриваемого подхода является легкость интеграции с общепринятым (линейным) методом конечных элементов. Все преобразования в данном случае заключаются в модификации выражений для расчета упругих характеристик конструкции и матриц жесткости элементов, тогда как последовательность дальнейших вычислений не изменяется. Продемонстрирован положительный результат применения метода при моделировании железобетонной балки, в состав которой входит высокопрочный многокомпонентный бетон, имеющий призменную прочность при одноосном сжатии более 114 МПа. **Практическая значимость:** Использование предлагаемого алгоритма, в том числе в качестве подключаемого программного модуля (блока программы), расширяет возможности имеющихся вычислительных комплексов.

Ключевые слова: Механика деформируемого твердого тела, сложное напряженное состояние, метод конечных элементов, бетон, железобетон, переменные параметры упругости, приведенные параметры упругости, вид напряженного состояния.

Vitalii E. Yurchenko, postgraduate student, vitalyyurchenko@mail.ru (Russian University of Transport (MIIT)) CALCULATION OF BEAM-TYPE REINFORCED CONCRETE STRUCTURES BY FINITE-ELEMENTS METHOD USING VARIABLE ELASTICITY PARAMETERS

Summary

Objective: Demonstration of a modification of a finite-elements method setting, generally accepted for beam-type structures, which constitutes including variable parameters of concrete elasticity parameters and involving reinforced concrete stiffness properties into calculation. **Methods:** Mathematical simulation of reinforced concrete structure is used, namely the aforementioned finite-elements methods with necessary additions to the generally accepted calculation algorithm. **Results:** The proposed method of iteration of concrete stiffness parameters in the process of loading of material allows more precise evaluation of stress-strain behaviour in the finite element under conditions of influence of multi-axial loads. Illustrations are provided for breaking the reinforced concrete structure into layers and sequential citing of material's elastic characteristics stemming from volume rate of iron reinforcement and concrete. The advantage of the method under consideration is the ease of integration with generally accepted (linear)

finite-elements method. All the alternations in this case are modification of expressions for calculation of elastic characteristics of the structure and element stiffness matrixes whereas the order of consequent calculations is not changed. Positive result of application of the method to simulation of a reinforced concrete beam, which consists of high-strength, multi-component concrete possessing prism strength under conditions of uniaxial compression of over 114 mPa, is demonstrated. **Practical importance:** Application of the proposed algorithm, including as a software plug-in (program unit), expands the possibilities of the existing computing systems.

Keywords: Deformable solid mechanics, multiaxial stress, finite elements method, concrete, reinforced concrete, variable elasticity parameters, reduced elasticity parameters, stress pattern.

1. Введение

Известно, что бетон и железобетон отличается физическая нелинейность, выражающаяся в различном характере деформаций при сжатии и растяжении: как предельными значениями прочностей при воздействии сжимающих и растягивающих нагрузок, так и промежуточными, — отчетливо проявляется нелинейность траектории достижения экстремальных величин, особенно в случае высоких сжимающих нагрузок. Причиной этого служит неоднородность структуры бетона: наличие пустот, трещин, различных включений обуславливает сложный характер внутреннего напряженного состояния в материале.

В настоящее время при проектировании бетонных составов часто используются разнообразные мелкодисперсные добавки с целью улучшить эксплуатационные характеристики композита, в том числе применительно к конкретным условиям работы возводимых конструкций. Повышая устойчивость составов к высоким температурам, воздействию агрессивных сред, их морозостойкость и т. д., указанные добавки имеют тем не менее весьма ограниченное воздействие на характер достижения пределов прочного сопротивления материала.

Попытки вывести аналитические зависимости для оценки напряженного состояния рассматриваемых композитов, в том числе при сложных нагружениях, принимались неоднократно [1–8]. В большинстве случаев предлагаемые выражения и алгоритмы достаточно сложны и громоздки, а также применимы лишь для бетонов определенных типов и марок.

Таким образом, получение универсальных решений (в том числе для современных высокопрочных и/или многокомпонентных составов), которые легко могут быть встроены в существующие расчетные комплексы, является актуальной и практически значимой задачей.

2. Переменные параметры упругости и секущие модули бетона в случае плоского напряженного состояния

Использование линейных зависимостей для выражения связи между напряжениями и деформациями вносит наибольший вклад в погрешность оценки деформированного состояния конструкций, изготовленных из анизотропных материалов. Чем точнее определяющие соотношения отражают физический закон, по которому материал сопротивляется различным видам деформаций, тем меньшая ошибка будет допущена при оценке его напряженно-деформированного состояния.

Значения переменных параметров упругости — модуля упругости первого рода (E^*) и коэффициента Пуассона (μ^*) — изменяются в зависимости от уровня прилагаемой нагрузки и вида напряженного состояния, поэтому при расчете конструкций в полной мере можно учесть протекающие в структуре бетона изменения.

В работах [9–11] показано, что характер напряженно-деформированного состояния плоских конструкций, широко применяемых в строительстве, позволяет получить для них относительно простые основные физические

соотношения, в которые входят параметры, учитывающие нелинейность свойств бетона в зависимости от схемы и величины прикладываемой нагрузки:

$$\begin{aligned}\varepsilon_0 &= \eta \psi \frac{\sigma_0}{3K_0}, \\ \gamma_0 &= \psi \frac{\tau_0}{G_0},\end{aligned}\quad (1)$$

где ε_0 , σ_0 – октаэдрические нормальные деформации и напряжения; γ_0 , τ_0 – сдвиг и касательные напряжения на октаэдрических площадках; G_0 , K_0 – начальные модули упругости второго и третьего рода соответственно; η , ψ – функции, математически описывающие нелинейную работу бетона и развитие пластических деформаций в материале.

Главным критерием, на значении которого строятся расчеты в выражениях (1), служит параметр, позволяющий однозначно определить вид напряженного состояния в конечном элементе:

$$\xi = \sigma_0 / \varepsilon_0. \quad (2)$$

Выражение (2) для каждого вида напряженного состояния сохраняет постоянное значение, а именно: при двухосном равномерном сжатии $\xi = -\sqrt{2}$, при одноосном сжатии $\xi = -\sqrt{2}/2$ и т.д. [12].

Уравнения для функций ψ и η выбирают на основе следующих гипотез и предположений [9]:

- относительное изменение объема ε_0 – непрерывная нелинейная функция среднего напряжения σ_0 и вида напряженного состояния ξ ;
- сдвиг на октаэдрических площадках γ_0 является непрерывной нелинейной функцией октаэдрического касательного напряжения τ_0 и вида напряженного состояния ξ ;
- физические соотношения в начальной точке деформирования должны соответствовать формулам теории линейной упругости;
- обеспечивается возможность непосредственного перехода в предельном состоянии

от кривых деформирования к условию прочности бетона.

Опуская промежуточные преобразования (их можно найти, например, в работах [9, 10]), приведем окончательные выражения для расчета функций ψ и η :

$$\psi = \left[1 + (\bar{\eta}^2 - 1) (\tau_0 (\bar{\tau}_0))^2 \right]^{-0,5}, \quad (3)$$

$$\eta = 1 - (1 - \bar{\eta}) (\sigma_0 (\bar{\sigma}_0))^{-1}{}^k, \quad (4)$$

в которых $\bar{\eta}$, $\bar{\sigma}_0$, $\bar{\tau}_0$ – предельные значения соответствующих величин, определяемые видом напряженного состояния и физико-механическими характеристиками бетона. Их расчет для подстановки в выражения (3), (4) производится в соответствии с рекомендациями, приведенными в работах [9, 13].

Аналитические выражения для расчета E^* и μ^* имеют вид [12]

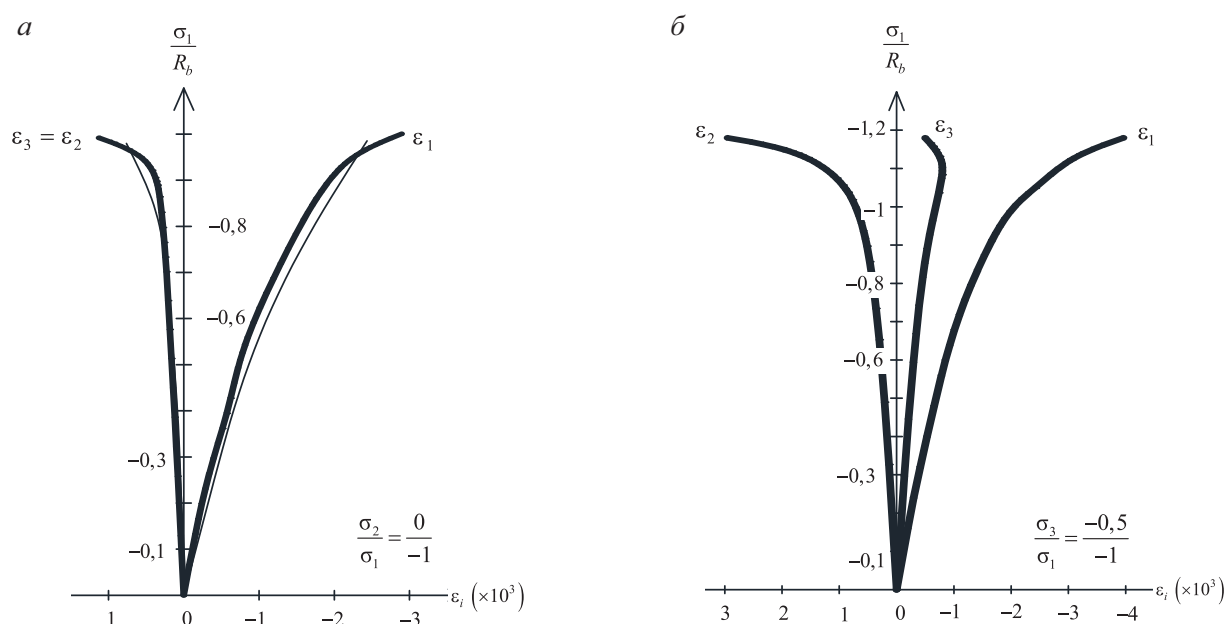
$$E^* = \frac{3E_0}{\psi (\eta (1 - 2\mu_0) + 2(1 + \mu_0))}, \quad (5)$$

$$\mu^* = \left(1 - \frac{(1 - 2\mu_0)\eta}{1 + \mu_0} \right) \left(2 + \frac{(1 - 2\mu_0)\eta}{1 + \mu_0} \right)^{-1}, \quad (6)$$

здесь E_0 – начальный модуль упругости первого рода, μ_0 – начальный коэффициент Пуассона для бетона.

Исходные данные, необходимые для расчета вышеприведенных функций и параметров (выражения (1)–(6)), могут быть получены с использованием общепринятых формул механики деформируемого твердого тела, опираясь на экспериментальные данные испытаний исследуемого бетона при одноосном сжатии.

На рис. 1 представлены результаты моделирования работы состава высокопрочного бетона [14] при одноосном (а) и неравномерном двухосном (б) сжатии с учетом переменных параметров упругости при расчете деформаций композита в сравнении с экспериментальными данными.

Рис. 1. Зависимости σ – ε для высокопрочного бетона тяжелого класса:

— — теоретические зависимости; — — экспериментальные кривые

К ключевым достоинствам рассматриваемого метода относится возможность детального моделирования поведения композита при плоском нагружении без необходимости проведения сложных и дорогостоящих испытаний.

Далее будет проиллюстрирован механизм включения переменных параметров упругости в формируемые при разбиении балочных конструкций на треугольные конечные элементы матрицы жесткости и упругости.

3. Определение начальных параметров жесткости железобетона

Для получения релевантных результатов при расчете железобетона необходимо при формировании матриц жесткости и упругости конструкции учесть наличие и количество арматурных стержней. При получении начальных параметров жесткости железобетона применяется принцип сложения слоев, жесткостные характеристики которых либо заранее известны (слои бетона), либо рассчитываются в процессе выполнения кода на основании исходных данных о геометрии

и физико-механических параметров арматуры (слои, содержащие арматурные стержни).

Принимая во внимание предпосылки, изложенные в [15], упругие характеристики определены с учетом нелинейности материала на базе деформационной теории пластичности.

Применительно к плоской конструкции расчеты могут быть проведены следующим образом:

$$E_{ii} = \frac{\sum_{k=1}^k (E_{ii}^k s_k)}{S}, \quad G_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^k (G_{ij}^k s_k)}{S}, \quad (7)$$

$$\mu_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^k (\mu_{ij}^k s_k)}{S}, \quad i, j = 1, 2, 3,$$

здесь E_{ii} , G_{ij} , μ_{ii} — соответственно модули упругости первого и второго рода, а также коэффициент Пуассона для конструкции в целом; E_{ii}^k , G_{ij}^k , μ_{ij}^k — вышеуказанные показатели для k -го слоя; S , s_k — толщина конструкции и k -го слоя соответственно; k — количество слоев разбиения.

Упругие параметры армированных слоев в соответствующих направлениях рассчиты-

ваются в соответствии с выражением (7), исходя из объемного содержания арматуры:

$$\begin{aligned} E_{ii}^k &= \frac{(E_{arm} V_{ii}^{arm}) + (E_{con} V_{con})}{V_{ii}^{arm} + V_{con}}, \\ G_{ij}^k &= \frac{(G_{arm} V_{ij}^{arm}) + (G_{con} V_{con})}{V_{ij}^{arm} + V_{con}}, \\ \mu_{ij}^k &= \frac{(\mu_{arm} V_{ij}^{arm}) + (\mu_{con} V_{con})}{V_{ii}^{arm} + V_{con}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где V_i^{arm} , V_{con} – объем арматуры i -го направления и объем бетона в слое соответственно ($i, j = 1, 2, 3$).

Для того чтобы соотношения (8) были релевантны, характерные размеры элементов должны подбираться таким образом, чтобы обеспечивать равномерное распределение внутренних усилий и деформаций в конечном элементе, исключая влияние крупного заполнителя и зон контакта бетона с арматурой [10].

4. Учет переменных параметров упругости и принципа сложения слоев при расчете железобетонных конструкций балочного типа методом конечных элементов

Балочные конструкции, выполняемые из сборного и монолитного железобетона, широко распространены как при возведении транспортных сооружений, так и в гражданском строительстве. В случае мостовых переходов и путепроводов балочные пролётные строения воспринимают как постоянную, так и переменную нагрузку от подвижного состава и/или автотранспортных средств.

Рассмотрим вариант модификации линейной постановки метода конечных элементов (МКЭ) включением в расчет переменных параметров упругости и принципа сложения слоев, рассмотренных в пп. 2, 3.

Разбиение на треугольные конечные элементы целесообразно ввиду достаточной релевантности конечноэлементной модели

описываемого типа по отношению к балочным конструкциям, работающим в основном на изгиб. В этом случае большая часть напряжений и деформаций реализуется в плоскости изгиба, тогда как в третьем направлении внутренние силовые и деформационные факторы выражены слабее.

Для вычисления напряжений и деформаций на октаэдрических площадках возможно усреднение получаемых результатов по соседним треугольным элементам и использование известных соотношений механики деформированного твердого тела, в общем случае имеющих следующий вид [9, 10]:

$$\sigma_0 = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \quad (9)$$

$$\tau_0 = \frac{1}{3} \times \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (10)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{3}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3), \quad (11)$$

$$\gamma_0 = \frac{2}{3} \times \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}. \quad (12)$$

Вычисление матриц градиентов, упругости и жесткости конечного элемента производится с использованием общепринятых выражений [16]

$$\mathbf{K} = \int_0^V [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}] [\mathbf{B}] dV, \quad (13)$$

$$\mathbf{B} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_i & 0 & b_j & 0 & b_k & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_j & 0 & c_k \\ c_i & b_i & c_j & b_j & c_k & b_k \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\mathbf{D} = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где $\mathbf{K}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{D}$ – матрицы жесткости, градиентов и упругости конечного элемента соответственно (T – оператор транспонирования матрицы); A , V – площадь и объем треугольного элемента; b , c – компоненты функций формы конечного элемента; i, j, k – индексные переменные (по числу узлов в элементе).

Элементы матрицы градиентов (14) вычисляются на основании положения узлов конечного элемента в глобальной системе координат:

$$\begin{cases} b_i = y_j - y_k, \\ b_j = y_k - y_i, \\ b_k = y_i - y_j; \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} c_i = x_k - x_j, \\ c_j = x_i - x_k, \\ c_k = x_j - x_i. \end{cases} \quad (17)$$

Модуль упругости и коэффициент Пуассона железобетона рассчитываются с учетом наличия арматуры по слоям разбиения конструкции, основываясь на предположениях, изложенных в п. 3.

Определенные значения деформаций и напряжений в конечных элементах (соотношения (9)–(12)) уточняются итерационным пересчетом путем подстановки в выражение (15) переменных параметров упругости, которые находятся из величины октаэдрических деформаций и напряжений, т. е. из вида напряженного состояния в элементе.

Данный подход по сравнению с обычным линейным расчетом позволяет более точно оценивать напряженное состояние как в отдельных конечных элементах, так и в конструкции в целом.

5. Применение модифицированного метода конечных элементов для расчета железобетонной балки, изготовленной из многокомпонентного высокопрочного тяжелого бетона

В целях апробации предлагаемого алгоритма расчета проведено сопоставление получаемых при его применении результатов с эксперимен-

тальными данными работы [14]. В состав опытной балки включен модифицированный бетон тяжелого класса, обладающий повышенными прочностными и эксплуатационными характеристиками, а также низким удельным расходом цемента на единицу призмочной прочности. Данные параметры достигаются за счет включения в состав бетонной смеси целого ряда мелкодисперсных добавок, оптимизирующих состав и внутреннее строение материала.

Для тестовой расчетной схемы за основу взят вышеописанный эксперимент, а также принято, что армирование конструкции выполнено четырьмя арматурными стержнями диаметром 4 и 5 мм, распределенная нагрузка пресса заменена сосредоточенными силами, приложенными в девяти узлах верхнего пояса балки. Физико-механические параметры конструкционных материалов и расчетная схема приведены в табл. 1 и на рис. 2.

Послойное приведение параметров жесткости балки ($E_{\text{прив } i}$, $\mu_{\text{прив } i}$) произведено в соответствии с расчетной схемой: упругие константы вычислялись отдельно для каждого из двух горизонтальных рядов конечных элементов в зависимости от коэффициента их армирования.

Полученные с использованием ЭВМ результаты свидетельствуют о более высокой точности предлагаемого подхода по сравнению с обычным линейным МКЭ; они также хорошо коррелируют с экспериментальными значениями: расхождение расчетных величин и прогиба в центре балки, определенного опытным путем, составляет в среднем не более 2,5% (табл. 2).

Некоторое занижение расчетных результатов, в том числе модифицированным МКЭ, вызвано, вероятно, не абсолютной идентичностью схем армирования и приложения нагрузки при конечноэлементном моделировании и опытным эксперименте.

6. Заключение

В статье рассмотрен вариант модификации линейной постановки МКЭ, позволяющий бо-

ТАБЛИЦА 1. Основные параметры моделируемой балки

Параметр	Значение	Единица измерения
Габариты балки (Д×Ш×В)	1000×60×120	мм
Суммарная площадь арматуры	39,25	мм ²
Модуль упругости бетона первого рода	61,49	ГПа
Модуль упругости бетона второго рода	24,6	ГПа
Призменная прочность бетона на сжатие	115	МПа
Призменная прочность бетона на растяжение	14,9	МПа
Коэффициент Пуассона для бетона	0,24	—
Предельная относительная деформация при одноосном сжатии для бетона	0,002	мм/м
Модуль упругости арматуры первого рода	206,01	ГПа
Модуль упругости арматуры второго рода	79,236	ГПа
Коэффициент Пуассона для арматуры	0,3	—

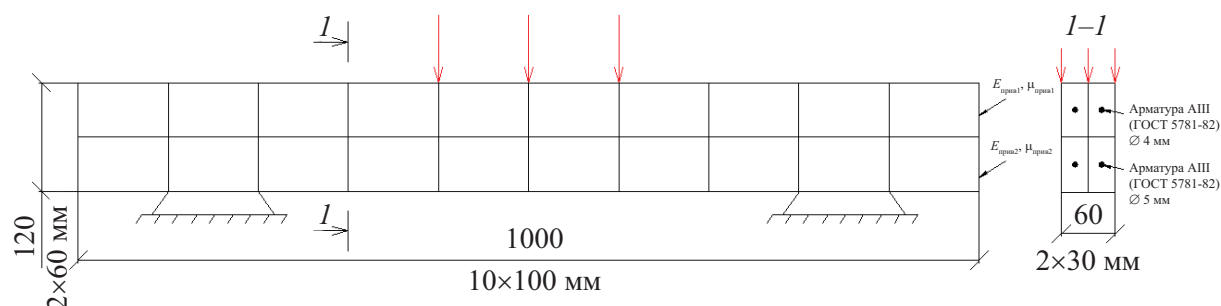


Рис. 2. Конечноэлементная схема моделируемой железобетонной балки

ТАБЛИЦА 2. Результаты моделирования работы железобетонной балки

Нагрузка пресса, кг	Расчетный прогиб в центре балки, мм		Измеренный прогиб в центре балки, мм
	линейный МКЭ в общей постановке	модифицированный МКЭ	
200	0,0216	0,0218	0,0225
1000	0,2522	0,2572	0,2655
1800	1,841	1,8962	1,9585
2300	10,6579	11,003	11,102
2500	Разрушение конструкции		

лее точно оценить напряженное и деформированное состояние плоских железобетонных конструкций балочного типа.

Выражения для расчета переменных параметров упругости (см. (5), (6)) и алгоритм их включения в матрицу упругости конечных элементов (формулы (9)–(17)) позволяют реализовать описываемый подход в форме расчетного модуля для существующих программных комплексов, используемого в случае необходимости, в том числе для сравнительной оценки уже имеющихся результатов.

Продemonстрировано применение разработанного подхода для моделирования железобетонной балки, изготовленной с применением многокомпонентного высокопрочного бетона тяжелого класса. Полученные результаты подтверждают релевантность предлагаемого решения в отношении современных составов.

Библиографический список

1. Берг О. Я. Прочность бетона и других материалов, обладающих различным сопротивлением растяжению и сжатию, в условиях сложного напряженного состояния / О. Я. Берг // Труды ЦНИИС. – М. : Трансжелдориздат, 1960. – Т. 36. – С. 5–41.
2. Жиренков А. Н. Деформирование и прочность обычного тяжелого бетона при сложном напряженном состоянии : дис. ... д-ра техн. наук, специальность : 01.02.04 / А. Н. Жиренков. – М. : Моск. гос. открытый пед. ун-т им. М. А. Шолохова, 2009. – 205 с.
3. Лукша Л. К. Расчет прочности железобетонных конструкций с учетом сложного напряженного состояния бетона : дис. ... д-ра техн. наук, специальность : 05.23.01 / Л. К. Лукша. – Минск : МГИПС, 1978. – 378 с.
4. Зенин А. В. Определение напряженно-деформированного состояния элементов мостовых железобетонных конструкций с учетом свойств материалов и характера нагружения : дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.23.15 / А. В. Зенин. – Новосибирск : СГУПС, 1987. – 213 с.
5. Кулик И. И. Прочность, деформации бетонов и расчет железобетонных конструкций при плоском напряженном состоянии : дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.23.01 / И. И. Кулик. – Минск : МГИПС, 1982. – 249 с.
6. Лифшиц М. Б. Учет напряженного состояния в критерии прочности бетона / М. Б. Лифшиц // Строительные конструкции транспортного назначения. – 1979. – № 2. – С. 19–30.
7. Петров А. А. Деформационная модель нелинейной ползучести железобетона и ее приложение к расчету плосконапряженных элементов и систем из них : дис. ... д-ра техн. наук, специальность : 05.23.01 / А. А. Петров. – М. : МИИТ, 2001. – 326 с.
8. Ермакова А. В. Метод дополнительных конечных элементов для нелинейного расчета железобетонных конструкций по предельным состояниям / А. В. Ермакова. – М. : АСВ, 2017. – 63 с.
9. Круглов В. М. Нелинейное сопротивление элементов железобетонных мостовых конструкций : дис. ... д-ра техн. наук, специальность : 05.23.15 / В. М. Круглов. – Новосибирск : СГУПС, 1988. – 385 с.
10. Карпенко Н. И. Нелинейное деформирование бетона и железобетона / Н. И. Карпенко, В. М. Круглов, Л. Ю. Соловьев. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2001. – 275 с.
11. Юрченко В. Э. Критерии прочности модифицированных бетонов в плоском напряженном состоянии / В. Э. Юрченко // Вестн. РГУПС. – 2015. – № 2. – С. 110–115.
12. Круглов В. М. Об одном подходе в построении основных физических соотношений бетона в плоском напряженном состоянии / В. М. Круглов, В. Э. Юрченко // Вестн. РГУПС. – 2016. – № 2. – С. 102–110.
13. Круглов В. М. Основные физические соотношения для бетона в плоском напряженном состоянии / В. М. Круглов, А. И. Козачевский // Сопротивление материалов и теория сооружений. – 1988. – № 3. – С. 25–32.
14. Хвастунов А. В. Порошково-активированный высокопрочный бетон и фибробетон с низким удельным расходом цемента на единицу прочности : дис. ... канд. техн. наук, специальность : 05.23.05 / А. В. Хвастунов. – Пенза : Пенз. гос. ун-т архитектуры и строительства, 2011. – 218 с.
15. Круглов В. М. Жесткостные характеристики трехмерных железобетонных элементов с трещинами / В. М. Круглов // Вопросы надежности и долго-

вечности искусственных сооружений железнодорожного транспорта. – 1990. – Т. 1. – С. 38–51.

16. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд ; пер. с англ. А. А. Шестакова; под ред. Б. Е. Победри. – М. : Мир, 1979. – 393 с.

References

1. Berg O. Ia. Prochnost betona i drugikh materialov, obladaiushchikh razlichnym soprotivleniem rastiazheniiu i szhatiui, v usloviakh slozhnogo napriazhennogo sostoiianiia [Strength of concrete and other materials possessing different resistance to extension and compression, under multiaxial stress conditions]. *Trudy TsNIIS [Central Transport Constr. Inst. Proc.]*. Moscow, Trans-zheldorizdat Publ., 1960, vol. 36, pp. 5–41. (In Russian)
2. Zhirenkov A. N. *Deformirovanie i prochnost obychnogo tiazhelego betona pri slozhnom napriazhennom sostoianii [Deformation and strength of normal-weight concrete under multiaxial stress]*. D. Eng. Sci. dissertation: 01.02.04. Moscow, Moscow State open Pedagogic University named M. A. Choloxova Publ., 2009, 205 p. (In Russian)
3. Luksha L. K. *Raschet prochnosti zhelezobetonnykh konstruksii s uchetom slozhnogo napriazhennogo sostoianiia betona [Calculation of reinforced concrete structures' strength accounting for multiaxial stress state of concrete]*. D. Eng. Sci. dissertation: 05.23.01. Minsk, MGIPS Publ., 1978, 378 p. (In Russian)
4. Zenin A. V. *Opredelenie napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia elementov mostovykh zhelezobetonnykh konstruksii s uchetom svoistv materialov i kharaktera nagruzheniia [Determination of stress-strength state of bridge reinforced concrete elements accounting for material qualities and load character]*. Cand. Eng. Sci. dissertation: 05.23.15. Novosibirsk, SGUPS Publ., 1987, 213 p. (In Russian)
5. Kulik I. I. *Prochnost, deformatsii betonov i raschet zhelezobetonnykh konstruksii pri ploskom napriazhennom sostoianii [Strength, concrete deformations and calculation of reinforced concrete structures in biaxial stress state]*. Cand. Eng. Sci. dissertation: 05.23.01. Minsk, MGIPS Publ., 1982, 249 p. (In Russian)
6. Lifshits M. B. Uchet napriazhennogo sostoianiia v kriterii prochnosti betona [Accounting for state of stress amongst concrete strength criteria]. *Stroitelnye konstruksii transportnogo naznacheniiia [Transport-purpose engineering structures]*, 1979, no. 2, pp. 19–30. (In Russian)
7. Petrov A. A. *Deformatsionnaia model nelineinnoi polzuchesti zhelezobetona i ee prilozhenie k raschetu ploskonapriazhennykh elementov i sistem iz nikh [Stress-strain model of nonlinear creep of reinforced concrete and its application to calculation of plate stress elements and systems comprised of them]*. D. Eng. Sci. dissertation: 05.23.01. Moscow, MIIT Publ., 2001, 326 p. (In Russian)
8. Ermakova A. V. *Metod dopolnitelnykh konechnykh elementov dlia nelineinogo rascheta zhelezobetonnykh konstruksii po predelnym sostoianiiam [Method of additional finite elements for non-linear calculation of reinforced-concrete structures by limit states]*. Moscow, ASV Publ., 2017, 63 p. (In Russian)
9. Kruglov V. M. *Nelineinoe soprotivlenie elementov zhelezobetonnykh mostovykh konstruksii [Non-linear resistance of elements of reinforced concrete bridge structures]*. D. Eng. Sci. dissertation: 05.23.15. Novosibirsk, SGUPS Publ., 1988, 385 p. (In Russian)
10. Karpenko N. I., Kruglov V. M. & Solov'ev L. Yu. *Nelineinoe deformirovanie betona i zhelezobetona [Non-linear deformation of concrete and reinforced concrete]*. Novosibirsk, SGUPS Publ., 2001, 275 p. (In Russian)
11. Yurchenko V. E. Kriterii prochnosti modifitsirovannykh betonov v ploskom napriazhennom sostoianii [Strength criteria of modified concrete in biaxial stress state]. *Vestnik RGUP [Proc. of Rostov State Transport University]*, 2015, no. 2, pp. 110–115. (In Russian)
12. Kruglov V. M. & Yurchenko V. E. Ob odnom podkhode v postroenii osnovnykh fizicheskikh sootnoshenii betona v ploskom napriazhennom sostoianii [On one approach to setting up main physical interrelations of concrete in biaxial stress state]. *Vestnik RGUP [Proc. of Rostov State Transport University]*, 2016, no. 2, pp. 102–110. (In Russian)
13. Kruglov V. M. & Kozachevskii A. I. Osnovnye fizicheskie sootnosheniia dlia betona v ploskom napriazhennom sostoianii [Main physical interrelations for concrete in biaxial stress state]. *Soprotivlenie materialov i teoriia sooruzhenii [Strength of materials and theory of structures]*, 1988, no. 3, pp. 25–32. (In Russian)

14. Khvastunov A. V. *Poroshkovo-aktivirovannyi vysokoprochnyi beton i fibrobeton s nizkim udelnym raskhodom tsementa na edinitsu prochnosti* [Powder-activated high-strength concrete and fibre concrete with low rate of consumption of cement per unit of strength]. Cand. Eng. Sci. dissertation: 05.23.05. Penza, PGU architecture and construction Publ., 2011, 218 p. (In Russian)

15. Kruglov V. M. *Zhestkostnye kharakteristiki trekhmernykh zhelezobetonnykh elementov s tresh-*

chinami [Stiffness properties of fractured three-dimensional reinforced concrete elements]. *Voprosy nadezhnosti i dolgovechnosti iskusstvennykh sooruzhenii zheleznodorozhnogo transporta* [Problems of reliability and durability of railway transport engineering structures], 1990, vol. 1, pp. 38–51. (In Russian)

16. Segerlind L. *Primenenie metoda konechnykh elementov* [Applied finite element analysis]. Per s angl., tr. by A. A. Shestakov, ed. by B. E. Pobedria. Moscow, Mir Publ., 1979, 393 p. (In Russian)

ЮРЧЕНКО Виталий Эдуардович – аспирант, vitalyuyurchenko@mail.ru (Российский университет транспорта (МИИТ)).

СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА «ИЗВЕСТИЯ ПГУПС» ЗА 2018 ГОД

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

<i>Агунов А. В., Варенцов В. М., Соколов Д. А.</i> Особенности расчетов потерь мощности в тяговых сетях с учетом перемещения электрических потребителей энергии ...	15, 4	491–497
<i>Андреев В. М.</i> Проблемы прохода устройств контактной сети в искусственных сооружениях ...	15, 2	177–182
<i>Баранов А. Н., Ефимов В. П.</i> Усталостные испытания литых несущих деталей трехосной тележки модели 18-522 А ...	15, 1	5–16
<i>Белый А. А., Андрушко С. Б.</i> Пути повышения надежности эксплуатации железобетонных мостов для пропуска сверхнормативной нагрузки ...	15, 1	17–29
<i>Болдырев А. П., Ступин Д. А., Гуров А. М.</i> Основные тенденции разработки и внедрения новых конструкций поглощающих аппаратов автосцепки грузовых вагонов ...	15, 1	30–35
<i>Бутунов Д. Б., Котенко А. Г.</i> Оценка непроизводительных потерь в работе сортировочной станции...	15, 4	498–510
<i>Волохов Г. М., Князев Д. А., Тимаков М. В.</i> Моделирование процесса роста трещины в сплошной оси диаметром 190 мм из стали ЕА4Т (EN 13261)...	15, 1	36–41
<i>Говоров В. В., Дороничева С. А., Чусовитин М. С.</i> Увеличение срока службы деревянных шпал...	15, 2	183–193
<i>Ефименко Ю. И., Четчуев М. В., Филиппов А. Г., Губарь М. В.</i> Проблемы оптимизации этапности развития станций при использовании альтернативных вариантов проектных решений...	15, 2	194–205
<i>Ильичев М. В., Гетманова М. Е., Тюфтяев А. С., Филиппов Г. А., Юсупов Д. И.</i> Актуальные вопросы повышения эксплуатационной стойкости железнодорожных колес...	15, 1	42–46
<i>Коровяковский Е. К., Хаджимухаметова М. А.</i> К вопросу о циркуляции воздуха внутри контейнера при открытом люке под определенным углом при модификации контейнеров для перевозки скоропортящихся грузов...	15, 1	47–53

<i>Кротов С. В., Кононов Д. П.</i> Контактно-усталостная долговечность рельсовой и колесной сталей...	15, 1	54–61
<i>Кузнецова И. О., Сабирова О. Б., Уздин А. М., Чанг Юань.</i> Оценка коэффициентов сочетаний сейсмической и подвижной нагрузок для мостов с совмещенным движением...	15, 2	206–214
<i>Курков А. В., Смирнов И. А., Шубин А. Д., Пушкин С. С.</i> Выявление поперечных трещин в гребнях бандажей локомотивных колес...	15, 4	511–516
<i>Мирахмедов М. М., Досметов С. К.</i> Вопросы применения международных стандартов ФИДИК в железнодорожных инвестиционно-строительных проектах...	15, 1	62–71
<i>Орлова А. М., Рудакова Е. А., Гусев А. В.</i> Совершенствование рессорного подвешивания грузовых вагонов с учетом необходимости снижения воздействия на путь...	15, 1	72–81
<i>Пегин П. А., Иголкин Г. В.</i> Обоснование строительства высокоскоростной линии между аэропортом и центром города...	15, 4	517–523
<i>Петуховский С. В.</i> Расчет кривизны рельсовой нити по стрелам несимметричной измерительной хорды...	15, 1	82–89
<i>Романов А. В., Мухаммадиев Н. Р.</i> К вопросу о развитии высокоскоростного движения в Республике Узбекистан...	15, 2	215–222
<i>Смелянский И. В., Бржезовский А. М., Толмачев С. В.</i> Балластировка грузонесущей балки транспортера...	15, 2	223–228
<i>Стрелков А. К., Теплых С. Ю., Бухман Н. С., Горикалев П. А., Иванов В. Г., Пономарев А. Б.</i> Воздействие железнодорожных транспортных комплексов на водные объекты Самарской области...	15, 2	229–239
<i>Тепикин В. А., Котенко А. Г., Ефименко Ю. И., Ролле И. А.</i> Совершенствование способов расформирования составов с вагонами, запрещенными к роспуску...	15, 1	90–99
<i>Титова Т. С., Макарова Е. И., Изварин М. Ю., Опарина Е. В.</i> Электромагнитные процессы в тяговом электроприводе электровоза переменного тока серии ЭП1 при выходе из электрического рекуперативного торможения...	15, 2	240–247
<i>Титова Т. С., Покровская О. Д.</i> Междисциплинарное положение теории терминалистики...	15, 2	248–260

<i>Титова Т. С., Покровская О. Д.</i> Организация транспортно-складских систем железнодорожного транспорта...	15, 3	327–343
<i>Фоменко В. Н., Шварц М. А.</i> Анализ термического режима вентилиционной шахты метрополитена методом разделения переменных Фурье...	15, 2	261–270
<i>Якушев А. В., Фомин С. А., Гомонец Ю. В.</i> Изменение величины электрического сопротивления колесных пар вагонов метро с увеличением срока эксплуатации...	15, 1	100–107

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

<i>Аль-Дамлахи Ию.</i> Разработка методики на основе ГИС и САПР для трассирования автомобильных дорог в районах твердого грунта...	15, 4	524–535
<i>Белошицкий Э. В., Мямлин С. С.</i> Совершенствование функционирования систем отопления пассажирских вагонов	15, 2	271–279
<i>Белый А. А., Карапетов Э. С., Цыганкова Е. С.</i> Развитие норм проектирования и временных нагрузок на примере парка железобетонных автодорожных мостов Санкт-Петербурга...	15, 3	344–357
<i>Василенко М. Н., Булавский П. Е., Василенко П. А.</i> Анализ и классификация кибератак на электронную техническую документацию железнодорожной автоматики и телемеханики...	15, 3	358–365
<i>Горбачев А. М.</i> Обзор математических моделей расписаний маршрутного городского транспорта...	15, 3	366–370
<i>Городнова Е. В., Минченко А. А., Суворова Е. А.</i> Исследование плотности сложения песчаных грунтов в основании дорожной насыпи в процессе ее уплотнения взрывами удлиненных зарядов...	15, 3	371–379
<i>Гофман М. В., Корниенко А. А., Мирончиков Е. Т.</i> Методика цифрового маркирования аудиосигналов для скрытой акустической связи через воздушный аудиоканал...	15, 2	280–294
<i>Грачев В. В.</i> Модель нестационарного теплообмена в охлаждающем устройстве тепловоза...	15, 3	380–390
<i>Индейкин А. В., Куранова О. Н., Черных А. К., Чентурия Г. Г.</i> К вопросу о повышении точности расчетов при строительстве транспортных коммуникаций...	15, 3	391–398

<i>Кабанов А. В., Малышев К. С., Васильев Д. Н.</i> Повышение эффективности работы щебеночных карьеров на основе оптимального обеспечения фронтов балластировочных работ ...	15, 4	536–544
<i>Канаев А. К., Логин Э. В.</i> Модель функционирования системы управления транспортной сетью Carrier Ethernet ...	15, 1	108–116
<i>Ким К. К., Полунин И. С.</i> К вопросу повышения эффективности работы электрогидроимпульсного разгрузочного комплекса для полувагонов...	15, 2	295–301
<i>Ким К. К., Герасимов М. А., Смирнов А. А.</i> Автономное электроснабжение речных мостов и прилегающих к ним объектов ...	15, 4	545–550
<i>Козлов И. С.</i> Напряженно-деформированное состояние железнодорожной насыпи с использованием минерального геоэкозащитного материала ...	15, 4	551–559
<i>Кочунов Ю. А., Волгин Е. С., Чебаков С. А.</i> Анализ производства опор контактной сети железных дорог, выполненных из полимерных композитных материалов ...	15, 3	399–407
<i>Кручек В. А., Грищенко А. В., Грачев В. В.</i> Процесс устойчивой реализации силы тяги локомотивов с групповым тяговым приводом колесных пар ...	15, 4	560–575
<i>Ленченкова Е. П.</i> Моделирование трассы железнодорожного пути по результатам мобильного лазерного сканирования ...	15, 3	408–413
<i>Марикин А. Н., Степанова К. К.</i> Особенности оптимизации подсистемы электроснабжения электрической тяги на железнодорожном транспорте ...	15, 3	414–425
<i>Матюшенко Е. С., Кулакова Ю. В., Шепель А. С.</i> Формирование схемы доставки бурового оборудования для нефтегазового сектора из Китая в Россию ...	15, 3	426–431
<i>Никитин А. Б., Кушпиль И. В.</i> Метод расчета стоимости жизненного цикла систем железнодорожной автоматики и телемеханики ...	15, 1	117–129
<i>Сапожников Вал. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., Абдуллаев Р. Б.</i> Особенности организации систем функционального контроля комбинационных схем на основе полиномиальных кодов ...	15, 3	432–445

<i>Соловьев С. В., Кабанов А. В., Жемчугова Н. А.</i> К вопросу разработки схем организации работ по строительству и реконструкции железнодорожных сортировочных комплексов...	15, 3	446–454
<i>Худоногов А. М., Иванов П. Ю., Мануилов Н. И., Дульский Е. Ю.</i> Интеллектуальная система диагностики тормозной сети поезда ...	15, 1	130–135

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

<i>Агунов А. В., Соколов Д. А.</i> Компьютерное моделирование и анализ работы устройств автоматики систем электроснабжения железных дорог...	15, 1	136–140
<i>Альдребби З. А.</i> Мониторинг и паспортизация наиболее известных памятников архитектуры в Сирии...	15, 2	302–310
<i>Альдребби З. А.</i> Повышение сейсмостойкости и усиление строительных конструкций архитектурных памятников в Сирии с помощью современных композитных материалов ...	15, 4	576–582
<i>Аршинцев Д. Н., Толмачев С. В., Бржезовский А. М.</i> Разработка условий эксплуатации специальных вагонов по результатам комплексных испытаний ...	15, 3	455–462
<i>Белаш Т. А., Нудьга И. Б., Яковлев А. Д.</i> Цунамизащита зданий в сейсмоопасных районах ...	15, 4	583–591
<i>Верех-Белоусова Е. И., Титова Т. С.</i> Эколого-геохимическое обоснование возможности переработки породных отвалов угольных шахт Луганщины ...	15, 3	463–470
<i>Герасименко П. В., Благовещенская Е. А., Яковлев В. В., Вертешев С. М.</i> Моделирование рисков, возникающих при транспортных операциях ...	15, 1	141–151
<i>Ефанов Д. В., Костроминов А. М., Манаков А. Д., Макишанов А. В., Шаров В. А.</i> Модульно-модифицированные взвешенные коды с суммированием в эксперименте по организации систем функционального контроля тестовых комбинационных схем ...	15, 2	311–322
<i>Карапетов Э. С., Атанов А. В.</i> Анализ существующих способов включения стали и железобетона в совместную работу	15, 4	592–604

<i>Киселев И. Г., Крылов Д. В., Водопьянова Ю. О.</i> Особенности компоновки и эксплуатации силовых блоков в полупроводниковых преобразовательных установках с испарительно-воздушным охлаждением ...	15, 4	605–612
<i>Клименко С. В., Яковлев В. В., Благовещенская Е. А.</i> Исследование реализаций алгоритмов контрольной суммы CRC32...	15, 3	471–477
<i>Корниенко А. А., Бирюков Д. Н., Глухарев М. Л., Глухов А. П., Диасамидзе С. В.</i> Модель онтологического представления процессов и метод синтеза спецификаций для интеллектуальной системы риск-ориентированного упреждающего управления информационной безопасностью ...	15, 1	152–160
<i>Корниенко А. А., Никитин А. Б., Диасамидзе С. В., Кузьменкова Е. Ю.</i> Моделирование компьютерных атак на распределенную информационную систему...	15, 4	613–628
<i>Привалов А. А., Карабанов Ю. С., Кравцов А. О., Сидоров С. И.</i> Математическая модель XSS-атаки ...	15, 1	161–172
<i>Рыбин П. К., Ершиков Н. В., Комовкина Н. С., Путилина Д. В.</i> Анализ структуры поездопотоков и вагонопотоков, поступающих в адрес российских портов Финского залива ...	15, 3	478–486
<i>Ходаковский В. А., Дегтярев В. Г., Герасименко П. В., Микони С. В.</i> Синтез сигналов с оптимальными по уровню боковых лепестков автокорреляционными свойствами...	15, 4	629–636
<i>Шакиров М. А., Ткачук А. А.</i> Ф-инвариантные поверхности в обмотках броневого двухобмоточного трансформатора ...	15, 4	637–652
<i>Шевченко Г. Г., Гура Д. А., Лобанова Ю. В.</i> Об обработке результатов определения пространственного положения деформационных марок с использованием поискового способа метода наименьших квадратов...	15, 4	653–665
<i>Юрченко В. Э.</i> Расчет железобетонных конструкций балочного типа методом конечных элементов с использованием переменных параметров упругости ...	15, 4	666–675