

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ, том 13, выпуск 1(46), 2016

ISSN (Print) 1815-588X

Учредитель и издатель

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

Адрес учредителя и издателя

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

Адрес редакции

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

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

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

Журнал зарегистрирован

в Российском индексе научного цитирования РИНЦ

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

Журнал имеет институт рецензирования

Журнал распространяется

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

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Научный редактор

А. К. Канаев, д-р техн. наук, доцент

Выпускающий редактор

С. А. Зинченко

Ответственный секретарь

Е. В. Моисеева

Перевод на английский язык

Д. И. Иванов

Верстка

А. А. Стуканова

Редактор сайта

Л. А. Стрелкова

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

Ситаж Марек, профессор, Силезский технический
университет, Польша

Христов Христо, профессор, Технический
университет, София, Болгария

РЕДКОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

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

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

Титова 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 15.04.2016.

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

Усл. печ. л. 12,375. Уч.-изд. л. 8,66. Установочный тираж 300 экз.
Заказ 400. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ПГУПС

190031, СПб., Московский пр., 9.

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT
UNIVERSITY Vol. 13, Is. 1(46) – 2016

ISSN (Print) 1815-588X

Founder and publisher

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

Founder and publisher address

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

Editorial address

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

e-mail: izvestia@izvestiapgups.org

Mass media registration certificate number

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

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

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

The Journal has the Peer-review division

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

JOURNAL STAFF

Editor-in-chief

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

Deputy chief editor

V. Sapozhnikov, D.Eng., Professor

Science editor

A. Kanayev, D.Eng., Associate Professor

Executive editor

S. Zinchenko

Executive secretary

E. Moiseeva

English translation

D. Ivanov

Layout

A. Stukanova

Online content editor

L. Strelkova

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

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

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

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

Marek Sitazh, Professor, Silesian University
of Technology, Poland

Khristo Khristov, Professor, Technical University
of Sofia, Bulgaria

EDITORIAL TEAM

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

© Petersburg State Transport University, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

→ СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

Воронцов В. И.

- Информационная поддержка персонала, обеспечивающего безопасность движения поездов при помощи экспертных систем 5

Карапетов Э. С., Шестовицкий Д. А.

- Прогноз срока службы железобетонных мостов на основе модели процесса карбонизации защитного слоя 14

Киселев И. Г., Галов В. В., Комиссаров С. Б.

- Перспективы модернизации системы электронагрева вязких грузов при сливе из железнодорожных цистерн 25

Мыльников П. Д.

- Исследование характеристик системы формирования ключей для мобильных объектов железнодорожного транспорта на основе оценивания параметров ММО-канала 31

Туранов Х. Т., Гордиенко А. А., Мягова А. В.

- Уточнённые результаты вычислений времени движения и скорости вагона на втором скоростном участке сортировочной горки при воздействии попутного ветра 40

Якушев А. Я., Середа А. Г.

- Компьютерное моделирование тягового трансформатора с секционированными вторичными обмотками 50

→ ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Вихарев С. О., Мирончиков Е. Т., Гофман М. В.

- Методика построения цифровых водяных знаков, устойчивых к сбоям синхронизации 60

Канцибер Ю. А., Пономарев А. Б.

- Расчеты характеристик поверхностного стока систем водоотведения на селитебных и производственных территориях северо-запада РФ 68

Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., Дмитриев В. В., Хуан Ц.

- Оптимальный систематический код на основе взвешивания разрядов
информационных векторов и суммирования без переносов для систем
функционального контроля 75

Сергеев С. А.

- Многоканальная нестационарная модель удалённого сервера
автоматизированной системы мониторинга искусственных сооружений 85

Соловьева Е. А.

- Технология очистки сточных вод и обработки осадков при глубоком
удалении азота и фосфора из сточных вод 93

УДК 656.2.08

В. И. Воронцов

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ПЕРСОНАЛА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ ПРИ ПОМОЩИ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ

Дата поступления: 01.02.2016

Решение о публикации: 09.03.2016

Цель: Установить причины ошибок персонала, допускаемых при организации движения поездов. Изучить способы исключения (минимизации) этих ошибок, применяемые в настоящее время. Разработать инструменты для решения данной проблемы. **Методы:** Статистические данные о наиболее значимых некорректных действиях персонала железнодорожного транспорта, которые допускаются при организации движения поездов, обработаны с помощью математического анализа. Полученные результаты спроецированы на трехуровневую систему контроля, реализуемую в ОАО «РЖД». **Результаты:** Раскрыты недостатки каждого уровня системы контроля. Показано, что одной из наиболее серьезных проблем в работе оперативного персонала является качество принятия решений в нестандартных ситуациях, связанных с отказами технических средств. Выявлены объективные основы формирования новых подходов к улучшению управляемости процессами обеспечения безопасности движения поездов. Доказано, что трансформация отношений между различными структурными подразделениями представляет собой необходимое условие, а проводимая модернизация производства (особенно информационных систем) – достаточное условие для применения систем поддержки принятия решений. Указаны дополнительные риски, сопровождающие процесс обеспечения безопасности перевозочного процесса через статистику нарушений, допущенных работниками Дирекции управления движением в 2012 г. Определена зона первоочередного принятия мер (малый стаж работы) по минимизации риска. Для снижения данного риска предложена компьютерная программа поддержки принятия управленческих решений оперативного персонала. **Практическая значимость:** Разработанная программа исключит ошибки оперативного персонала, обеспечит гарантированную безопасность при организации движения поездов, улучшит управляемость, снизит время задержек поездов при отказах технических средств. Система имеет несколько уровней работы, которые в комплексе дают синергетический эффект и помогают оперативному работнику при его работе в нестандартных ситуациях.

Риск, нестандартная ситуация, диспетчер, принятие управленческих решений, надежность технических средств.

Vladimir I. Vorontsov, post-graduate student, vivdh@yandex.ru (Krasnoyarsk Institute of Railway Transport) INFORMATION SUPPORT FOR PERSONNEL ENSURING TRAIN MOVEMENT SECURITY BY EXPERT SYSTEMS

Objective: To establish the causes of personnel errors occurring in organisation of train movement. To study methods for exclusion (minimisation) of such errors that are applied currently. To develop instruments

for solution of this problem. **Methods:** Statistical data on the most significant incorrect actions of railway transport personnel that occur in organisation of train movement were processed with the use of mathematical analysis. The results obtained were projected on the three-level control system implemented by the Russian Railways JSC. **Results:** Shortcomings of each level of control system were uncovered. It was demonstrated that one of the most serious problems in the work of operators is the quality of decision-making in abnormal situations related to failures of technical equipment. Objective foundations for forming new approaches to improving manageability of processes of ensuring train movement safety. It was proven that transformation of relations between various structural units is a necessary condition of, and the ongoing modernisation of production (particularly information systems) is a sufficient condition for application of decision support systems. Additional risks that accompany the process of ensuring safety of transportation process are pointed out through the statistics of violations committed by the Traffic Control Directorate employees in 2012. The zone of top-priority actions to minimise risks (short length of employment) is identified. To decrease such risk, a computer program for support of managerial decision-making of operators is proposed. **Practical importance:** The program developed will eliminate operator errors, ensure guaranteed safety in organisation of train movement, improve manageability, and cut train delay time in cases of failures of technical equipment. The system has several operation levels which as a whole provide a synergetic effect and help an operator in his work in abnormal situations.

Risk, abnormal situation, dispatcher, managerial decision making, dependability of technical equipment.

После запуска iPad Стив Джобс сказал о секрете успеха Apple: «Недостаточно уделять внимание только технологиям. Нужно искать нечто на стыке технологии, свободного искусства и человеческой природы – только такой союз приносит результаты».

В настоящее время недостаточно развивать системы безопасности, контроля и мониторинга всего и вся. В ОАО «РЖД» эти системы развиты. Не хватает систем поддержки решений оперативного персонала в нестандартных, критических ситуациях при обеспечении безопасности движения поездов. И эти системы будут работать именно «на стыке технологий и человеческой природы», о чем сказал Джобс.

Чтобы поддерживать требуемый уровень безопасности, нельзя допускать возникновения транспортных происшествий или событий. Гораздо выгоднее и проще предупредить кризисную ситуацию, чем ликвидировать ее последствия. Для этого необходимо контролировать соблюдение норм безопасности в технологических процессах. Контроль базируется на мониторинге состояния безопасности движения, от качества, полноты и достоверности которого зависит точность предупрежде-

ний. Для решения данной задачи надо определить критерии, по которым обеспечивается требуемый уровень контроля за соблюдением норм безопасности в рамках технологических процессов. В зависимости от характера этих процессов, нормативной базы, методов (принципов) управления и опыта персонала организации дополнительно вводятся критерии для определения необходимого контроля за соблюдением норм безопасности.

Среди основных причин ошибок персонала железнодорожного транспорта (рис. 1) следует выделить [3]:

- отсутствие знаний и/или навыков;
- отсутствие инструментальной поддержки;
- усталость, перенапряжение, болезненные состояния;
- халатность, злой умысел.

Основными инструментами, обеспечивающими контроль за соблюдением технологического процесса, являются [5]:

- технические средства с элементами интеллектуального управления, контролирующие соблюдение норм безопасности и блокирующие ошибочные действия персонала. Данные устройства должны иметь интер-

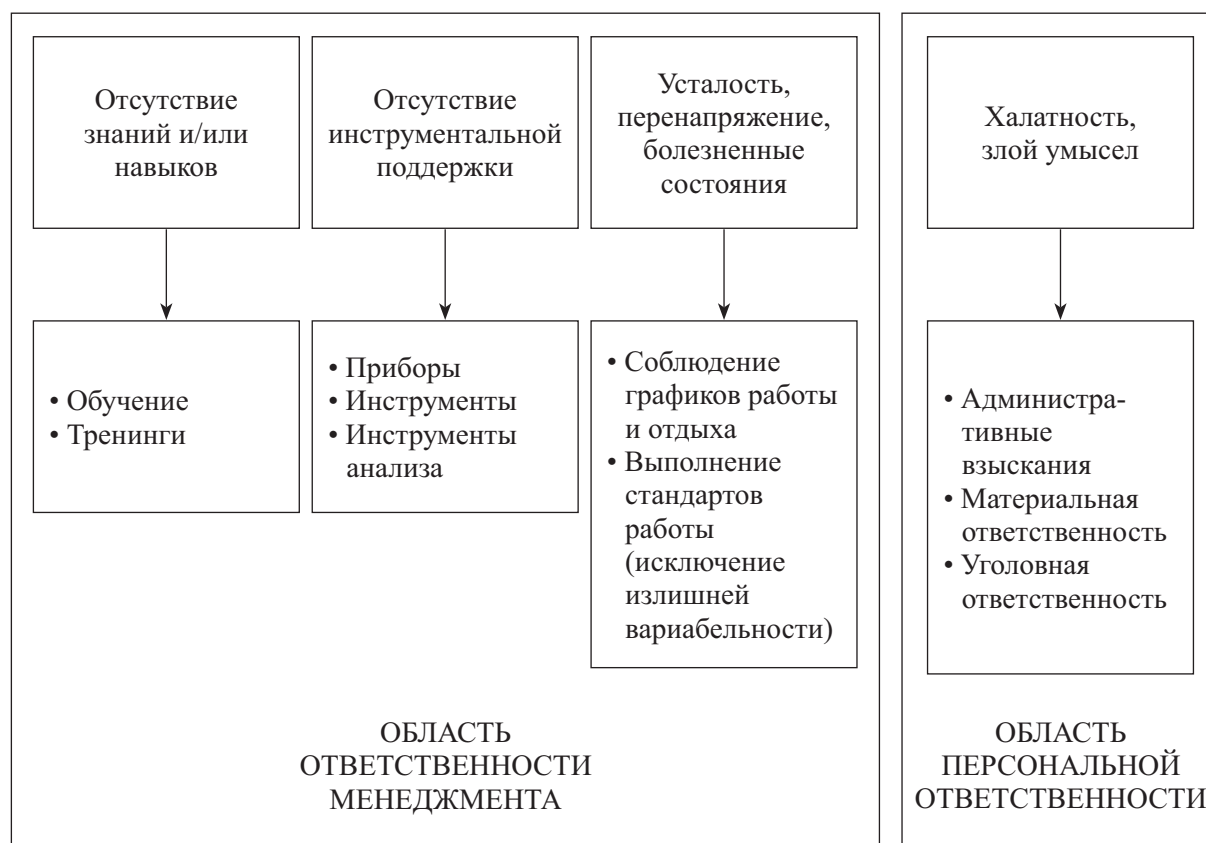


Рис. 1. Основные причины ошибок персонала

фейсы для интеграции в программные комплексы;

- программно-технические средства, обеспечивающие управление и дисциплинарный контроль соблюдения норм безопасности технологических процессов. Данные средства должны содержать программные модули для контроля, получения данных, их обработки и представления в удобном виде для решений и корректирующих действий;

- организационные средства для постоянного контроля за соблюдением норм безопасности при выполнении технологических операций путем непосредственного контроля, наблюдения (отслеживания) персоналом хода процесса, а также путем ревизорских и аудиторских проверок апостериорной информации по процессам.

Учитывая состав инструментальной базы, можно выделить способы контроля технологических процессов:

1) программно-технический контроль, наиболее эффективный контроль за исполнением технологического процесса происходит без участия человека за счет использования интеллектуальных программно-технических средств (рис. 2). Он происходит постоянно, в основном, круглосуточно;

Как только переменные системы достигнут значения, превышающего установленный предел (C_1), специальным сигналом на устройстве управления это регистрируется, после чего производится коррекция (чаще всего оператором вручную). Если этого действия не производится и процесс при этом не создает опасных условий, следующая система не включается.

Когда переменная величина показателя процесса превышает предельное значение (C_2), автоматически включается система контроля, возвращающая эту переменную величину в диапазон ее нормальных значений. Если этого сделать не удастся, переменная величина

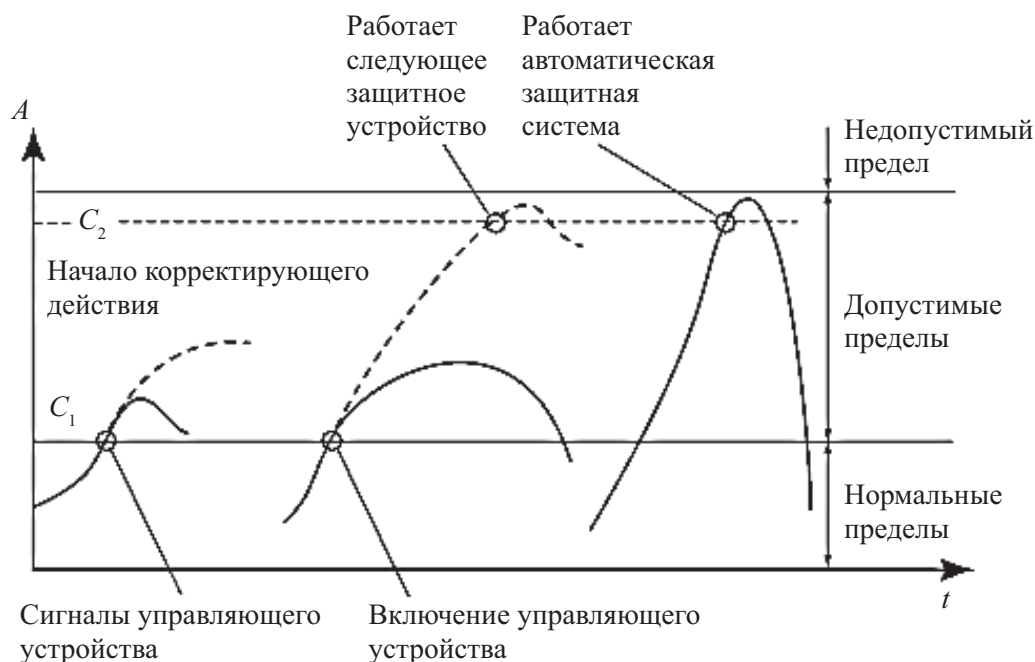


Рис. 2. Схема работы защитных устройств [7]:
 A – переменные характеристики процесса; t – время

показателя процесса может достичь таких значений, которые могут вызвать аварийную ситуацию.

2) диспетчерский контроль подразумевает использование всей инструментальной базы, чтобы диспетчерский аппарат и иные ответственные лица постоянно контролировали технологический процесс. Ведется постоянно во время процесса, в основном, круглосуточно;

3) ревизорский контроль включает в себя ревизорские и аудиторские проверки состояния безопасности движения. Проводится периодически – в соответствии с планом проведения ревизий и проверок либо внепланово – при необходимости дополнительно контролировать ход процесса.

Указанные виды контроля применяются много лет и доказали свою эффективность, однако они не позволяют полностью исключить ошибки персонала. Недостатки каждого из них:

1) неполный охват программно-техническим контролем всего производственного процесса. Доля влияния персонала на обеспечение безопасности движения достаточно велика, как и вероятность преднамеренного

исключения из работы персоналом контролирующих устройств (выключение машинистом кнопки бдительности, передислокация без необходимости подвижного состава при запрещающем сигнале светофора и т. д.);

2) диспетчер контролирует только малую часть вверенного ему подразделения и только по докладам работников, им же контролируемых (энергодиспетчеру зачитывает наряд-допуск руководитель работ, при этом диспетчер не может проконтролировать, в каком состоянии бригада, как произведено заземление и т. д.).

Имеются профессии, к которым вообще не применимы эти два вида контроля, например составитель поездов. В 2012 г. на ст. Юдино составитель уложил под поезд 9 тормозных башмаков, а контролирующему лицу доложил об укладке 20 башмаков. В итоге состав пришел в движение и, взрезав стрелку, столкнулся со встречным поездом. Данная категория работников выполняет работу в «одно лицо», и диспетчер не может ее проконтролировать, в то же время программно-технический контроль для них еще не разработан. В данном

случае применяется только ревизорский контроль;

3) ревизорский контроль не позволяет охватить всю работу персонала. Применяется в процессе исполнения персоналом своих обязанностей крайне редко, в основном уже по фактам произведенной работы, что не дает объективной картины.

Информационные системы поддержки

Научно-технический прогресс расширяет перечень инструментов контроля и способствует их постоянной эволюции. Вместе с тем наличие только соответствующих инструментов контроля не гарантирует соблюдения норм безопасности в рамках технологических процессов. На соблюдение норм безопасности в рамках технологических процессов значительное влияние оказывает состояние персонала, уровень его подготовки, что обуславливает формирование соответствующих систем поддержки принятия решений.

Ошибки персонала (см. рис. 1) возможны во время плановой, каждодневной работы, но в нестандартных, предаварийных, аварийных ситуациях эти ошибки возрастают многократно. Перечисленные причины ошибок персонала – отсутствие знаний и/или навыков, инструментальной поддержки, а также усталость, перенапряжение, болезненные со-

стояния могут создать ту критическую массу нарушений, которая приводит к тяжелым последствиям.

Также одним из значительных факторов риска является стаж работы сотрудников. Исследованы все нарушения безопасности на сети дорог в 2012 г. по вине движущихся (рис. 3).

Как видно из рис. 3, на железнодорожном транспорте неподготовленный человек с малым стажем работы нарушает безопасность движения значительно чаще. Более 44 % нарушений допустили работники со стажем менее 1 года. И сколько ошибок они совершат, прежде чем приобретут необходимый опыт?

Становление эксперта – процесс длительный. Установлено, что требуется не менее 10 лет, чтобы при благоприятных условиях стать профессионалом в какой-либо области [4]. При этом большую роль играют постоянные упражнения.

Проектировщики человеко-машинных систем сделали вывод, что объем информации, который оператор может хорошо усвоить и переработать, должен не задаваться произвольно в информационной модели, а определяться или для конкретных условий работы, или на основе количественных оценок, или посредством специальных экспериментов.

Как правило, оператор длительный период действует в режиме безаварийной работы, выполняя хорошо заученные действия, или вообще бездействует в ожидании экстремаль-

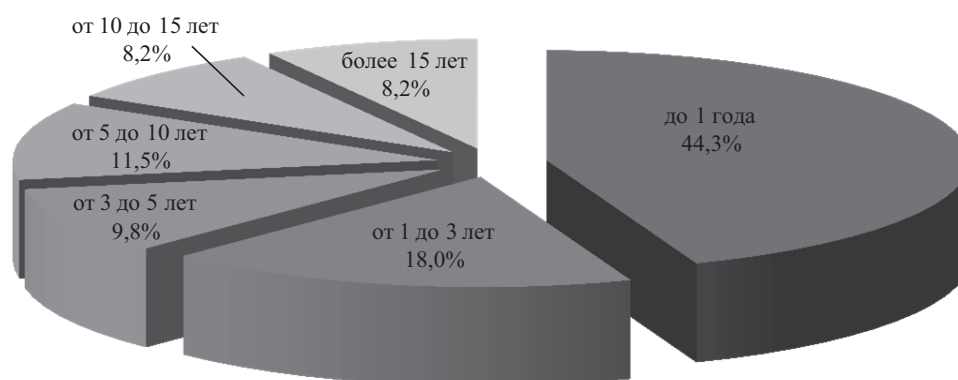


Рис. 3. Распределение случаев нарушений безопасности движения поездов в хозяйстве перевозок в зависимости от стажа работы в должности причастных работников за 2012 г.

ной ситуации, которая может и не возникнуть в его профессиональной деятельности. Такие режимы работы опасны, поскольку оператор может утратить навыки управления системой, снизить уровень операционной настороженности. Чтобы летчики не потеряли необходимых навыков во время посадки самолета, было сочтено целесообразным использовать не автоматическое, а полуавтоматическое управление на посадочной прямой. В результате благодаря сохранению тесной связи с объектом управления постоянно поддерживалась готовность летчика управлять самолетом вручную при внезапном отказе автоматики.

Для тренировки работников используются не только имитационные тренажеры, но и специальные экспертные системы, помогающие операторам анализировать поведение объекта, отличающегося от штатного. Установлено, что на восприятие, усвоение, переработку информации влияют десятки факторов, в том числе темперамент человека. Поскольку в организации работают люди с разными типами темперамента, управленческое решение должно представляться в форме, понятной всем заинтересованным сторонам.

Неоднократно отмечалось, что оперативные работники хозяйства перевозок (дежурные по станции, маневровые диспетчеры, составители поездов) при возникновении нештатных ситуаций обращаются не к нормативным документам, а к своим коллегам – начальникам станций, ревизорам движения и т. д. То есть при наличии на рабочих местах инструкций, распоряжений, приказов они все равно их не применяют [2].

Один из способов сделать решение понятным людям с разным типом личности – составлять разные варианты решения, соответствующие разным темпераментам. Другой способ предусматривает оформление решения в виде структурированного сообщения (устного или письменного). Подыскивая подходы к каждому работнику, надо использовать разные инструменты, например, программы помощи принятия решений, построенные на основе баз экспертных знаний. Эти базы необ-

ходимы, поскольку содержат большой объем информации, что видно на примере оказания помощи остановившемуся поезду.

Активное развитие информационных технологий позволяет создавать разные базы знаний. Очень важно, на наш взгляд, создать базы экспертных знаний для оперативных работников железнодорожного транспорта. При разработке программы помощи принятия решений на основе таких баз можно подробно описать алгоритм действий движущегося в нестандартных ситуациях. Мы попытались создать виртуальную организацию. Программа в режиме реального времени должна контролировать процесс оказания помощи и своевременно вмешиваться в случае неверных действий.

Программа поддержки оперативного персонала

Для решения данной задачи необходимо применить разработанную в КрИЖТ ИрГУПС компьютерную программу поддержки оперативного персонала [6], которая позволяет при одном нажатии клавиши получить подробный порядок действий в любой нестандартной ситуации (с регламентом переговоров, с расчетом нахождения хвоста поезда на перегоне при оказании помощи и т. д.) [1]. Применение программы сократит время на лишние, некорректные действия диспетчеров, исключит ошибки.

При активации программы поездной диспетчер или дежурный по станции видит список нестандартных ситуаций, в которых ему нужна поддержка. Выбрав нажатием кнопки мыши, например, «Оказание помощи поезду, остановившемуся на перегоне», диспетчер заносит в появившееся меню ввода данные: фамилию машиниста, номер поезда, перегон, километр остановки, причину неисправности. Эти данные помогут ему правильно определить место остановки вспомогательного локомотива, без запинки произнести все приказы и выполнить другие действия (рис. 4).

Перечень необходимых документов для оказания помощи (Раскрыть/скрыть)

☒ 1. После остановки поезда на перегоне и невозможности дальнейшего следования, а так же убеждении машиниста в фактическом месте остановки головы поезда ДНЦ, ДСП должен получить доклад от машиниста по форме:
"Машинист *Иванов* поезда *2354*, на перегоне *Камала-Солянка*, требую вспомогательный локомотив с по причине неисправности серии *ВЛ-85* из-за отказа *ГВ РЗ*. Остановку головы поезда на *4293*км, *3* пикете перегона *Камала Солянка* подтверждаю."
Дата: **1.8.2013 20:30:7** (приложение 1, строка 9, распоряжения №512р от 16.03.2010г.).

☒ ДНЦ, ДСП подтверждает правильность восприятия:
"Понятно, поезду *2354* на - *4293*км, *3* пк перегона *Камала-Солянка* требуется вспомогательный локомотив по причине неисправности серии *ВЛ-85* из-за отказа *ГВ РЗ*."
1.8.2013 20:30:26
Примечание:

☒ 2. Полученное уведомление о затребовании вспомогательного локомотива ДНЦ, ДСП записывают в журнал диспетчерских распоряжений ф. ДУ-58 с последующей отметкой в журнале движения поездов (напротив номера поезда в графе примечание). (п.3 прил.7 ИДП). **Примечание:**
В записанном уведомлении обязательно должно быть указано: - время поступления требования об оказании помощи, - место остановки поезда (километр, пикет на котором находится голова остановившегося поезда), - причина затребования вспомогательного локомотива, - лицо, от которого получено уведомление (должность, фамилия). (п.2, 3 прил.7 ИДП, п.9 прил.10 ИДП)

1.8.2013 20:33:5

☒ 3. Если уведомление машинистом поезда передано ДСП станции, последний незамедлительно передает его поезвному диспетчеру.
1.8.2013 20:33:16

☒ 4. Если движение поезда не может быть возобновлено в течение 20 минут и нет возможности удержать поезд на месте на автоматических тормозах машинист поезда обязан принять меры для закрепления подвижного состава на тормозные башмаки, указав дежурному по ближайшей станции и поезвному диспетчеру о закреплении поезда и количество уложенных тормозных

Рис. 4. Пользовательский интерфейс программы

После занесения данных на экране монитора появляется конкретный алгоритм действий для ситуации, разработанный на основе экспертных знаний. В правом верхнем углу имеется окно «Перечень необходимых документов», который диспетчер может задействовать в тяжелых спорных случаях для детальной проработки ситуации. Активировав этот перечень, диспетчер видит все документы, которые могут ему помочь. При нажатии на синюю строку с названием документа открывается текст необходимого в данной ситуации пункта (рис. 5).

Самый глубокий уровень программы позволяет фиксировать все действия оперативного персонала во времени. Активация самой программы и каждого последующего окна в ней сводится в итоговый отчет (протокол), который можно получить одним нажатием кнопки сразу после вывода поезда с перегона. Ведь согласно существующим положениям, необходимо оценивать правильность действия

движенца в каждой нестандартной ситуации (рис. 6).

Заключение

Научная новизна программы состоит в объединении трех видов контроля (программного, диспетчерского, ревизорского), применяемых сейчас на транспорте для обеспечения безопасности движения поездов, в одном ресурсе. Впервые реализуется трехуровневая архитектура программы, позволяющая не только повысить эффективность работы оперативного персонала (имеется подробный алгоритм его действий), но и дать возможность ревизору или руководителю с другого рабочего места контролировать правильность действий персонала. Благодаря пошаговой фиксации развития нестандартной ситуации третий уровень системы даст возможность анализировать ситуацию для выработки пред-

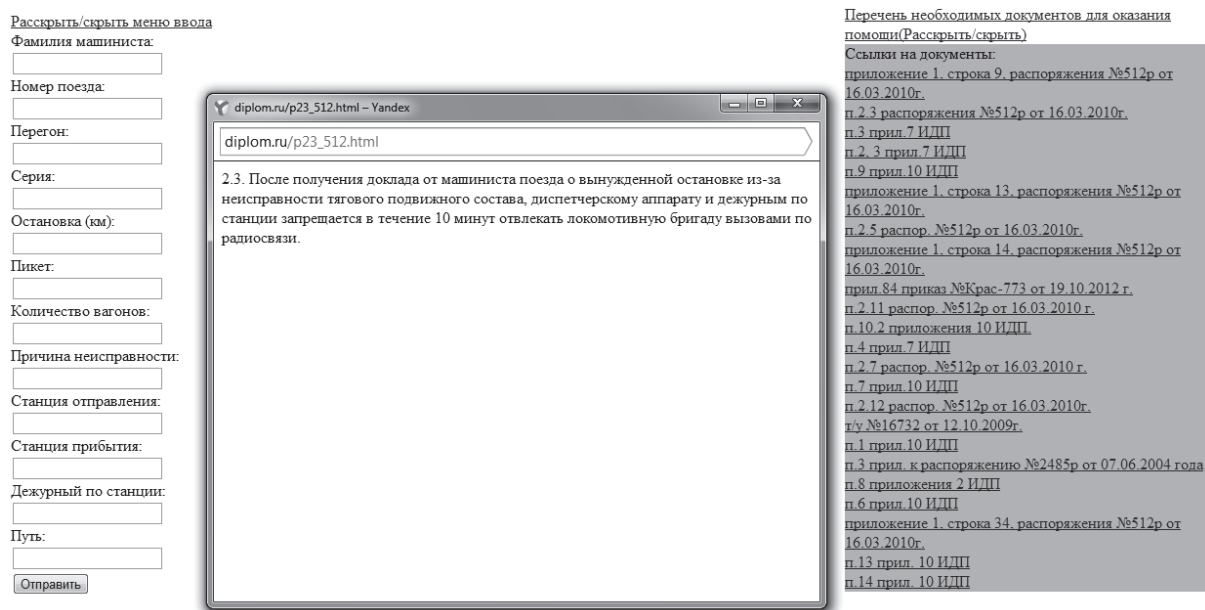


Рис. 5. Интерактивная база нормативных документов

Отчет

по порядку действий ДНЦ, ДСП при оказании помощи поезду, остановившемуся на перегоне.

1. Дата __, __ часов, __ мин. получен доклад от машиниста остановившегося на перегоне: "Машинист (фамилия) поезда N __, требую вспомогательный локомотив с головы (с хвоста) по причине неисправности тепловоза (электровоза, МВПС, ССПС) серии __ N __ из-за (указать причину неисправности). Остановку головы поезда на __ км, __ пикете перегона __ подтверждаю. Время __". (приложение 1, строка 9, распоряжения №512р от 16.03.2010г.).

Дата __, __ часов, __ мин. ДНЦ, ДСП подтвердил правильность восприятия доклада машиниста: "Понятно, поезду N __ на __ км, __ пк перегона __ требуется вспомогательный локомотив по причине неисправности тепловоза(электровоза, МВПС, ССПС) серии __ N __ из-за (указать причину неисправности). Время __"

2. Полученное уведомление о затребовании вспомогательного локомотива ДНЦ, ДСП записал в журнал диспетчерских распоряжений ф. ДУ-58 с последующей отметкой в журнале движения поездов (напротив номера поезда в графе примечание). (п.3 прил.7 ИДП). Примечание: В записанном уведомлении обязательно должно быть указано: - время поступления требования об оказании помощи, - место остановки поезда (километр, пикет на котором находится голова остановившегося поезда), - причина затребования вспомогательного локомотива, - лицо, от которого получено уведомление (должность, фамилия). (п.2, 3 прил.7 ИДП, п.9 прил.10 ИДП)

3. Если уведомление машинистом поезда передано ДСП станции, ДСП в __ часов, __ мин. передал его поезвному диспетчеру.

4. Движение поезда не было возобновлено в течение 20 минут и не было возможности удержать поезд на месте на автоматических тормозах машинист поезда закрепил подвижной состав на тормозные башмаки, указав дежурному по ближайшей станции и поезвному диспетчеру о закреплении поезда и количество уложенных тормозных башмаков (п.2.5 распор. №512р от 16.03.2010г.): Дата __, __ часов, __ мин. "Машинист (фамилия) поезда N __, состав поезда закреплен __ тормозными башмаками со стороны станции __ и __ тормозными башмаками со стороны станции __". (приложение 1, строка 13, распоряжения №512р от 16.03.2010г.). Примечание: Если поезд закрепляется на уклоне круче 0,012 тысячных, то диспетчер поездной получил информацию от машиниста поезда о закреплении, сверяет количество уложенных тормозных башмаков с данными унифицированной таблицы ГИД Урал ВНИИЖТ и делает отметку на графике исполненного движения. (прил.67 приказ №Крас-773 от 19.10.2012 г.).

5. Дата __, __ часов, __ мин. Поездной диспетчер, получив информацию о закреплении подвижного состава на перегоне подтвердил правильность восприятия доклада машиниста: "Понятно, состав поезда N __ закреплен __ тормозными башмаками со

Рис. 6. Итоговый отчет о порядке действий оперативного персонала в нестандартной ситуации

упреждающих воздействий, т. е. будет обеспечена достоверность действий работника при расследовании тяжелых спорных случаев.

Применение такой программы будет своего рода прорывом, значительно более высоким уровнем работы оперативных сотрудников в нестандартных ситуациях, позволит гарантировать управляемость и надежность перевозок, обеспечит сохранность перевозимых пассажиров и грузов.

Библиографический список

1. Воронцов В. И. Информационно-коммуникационные технологии в управлении : монография / В. И. Воронцов. – Одесса : Куприенко СВ, 2015. – 245 с.
2. Воронцов В. И. Учить руководить / В. И. Воронцов // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 7. – С. 40.
3. Лapidус В. А. Построение системы менеджмента безопасности движения на принципах КИСМК (Корпоративной интегрированной системы менеджмента качества) / В. А. Лapidус // Бюл. ОУС ОАО «РЖД». – 2010. – № 3. – С. 46–60.
4. Ларичев О. И. Теория и методы принятий решений, а также Хроника событий в Волшебных странах : учеб. – М. : Логос ; Университетская книга, 2008. – 392 с.
5. Методические указания по внедрению функциональной стратегии обеспечения гарантированной безопасности и надежности перевозочного процесса в ОАО «РЖД», 2009. – 18 с.
6. Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016611232. Программа поддержки принятия решений оперативного персонала железно-

дорожного транспорта на основе баз экспертных знаний / В. И. Воронцов, А. С. Баженов. – Заявл. № 2015660858 ; Зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 28.01.2016.

7. Фалеев М. И. Надежность технических систем и техногенный риск : учеб. пособие / М. И. Фалеев. – М. : Деловой экспресс, 2002. – 367 с.

References

1. Vorontsov V. I. Informatsionno-kommunikatsionnyye tekhnologii v upravlenii: monografiya [Information and Communication Technologies in Management: A Monograph]. Odesa, Kupriyenko SV, 2015. 245 p.
2. Vorontsov V. I. *Zheleznodorozhny transport – Railway Transport*, 2010, no. 7, p. 40.
3. Lapidus V. A. *Byulleten OUS OAO RZhD – Bulletin of the United Academic Board of Russian Railways JSC*, 2010, no. 3, p. 46–60.
4. Larichev O. I. *Teoriya i metody prinyatiy resheniy [Theory and Methods of Decision Making]*. Moscow, Logos, Universitetskaya kniga, 2008. 392 p.
5. Methodological Directions for Introduction of Functional Strategy of Ensuring Guaranteed Safety and Reliability of Transportation Process at Russian Railways JSC. 2009. 18 p.
6. Certificate for State Registration of Computer Program No 2016611232. Program for Decision-Making Support of Railway Transport Operators on the Basis of Expert Knowledge Databases. V. I. Vorontsov, A. S. Bazhenov. Registered January 28, 2016.
7. Faleyev M. I. *Nadezhnost tekhnicheskikh sistem i tehnogenny risk [Reliability of Technical Systems and Technology-Related Risk]*. Moscow, Delovoy ekspress, 2002. 367 p.

ВОРОНЦОВ Владимир Иванович – аспирант, vivdh@yandex.ru (Красноярский институт железнодорожного транспорта).

УДК 624.21.093.004

Э. С. Карапетов, Д. А. Шестовицкий**ПРОГНОЗ СРОКА СЛУЖБЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВ
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА КАРБОНИЗАЦИИ
ЗАЩИТНОГО СЛОЯ**

Дата поступления: 28.12.2015

Решение о публикации: 28.02.2016

Цель: Разработать прогноз срока службы мостов на основе моделирования процесса карбонизации защитного слоя железобетонных элементов мостов. **Методы:** В основе модели лежит аналитическое решение дифференциального уравнения теории диффузии первого закона А. Фика. **Результаты:** Приведен пример расчета сроков депассивации защитного слоя железобетонных элементов мостов с учетом вариативности исходных данных. Сопоставлены теоретическая модель деградации и фактической глубины карбонизации защитного слоя. Предложена модель прогнозирования срока службы железобетонных мостов, основанная на оценке времени карбонизации защитного слоя с учетом различных факторов: температуры, влажности окружающей среды, концентрации углекислого газа в атмосфере, прочностных характеристик бетона. **Практическая значимость:** Разработанная модель пригодна для прогноза долговечности на стадии проектирования.

Железобетон, долговечность, карбонизация, I закон диффузии А. Фика, концентрация углекислого газа в атмосфере.

Eduard S. Karapetov, Cand. Sci. (Eng.), professor; ***Dmitriy A. Shestovitskiy**, assistant lecturer, kmost@pgups.edu (Petersburg State Transport University) FORECAST OF REINFORCED CONCRETE BRIDGES' SERVICE LIFE ON THE BASIS OF PROTECTIVE COVER CARBONIZATION PROCESS MODEL

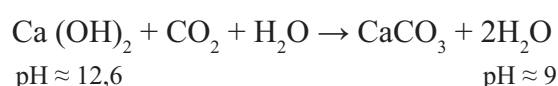
Objective: To develop a forecast for bridges' service life on the basis of modelling of a process of carbonization of protective cover of bridges' reinforced concrete elements. **Methods:** The model is based on analytical solution of differential equation of Fick's first diffusion law. **Results:** An example of calculation for depassivation terms of protective cover of bridges' reinforced concrete elements is provided, taking into account variability of basic data. A theoretical model of degradation and actual depth of carbonization of protective cover are compared. A model for forecasting service life of reinforced concrete bridges is proposed, based on evaluation of time required for carbonization of protective cover taking into account various factors – temperature, environmental humidity, concentration of carbon dioxide in the atmosphere, strength characteristics of the concrete. **Practical importance:** The model is applicable for forecasting lifespan at design stage.

Reinforced concrete, lifespan, carbonization, Fick's first diffusion law, concentration of carbon dioxide in the atmosphere.

На автомобильных дорогах России в настоящее время эксплуатируется большое количество мостовых сооружений разных лет постройки и разного конструктивного исполнения. Большая часть действующих мостовых сооружений малых и средних пролетов сооружена с использованием железобетонных пролетных строений и опор. Практика эксплуатации показала, что со временем в них возникают и развиваются дефекты и повреждения, снижающие долговечность конструкций. Существовавшее ранее мнение о высокой долговечности железобетонных конструкций оказалось ошибочным. Средний срок службы находится в пределах 35–45 лет, что не согласуется с проектным сроком службы 100 лет.

Наиболее опасным и весьма распространенным процессом, ведущим к депассивации защитного слоя железобетонных элементов мостов с последующей стремительной коррозией арматуры, снижающим надежность и долговечность транспортных сооружений, является карбонизация бетона защитного слоя.

Карбонизация бетона – процесс проникновения углекислого газа в поры бетона с дальнейшим взаимодействием с цементным камнем в присутствии влаги, что приводит к снижению щелочности бетона и утрате защитных свойств по отношению к арматуре:



В этих условиях особо важно создать адекватные модели прогноза сроков карбонизации с учетом различных факторов, влияющих на протекание этого процесса.

Цель исследования

Эта работа посвящена созданию модели срока карбонизации бетона защитного слоя с учетом различных влияющих факторов, а также проверке ее адекватности.

Модели прогноза срока карбонизации защитного слоя железобетонных элементов

В основе описания процесса карбонизации лежит дифференциальное уравнение первого закона аналитической теории диффузии, закона А. Фика. Решение этого уравнения с заданными начальными условиями позволяет получить выражение для определения времени карбонизации защитного слоя бетона. Авторы выполнили сравнительный анализ существующих моделей карбонизации [1–4, 6, 9]. Исходные параметры были одинаковыми для всех моделей (табл. 1, рис. 1).

Необходимо заметить, что модели карбонизации, приведенные выше, рассматривают концентрацию углекислого газа в атмосфере, а также температуру и влажность окружающей среды как константы, неизменные во времени.

Рекомендуемая модель карбонизации бетона защитного слоя

Если мы рассмотрим карбонизацию как устойчивый постоянный процесс, описанный первым законом А. Фика, где концентрация CO_2 , температура и влажность окружающей среды являются функциями времени, то модифицированная модель глубины прохождения фронта карбонизации для сооружения, введенного в эксплуатацию в 2015 г., может быть записана следующим образом [10]:

$$x_{carb}(t) = \sqrt{\frac{2D(t)}{a} \int_{2015}^t f_T(t) \cdot f_W(t) \cdot k_{site} \cdot C_{\text{CO}_2}(t) dt} \times \left(\frac{t_0}{t - 2014} \right)^{n_m}$$

при $t \geq 2015$,

где t – время эксплуатации в годах, начиная с 2015 г.; t_0 – 1 год; n_m – возрастной фактор

ТАБЛИЦА 1. Сравнение моделей карбонизации

Модель	Глубина карбонизации, см (время эксплуатации 50 лет), коэффициент диффузии $D_{eff} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$	Источник	Обозначение кривой на рис. 1
$x_c = c_{env} \cdot c_{air} \cdot a \cdot f_{cm}^b \cdot \sqrt{t}$	0,92	[9]	■ ■ ■
$\bar{X} = (150 K d / f_c) \sqrt{t}$	2,12	[6]	▲ ▲ ▲
$x = \sqrt{521 t} \exp(-0,05 f_{c,28})$	2,81	[4]	● ● ●
$x = \left(\frac{1}{2,1 \sqrt{f_{c,28}}} - 0,06 \sqrt{365 t} \right)$	0,80	[4]	▣ ▣ ▣
$X_c = \sqrt{\frac{2 K_1 \cdot K_2 \cdot D_{eff} \cdot C_s}{a}} \cdot \sqrt{t} \cdot \left(\frac{t_o}{t} \right)^n$	2,44	[9]	▲ ▲ ▲
$T_{к6} = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot m_4 \cdot \frac{a}{K}$	2,14	[3]	⊖ ⊖ ⊖
$X = \sqrt{\frac{2 D_{эф} \cdot C \cdot t}{m_0}}$	1,50	[1, 2]	× × ×

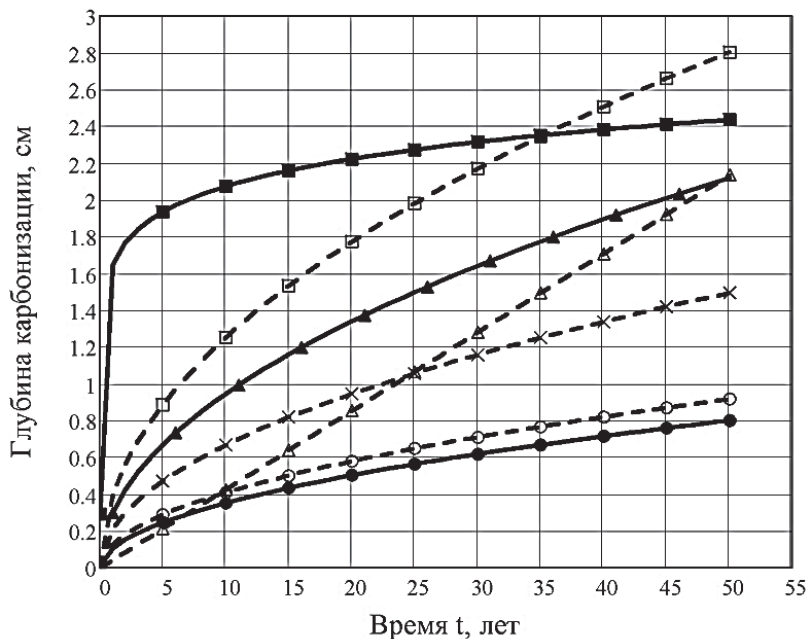


Рис. 1. График кривых карбонизации. Обозначения см. в табл. 1

для микроклиматических условий, связанных с частотой циклов увлажнения/просушки и принимаемый в зависимости от степени за-

щиты поверхности; k_{site} – коэффициент, учитывающий повышенное содержание углекислого газа в мегаполисах и больших городах;

$C_{\text{CO}_2}(t)$ – функция изменения концентрации CO_2 во времени, 10^{-3} кг/м³, (1 ppm = $0,0019 \times 10^{-3}$ кг/м³); $D(t)$ – коэффициент диффузии углекислого газа в бетоне как функция времени, см²/с, определяемый по формуле

$$D(t) = D_1(t - 2014)^{-n_d},$$

где D_1 – начальный коэффициент диффузии, см²/с; n_d – коэффициент, принимаемый в зависимости от водоцементного отношения бетона;

a – количество CO_2 , необходимое для превращения всех способных карбонизироваться продуктов гидратации, кг/м³, определяемое по зависимости

$$a = 0,75 \cdot \text{CaO} \cdot C_e \cdot a_H \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CaO}}},$$

где CaO – содержание оксида кальция в цементе (~64–65 %); C_e – количество цемента, кг/м³; M_{CO_2} – молярная масса углекислого газа (44 г/моль); M_{CaO} – молярная масса оксида кальция (56 г/моль); a_H – степень гидратации цемента.

Начальный коэффициент диффузии

Начальный коэффициент диффузии D_1 в зависимости от цилиндрической прочности бетона приводится в документе [7]:

$$D_1 = 10^{-7} \cdot 10^{-0,025 \cdot f_{ck}},$$

где f_{ck} – прочность на сжатие (цилиндрическая) бетона, МПа, по истечении 28 суток.

В исследовании мы использовали данные, приведенные в [5], где по результатам экспериментальных исследований определены коэффициенты диффузии углекислого газа в бетоне в зависимости от класса бетона (рис. 2).

Влияние температуры и влажности на скорость карбонизации

Более высокая температура окружающей среды приводит к увеличению коэффициента диффузии, что ускоряет карбонизацию. Влияние температуры на коэффициент диффузии моделируется с помощью закона Аррениуса и

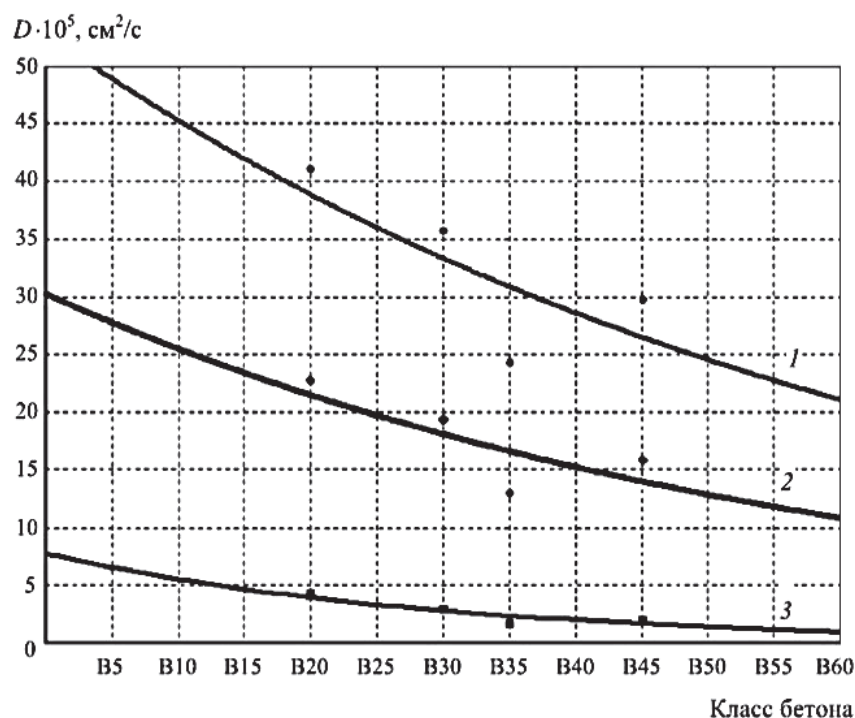


Рис. 2. Зависимости коэффициента диффузии от класса бетона по [5]

вместе с изменением температуры во времени определяется зависимостью

$$f_T(t) = e^{(E/R)((1/293,15)-(1/(273,15+T(t))))},$$

где $T(t)$ – температура, °С, как функция времени; E – энергия активации диффузионного процесса (40 кДж/моль); R – постоянная Больцмана ($8,314 \cdot 10^{-3}$ кДж/моль·К). Повышение температуры на 2 °С увеличивает коэффициент диффузии на 12 %.

В документе [8] предлагается следующая зависимость для учета влияния влажности на коэффициент диффузии:

$$f_W(t) = \left(\frac{1 - \left(\frac{W(t)}{100} \right)^{f_e}}{1 - \left(\frac{W_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right)^{g_e},$$

где $W(t)$ – влажность, %, как функция времени; W_{ref} – базовая влажность, составляет 65 %; f_e – константа, равная 5,0; g_e – константа, равная 2,5.

Моделирование изменения температуры и влажности во времени

Чтобы учитывать сезонные колебания температуры и влажности, предположим, что их функция в зависимости от времени подчиняется синусоидальному закону (рис. 3):

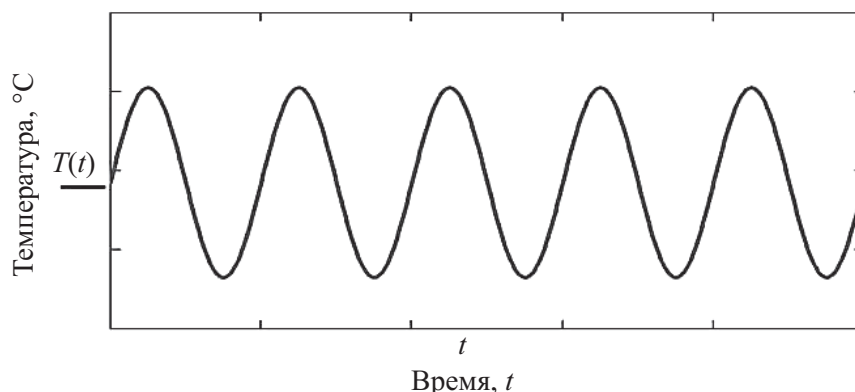


Рис. 3. Изменение температуры по синусоидальному закону

$$f_{T,W}(t) = \frac{\varphi_{\max} + \varphi_{\min}}{2} + \frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}{2} \sin(2\pi t),$$

где $\varphi_{\max}$, $\varphi_{\min}$ – максимальное и минимальное среднее значение параметра (температуры, влажности), соответственно; t – время, годы.

Модель концентрации углекислого газа в атмосфере

Стремительное нелинейное увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере, связанное с развитием жизнедеятельности человека (рис. 4), изменение климата ускоряют процесс карбонизации, а следовательно, износ железобетонных элементов мостов, снижают безопасность, работоспособность и долговечность транспортных сооружений. В связи с этим необходимо создать модель карбонизации бетона защитного слоя, в которой можно будет учитывать изменения концентрации углекислого газа и климатических условий во времени. Это особо важная задача.

Будущее изменение концентрации углекислого газа в атмосфере прогнозируется согласно нескольким сценариям в зависимости от изменений в экономике, энергетике, технологиях, сельском хозяйстве и т. д. Межправительственная группа экспертов по изменению климата (IPCC) в докладах указывает на стремительное увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере с 280 ppm в 1750 г. до 380 ppm в 2005 г. с дальнейшим ростом трен-

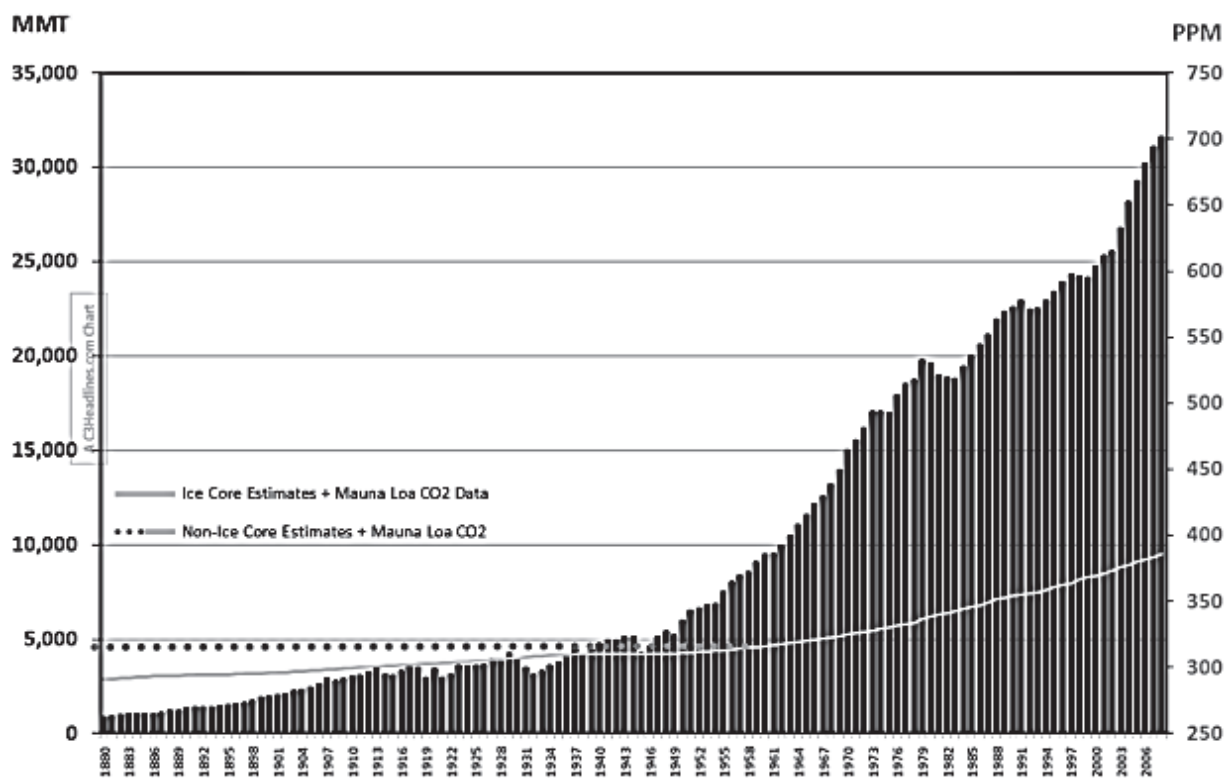
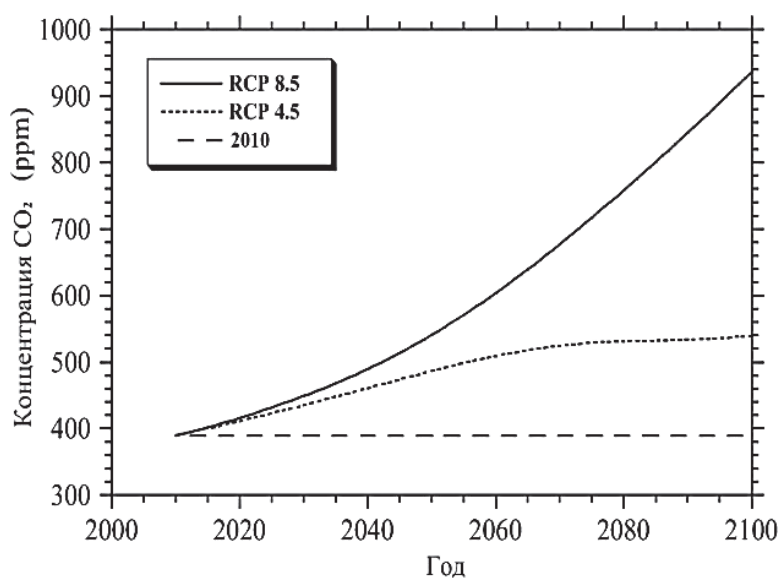
Рис. 4. График изменения концентрации CO₂ в атмосфере с 1880 по 2006 г.

Рис. 5. Сценарии увеличения концентрации углекислого газа в атмосфере

да. По результатам своих исследований они предложили три наиболее возможных сце-

нария развития (representative concentration pathways, RCP). Пессимистичный сценарий

развития (RCP 8.5) предполагает стремительное увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере до 1000 ppm в конце века из-за интенсивного развития глобальной экономики и роста популяции людей. Согласно другому сценарию (RCP 4.5), увеличение концентрации будет умеренным с замедлением тренда к концу столетия. Третий сценарий оптимистичен, он предполагает, что концен-

трация углекислого газа останется неизменной на уровне 389 ppm 2010 г. (рис. 5).

В модели карбонизации величина $C_{CO_2}(t)$ принимается согласно этим сценариям изменения концентрации углекислого газа во времени.

Для оценки уровня влияния исходных параметров модели проведены количественные расчеты, результаты приведены на рис. 6–9.

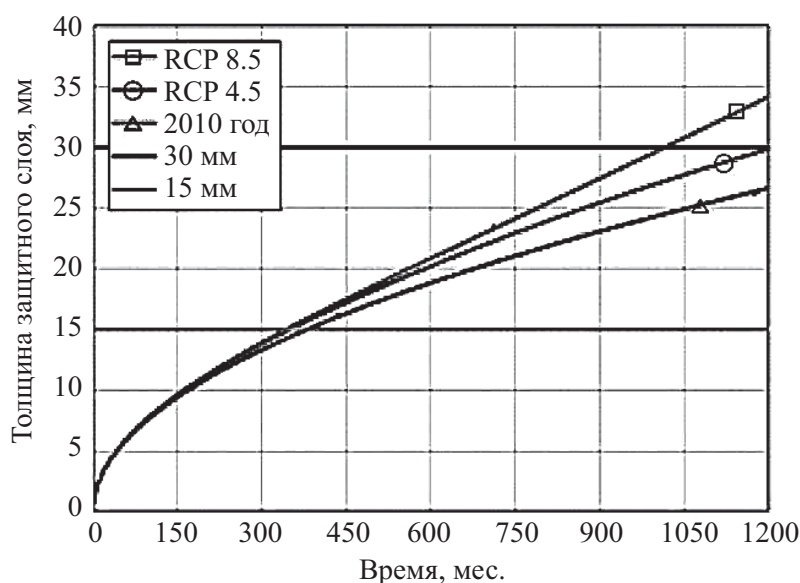


Рис. 6. Кривые карбонизации бетона защитного слоя для разных сценариев изменения концентрации CO_2 в атмосфере, месяцев

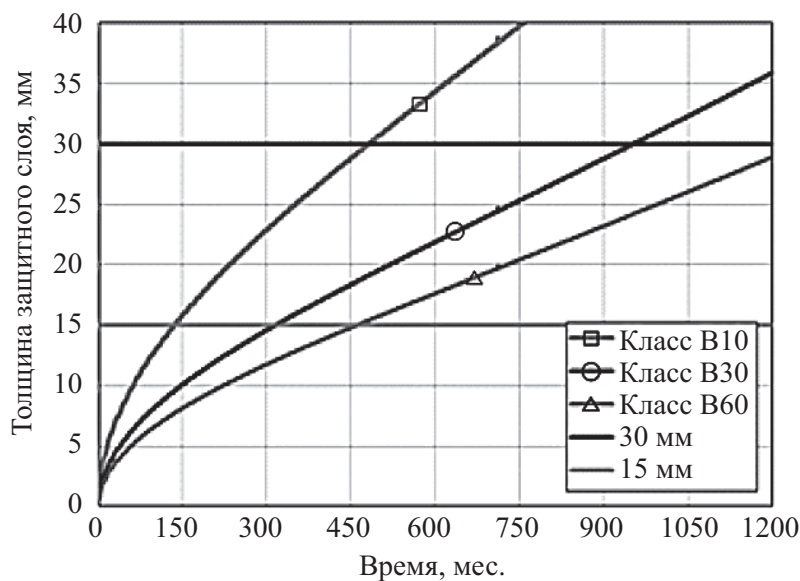


Рис. 7. Кривые карбонизации защитного слоя с разным классом бетона, месяцев

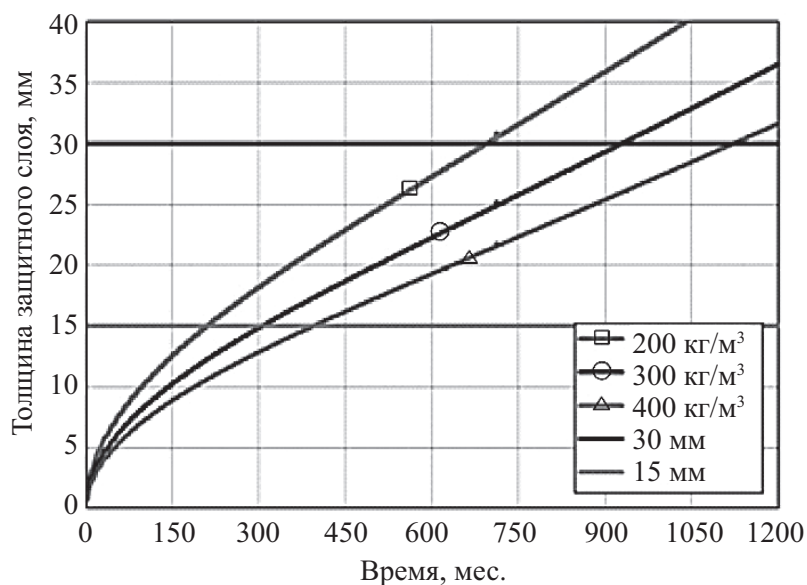


Рис. 8. Кривые карбонизации защитного слоя с разным содержанием цемента в бетоне, месяцев

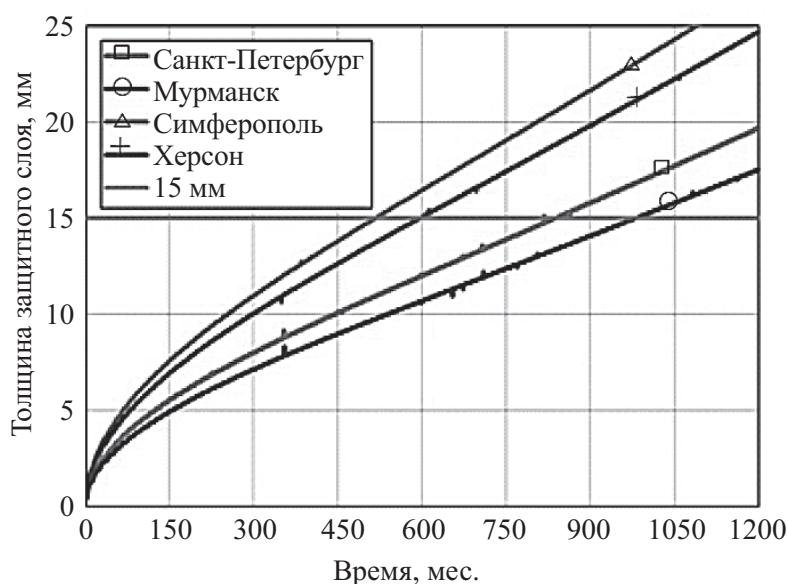


Рис. 9. Кривые карбонизации защитного слоя с разными климатическими условиями, месяцев

Апробация теоретической модели карбонизации бетона

Для практической оценки результатов теоретических исследований карбонизации бетона мостовых конструкций, приведенных выше, в августе 2015 г. в рамках обследования железобетонного путепровода, введенного в эксплуатацию в 1964 г., расположенного на ав-

томобильной дороге крупного горнодобывающего и перерабатывающего производственного объединения на севере страны, выполнены соответствующие инструментальные измерения. Результаты замера глубины карбонизации балки Б7 (пролет 7–8) (рис. 10) и балки Б5 (пролет 1–2) составили 10–16 мм.

Исходные данные и результаты расчета по модели приведены в табл. 2 и на рис. 11.

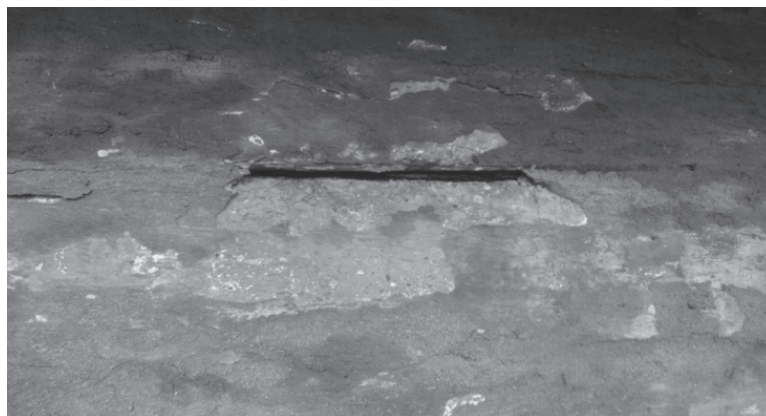


Рис. 10. Определение степени карбонизации бетона ребра балки Б7 пролета 7–8

ТАБЛИЦА 2. Параметры модели

Исходные параметры расчета	Балка Б7 (пролет 7–8)	Балка Б5 (пролет 1–2)
Температура региона (средняя минимальная/ максимальная), °С	–12,6/13,8	
Влажность региона (средняя минимальная/ максимальная), %	72/85	
Прочность бетона с обеспеченностью 0,95 (метод упругого отскока), МПа	28	35
Концентрация углекислого газа в атмосфере, ppm	390	390

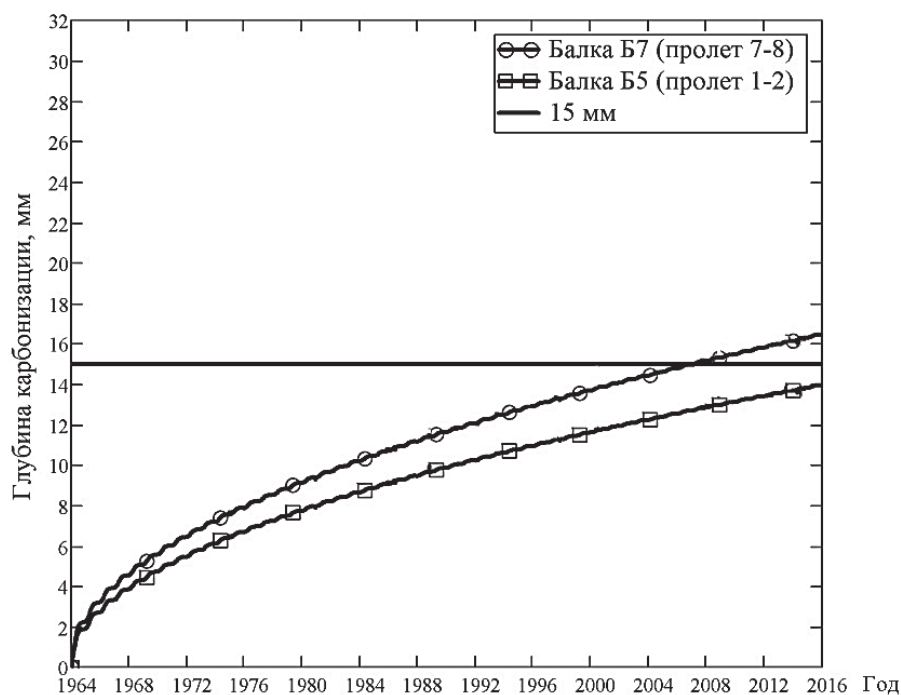


Рис. 11. Кривые карбонизации бетона защитного слоя балки Б5 и Б7

По результатам расчета глубина карбонизации составила: для балки Б7 (пролет 7–8) 16,4 мм; для балки Б5 (пролет 1–2) 13,8 мм, что подтверждает адекватность предложенной модели.

Выводы

По результатам анализа можно сделать вывод, что карбонизация бетона опасна для железобетонных элементов с толщиной защитного слоя 1–2 см, которая зачастую наблюдается у конструкций, изготовленных с нарушением технического регламента и требований строительных норм, а также у типовых проектов 1950–1960-х годов, струнотонных балок. Среди основных факторов, влияющих на скорость карбонизации, необходимо выделить свойства бетона (класс бетона по прочности, водоцементное отношение, содержание цемента), температуру и влажность окружающей среды, а также содержание углекислого газа в атмосфере. С понижением водоцементного отношения, температуры окружающей среды и с повышением класса бетона, содержания цемента, влажности атмосферы скорость карбонизации падает.

Предложенная модель карбонизации бетона учитывает изменение во времени температуры и влажности окружающей среды, концентрации углекислого газа, что делает ее более точной. Сравнение модели с натурным измерением карбонизации бетона защитного слоя показало ее достоверность и адекватность, что позволяет рекомендовать ее для практического применения.

Библиографический список

1. Алексеев С. Н. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев, Ф. М. Иванов, С. Модры, П. Шисль. – М. : Стройиздат, 1990. – 320 с.
2. ГОСТ Р 52804-2007. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. – М. : Стандартинформ, 2008.
3. Методика расчетного прогнозирования срока службы железобетонных пролетных строений автомобильных мостов (утв. 18.04.2001 г. распоряжением № 79-р Министерства транспорта РФ).
4. Пухонто Л. М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений: (силосов, бункеров, резервуаров, водонапорных башен, подпорных стен) : моногр. / Л. М. Пухонто. – М. : АСВ, 2004. – 424 с.
5. Шмелев Г. Д. Диффузия углекислого газа в бетон строительных конструкций и оценка коэффициента диффузии интервальным методом / Г. Д. Шмелев, С. А. Варюшкин // *Вопр. современной науки и практики*. – 2013. – № 3 (47). – С. 315–320.
6. Bob C. Probabilistic assesment of reinforcement corrosion in existing structures / C. Bob // *Proc. Int. Conf. held at the Univ. – Dundee, Scotland, UK, 1996*. – P. 17–28.
7. DuraInt Report. – Task 4. Deterioration Models with Interaction.
8. Fib. Model code for service life design. – Lausanne: Fib Bul., 2006. – N 34.
9. Modelling of Degradation. DuraCrete. – Probabilistic Performance based Durability design of Concrete Structures. Doc. BE-1347/R4-5, Dec. 1998.
10. Peng L. Climate change and corrosion damage risks for reinforced concrete infrastructure in China / L. Peng, M. G. Stewart // *Centre for Infrastructure Performance and Reliability, The Univ. Newcastle, New South Wales 2308, Australia*. Received 27 Feb. 2013 ; fin. version received 8 July 2013 ; accepted 2 Oct. 2013.

References

1. Alekseyev S. N., Ivanov F. M., Modry S. & Shisl P. *Dolgovechnost zhelezobetona v agressivnykh sredakh* [Longevity of Reinforced Concrete in Corrosive Environments]. Moscow, Stroyizdat, 1990. 320 p.
2. GOST R 52804-2007. Protection of Concrete and Reinforced Concrete Elements from Corrosion. Moscow, Standartinform, 2008.
3. A Method for Calculation Forecast of Service Lifetime of Motor Bridge Superstructures (approved by order of the Transport Ministry of the Russian Federation No. 79-r on April 18, 2001).

4. Pukhonto L.M. *Dolgovechnost zhelezobetonnykh konstruktsey inzhenernykh sooruzheniy (silosov, bunkerov, rezervuarov, vodonapornykh bashen, podpornykh sten)*, monografiya [Longevity of Reinforced-Concrete Elements of Engineering Structures (silo towers, bunkers, storage tanks, water towers, supporting walls)], monogr. Moscow, ASV, 2004. 424 p.
5. Shmelev G.D. & Varyushkin S.A. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki – Questions of Modern Sci. and Practice*, 2013, no. 3 (47), pp. 315-320.
6. Bob C. Probabilistic assesment of reinforcement corrosion in existing structures. *Proc. Int. Conf. held at the Univ. Dundee, Scotland, UK*, 1996. Pp. 17-28.
7. DuraInt Report. Task 4. Deterioration Models with Interaction.
8. Fib. Model code for service life design. Lausanne, Fib Bul., 2006, no. 34.
9. Modelling of Degradation. DuraCrete. Probabilistic Performance based Durability design of Concrete Structures. Doc. BE-1347/R4-5, Dec. 1998.
10. Peng L. & Stewart M.G. Climate change and corrosion damage risks for reinforced concrete infrastructure in China // Centre for Infrastructure Performance and Reliability, The Univ. Newcastle, New South Wales 2308, Australia. Received 27 Feb. 2013; final version received 8 July 2013; accepted 2 Oct. 2013.

КАРАПЕТОВ Эдуард Степанович – канд. тех. наук, профессор; *ШЕСТОВИЦКИЙ Дмитрий Александрович – ассистент, kmost@pgups.edu (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.463.32

И. Г. Киселев, В. В. Галов, С. Б. Комиссаров**ПЕРСПЕКТИВЫ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОНАГРЕВА
ВЯЗКИХ ГРУЗОВ ПРИ СЛИВЕ ИЗ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЦИСТЕРН**

Дата поступления: 14.01.2016

Решение о публикации: 17.02.2016

Цель: Решить проблемы, возникающие при сливе вязких грузов из железнодорожных цистерн с электронагревом. Показать возможность совершенствования подвижного состава данного типа. **Методы:** При решении задачи теплопроводности для перевозимого груза применен метод конечных элементов. **Результаты:** Проанализированы конструкция и особенности выгрузки для четырехосной железнодорожной цистерны модели 15-1532, предназначенной для перевозки жидкого каменноугольного пека, и моделей 15-1480 и 15-1482 – для перевозки жидкой серы. Приведена информация об отрицательном влиянии грузов и их паров на организм человека, что говорит о необходимости сокращения времени контакта персонала с грузом. Поставлена задача теплопроводности, приведено её решение для определения поля температур в котле железнодорожной цистерны при электронагреве груза. Проанализирована конструкция вагонов-цистерн. На основании этого анализа рассчитано температурное поле наиболее неблагоприятного конструктивного элемента котла вагона-цистерны при сливе разогреваемого груза. На основании полученных градиентов температур спрогнозировано поведение оболочки котла вагона-цистерны в части появления остаточных деформаций расчетного элемента. Выявлена проблема неравномерного нагрева вязкого груза для существующих цистерн: перегрев нижней части котла при недостаточном нагреве верхних слоев груза. Предложено техническое решение для перераспределения тепловых нагрузок на котел цистерны, позволяющие сократить время слива груза из цистерны и увеличить срок службы подвижного состава. Сделан вывод о необходимости модернизации конструкции вагонов-цистерн для перевозки вязких и загустевающих грузов. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут быть использованы при конструировании новых моделей вагонов-цистерн с электронагревом груза, а также для модернизации систем электронагрева имеющегося парка подвижного состава.

Вагон-цистерна, электрические нагреватели, температурное поле.

Igor G. Kiselev, Dr. Sci. (Eng.), professor, kteploteh@pgups.ru; **Vladimir V. Galov**, Cand. Sci. (Eng.), assistant professor, v_galov@hotmail.com; ***Sergey B. Komissarov**, post-graduate student, s.b.komissarov@gmail.com (Petersburg State Transport University) PERSPECTIVES FOR MODERNISATION OF ELECTRICAL HEATING OF VISCOUS CARGOES FOR UNLOADING CISTERN CARS

Objective: To solve problems appearing when unloading viscous cargo from cistern cars equipped with electrical heating. To demonstrate possibility of improving rolling stock of this type. **Methods:** Finite-elements method is applied to solving heat conductivity problems for the transported cargo. **Results:** Design and unloading peculiarities were analysed for model 15-1532 four-axle cistern car (designed for transportation of liquid colar-tar asphalt), and for models 15-1480 and 15-1482 (for transportation of liquid sulphur). Information concerning negative influence of these cargoes and their fumes on human organism is provided, which means that the time of contact between personnel and cargo should be reduced. Heat conductivity problem is set, its solution for determining the range of temperatures in the cauldron of the cistern car during electrical heating is provided. Design of cistern cars is analysed. On the

basis of this analysis, temperature field for the most unfavourable design element of the cauldron of cistern car when unloading heated cargo is established. On the basis of thermal gradients thus obtained, behaviour of the cover of a cistern car's cauldron is forecast as regards appearance of permanent deformations of the calculated element. The problem of uneven heating of viscous cargo in existing cistern cars was identified, as bottom part of the cauldron is overheated, and upper layers of the cargo are subject to insufficient heating. A technical solution for redistribution of thermal strain on cistern's cauldron is proposed, allowing to cut the time of unloading cargo from cistern and to increase service life of rolling stock. The conclusion of the need for modernisation of cistern cars design for transportation of viscous and thickening cargoes is reached. **Practical importance:** Results of the study can be applied to designing new models of cistern cars with electrical heating of cargo, as well as for modernisation of electrical heating systems of existing rolling stock.

Cistern car, electrical heaters, temperature field.

В ежедневной практике предприятий, использующих затвердевающие грузы, доставляемые в вагонах-цистернах и требующие предварительного разогрева перед сливом, актуальным остается вопрос ускорения их выгрузки. При использовании подвижного состава с электронагревом груза выявлен ряд недостатков. Решение данного вопроса позволит снизить затраты, связанные с простоем вагонов, повысить оборот вагонов, приумножить количество используемого груза.

Подвижной состав для перевозки загустевających грузов

Среди самых распространенных цистерн с электрическим подогревом для перевозки вязких и загустевających грузов – модели 15-1532, 15-1480 и 15-1482.

Четырехосная железнодорожная цистерна модели 15-1532 предназначена для перевозки жидкого каменноугольного пека при температуре окружающего воздуха до минус 50 °С. Пек должен сохраняться в жидком состоянии при температуре налива 250 °С и окружающей среды минус 30 °С не менее пяти суток.

Груз разогревается электроподогревателями мощностью 90 кВт. Слив происходит при температуре 140–180 °С при скорости разогрева около 2,4 °С в час.

Жидкий пек выделяет пары, которые, соединяясь с воздухом, образуют горючие смеси, способные легко воспламеняться от любой искры, нагретых поверхностей и др. Кроме того, пары пека могут вызвать отравление. Попадая на кожу человека, жидкий пек может вызвать ожоги. Отравления и ожоги может вызвать и пыль пека. При солнечном свете токсичные действия пека проявляются сильнее, чем в темноте [4].

Для перевозки жидкой серы служат четырехосные цистерны моделей 15-1480 и 15-1482. Они рассчитаны для работы при температуре окружающего воздуха до минус 50 °С. Сера должна сохраняться в жидком состоянии при температуре налива 150 °С и окружающей среды – минус 25 °С не менее четырех суток, летом – не менее шести суток.

Груз разогревается электроподогревателями мощностью 90 кВт. Слив происходит при температуре 120–125 °С при скорости разогрева около 3,2 °С в час.

Жидкая сера растворяет в себе углеводороды и сероводород, которые образуются при получении серы. При сливе, наливке, хранении жидкой серы выделяются пары серы, органических веществ, керосина, сероводорода и т. д., способные образовать с воздухом горючие смеси, которые могут воспламеняться от открытого пламени, нагретых поверхностей, от любой искры, а также при возгорании пиррофорных соединений. Кроме того, пары, вы-

деляющиеся из жидкой серы, могут вызывать отравление, а сама жидкая сера, попадая на кожу человека, – термические ожоги [4].

Время слива указанных грузов, как и время их нежелательного контакта с персоналом, зависит от интенсивности разогрева до температуры, при которой возможен их слив. С другой стороны, превышение допустимых пределов температуры приводит к потере устойчивости оболочки котла и к выходу из строя вагонов-цистерн. Таким образом, для решения этих проблем необходимо рассчитать процесс разогрева, построить температурные поля котла вагонов-цистерн и разогреваемого груза, предложить новые инженерные решения для совершенствования систем разогрева вязких грузов при сливе из железнодорожных цистерн.

Решение задачи теплопроводности для перевозимого груза

Разогрев загустевающего груза в железнодорожной цистерне характеризуется тепло-

обменом в условиях естественной конвекции. Процесс теплообмена в этом случае сводится к решению задачи теплопроводности с эквивалентным коэффициентом теплопроводности. Решение задачи теплопроводности заключается в определении поля температур в котле железнодорожной цистерны при разогреве груза. С точки зрения зависимости температуры от времени задача является нестационарной [2].

Разогрев груза в железнодорожной цистерне определяет полярную постановку задачи. В качестве расчетной области выбрана половина поперечного сечения средней части котла цистерны (рис. 1). Расчет процесса разогрева в этом случае сводится к решению параболического дифференциального уравнения в частных производных

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda_{\text{экв}} \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\lambda_{\text{экв}}}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\lambda_{\text{экв}} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right].$$

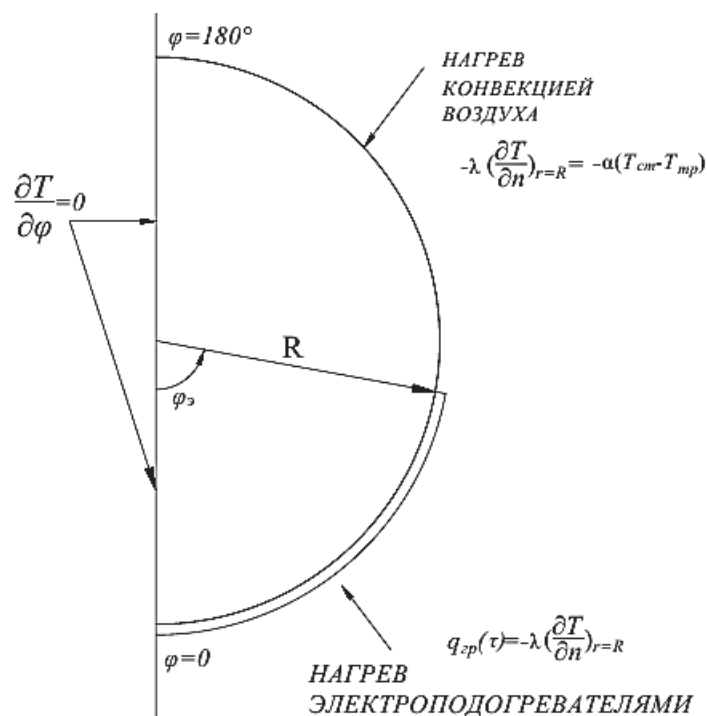


Рис. 1. К постановке краевой задачи теплопроводности расчетная область железнодорожной цистерны со встроенным электронагревом

Уравнение имеет бесчисленное множество решений. Для получения единственного решения конкретизирована задача теплопроводности при заданных условиях однозначности.

Для систем разогрева встроенными электроподогревателями снаружи котла цистерны начальные условия задаются выражением

$$T(r, \varphi) = T_0, \quad 0 \leq r \leq R, \quad 0 \leq \varphi \leq 180^\circ.$$

Граничные условия определяются системами выражений, характеризующих передачу теплоты в разных зонах котла цистерны (рис. 1):

$$q_{\text{гр}}(\tau) = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right), \quad r = R, \quad 0 \leq \varphi \leq \varphi_3;$$

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = \alpha(T_{\text{н}} - T_{\text{гр}}), \quad r = R, \quad \varphi_3 \leq \varphi \leq 180^\circ.$$

Результатом решения задачи для существующей цистерны стало температурное поле (рис. 2а), характеризующееся перегревом нижней части котла при недостаточном нагреве верхних слоев груза.

В качестве решения выявленной проблемы предложено создать технические устройства, увеличивающие скорость движения воздуха вокруг котла цистерны, что приводит к плавному распределению температур по поверхности котла и создает отток излишней теплоты с днища котла цистерны (рис. 2б).

Данный метод уже используется в промышленности и служит в основном для предотвращения перегрева отдельных участков конструкции из-за неоднородности тепловой изоляции, местных подводов тепла по металлическим деталям у газотурбинных установок [3].

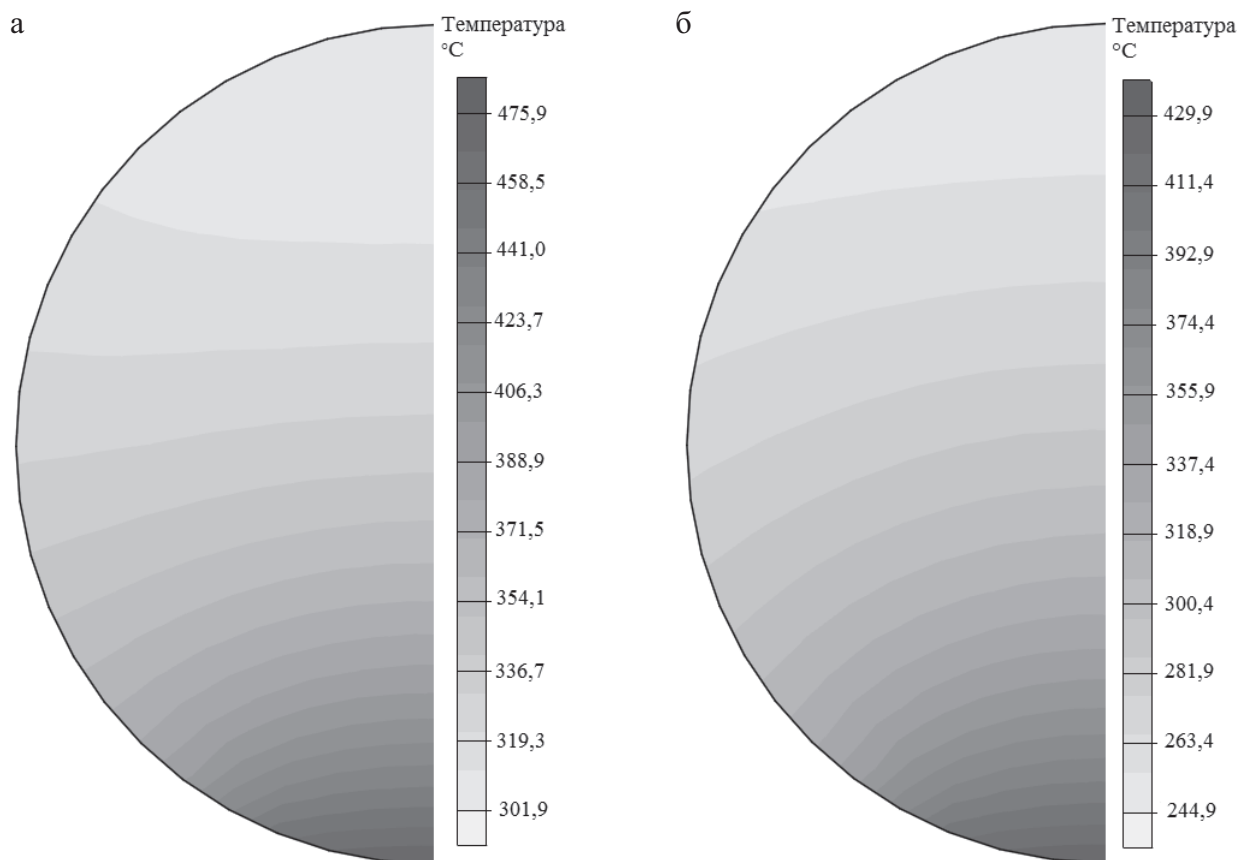


Рис. 2. Температурное поле $T(x, y, \tau)$ при $\tau = 6$ ч с естественной (а) и с принудительной (б) конвекцией воздуха

Расчёт прогиба неблагоприятного элемента котла вагона-цистерны

Анализ конструкции вагонов-цистерн с электронагревом указал на неравномерное распределение нагревателей под котлом, что может привести к недогреву части груза, находящегося в этой области, и, соответственно, к увеличению времени выгрузки.

На основании проведенного анализа рассчитано температурное поле наиболее неблагоприятного конструктивного элемента котла вагона-цистерны при сливе разогреваемого груза (рис. 3). По итогам расчета выявлен

недостаточный нагрев элемента котла цистерны с одной и значительный перегрев данного элемента – с другой стороны (рис. 4).

Вагоны-цистерны для жидкого пека и серы имеют грузоподъемность порядка 60 т, что говорит о серьезных нагрузках на котел вагона цистерны.

Повышенные температуры наряду с воздействием большой массы груза приводят к появлению прогибов оболочки котла цистерн, когда невозможно дальнейшее использование вагона.

С ростом температуры уменьшается значение предельных напряжений, под воздействием которых наблюдается переход упру-

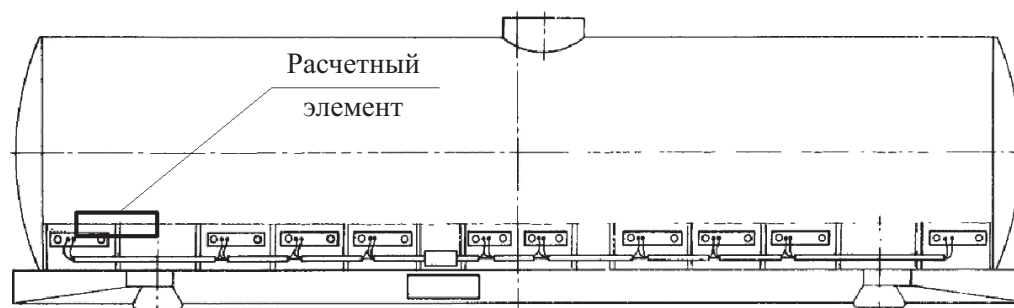


Рис. 3. Оборудование электронагрева цистерны. Расчетный элемент котла цистерны

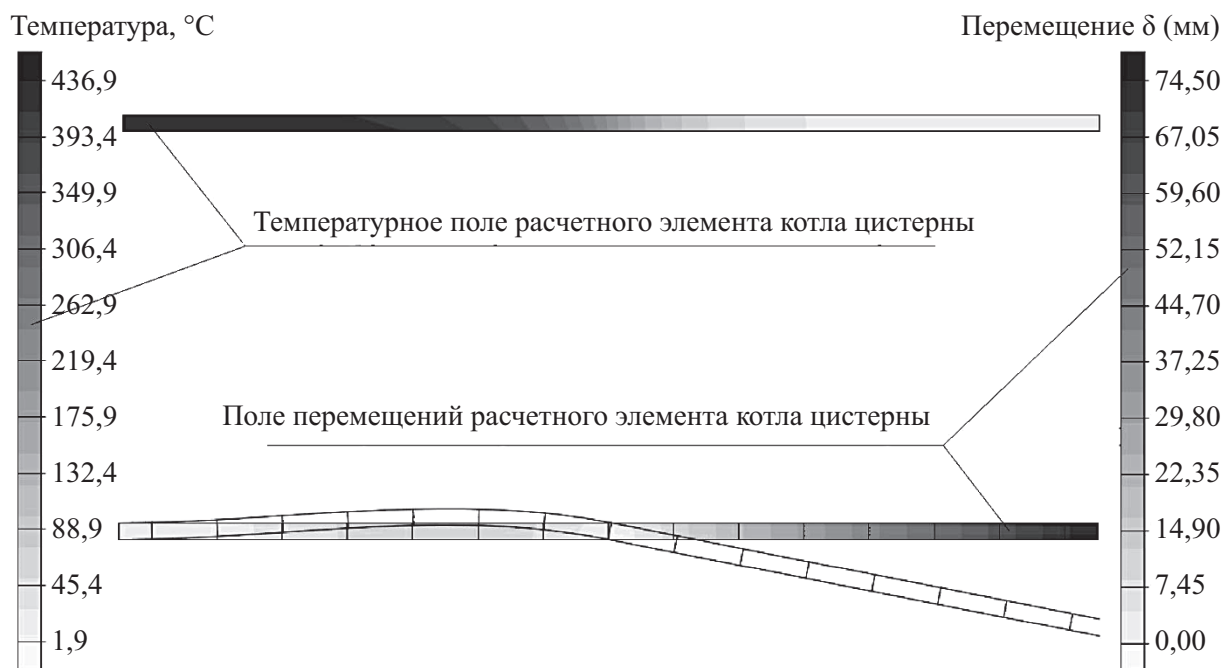


Рис. 4. Температурное поле расчетного элемента котла цистерны.
Поле перемещений расчетного элемента котла цистерны

гого состояния металла в пластичное (предел текучести), т. е. снижается сопротивление пластической деформации.

На основании полученных температурных напряжений спрогнозировано поведение котла вагона-цистерны в части появления остаточных деформаций расчетного элемента (рис. 4).

Увеличенная величина прогиба в расчете согласно существующим методикам требует списания вагона-цистерны по состоянию котла [1].

Для увеличения срока службы вагонов-цистерн требуется перераспределить электроподогреватели, чтобы вязкий груз нагревался равномерно и снижалось температурное напряжение в оболочке котла.

Заключение

Исходя из изложенного, можно сделать вывод, что конструкция вагонов-цистерн для перевозки вязких и загустевающих грузов с электронагревом требует модернизации. Модернизация системы разогрева повлечет за собой ускорение выгрузки, а также увеличит срок службы подвижного состава.

Библиографический список

1. Битюцкий А. А. Методика определения объема ремонта котлов при восстановлении ресурса вагонов-цистерн для перевозки жидкого пека / А. А. Битюцкий, К. И. Рыжов // Совершенствование методов испытаний и диагностики грузовых вагонов: сб. научных трудов. Вып. 2 ; под ред. А. А. Битюцкого ; Инженерный центр вагоностроения. – СПб. : ОМ-Пресс, 2007. – С. 90–100.

2. Галов В. В. Расчет процессов разогрева затвердевающих грузов при сливе из железнодорожной цистерны : методические указания к расчетно-графическим работам по дисциплине «Источники и системы теплоснабжения промышленных предприятий» / сост. В. В. Галов. – СПб. : ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2014. – 14 с.

3. Иванов В. А. Эксплуатация энергетического оборудования газопроводов Западной Сибири / В. А. Иванов, Г. В. Крылов, Л. Г. Рафиков. – М. : Недра, 1987. – 143 с.

4. Специализированные цистерны для перевозки опасных грузов : справ. пособие. – М. : МПС РФ ; Изд-во стандартов, 1993.

References

1. Bityutskiy A. A. & Ryzhov K. I. *Sovershenstvovaniye metodov ispytaniy i diagnostiki gruzovykh vagonov: sbornik nauchnykh trudov – Improving Methods of Tests and Diagnostics of Wagons: Compiled Scientific Papers*. Is. 2, ed. A. A. Bityutskiy; Wagon Building Engineering Centre. St. Petersburg, OM-Press, 2007. Pp. 90-100.

2. Galov V. V. *Raschet protsessov razogreva zatverdevayushchikh gruzov pri slive iz zeleznodorozhnoy tsisterny* [Calculation of Processes of Heating of Thickening Cargoes for Unloading from Cistern Car]. St. Petersburg, FGBOU VPO PGUPS, 2014. 14 p.

3. Ivanov V. A., Krylov G. V. & Rafikov L. G. *Eksploatatsiya energiticheskogo oborudovaniya gazoprovodov Zapadnoy Sibiri* [Operation of Power Equipment of Western Siberia Gas Pipelines]. Moscow, Nedra, 1987. 143 p.

4. *Spetsializirovannyye tsisterny dlya perevozki opasnykh gruzov* [Specialised Cisterns for Transportation of Dangerous Cargoes]. Moscow, MPS RF, Izdatelstvo standartov, 1993.

КИСЕЛЕВ Игорь Георгиевич – д-р техн. наук, профессор, ktepoteh@pgups.ru; ГАЛОВ Владимир Викторович – канд. техн. наук, доцент, v_galov@hotmail.com; *КОМИССАРОВ Сергей Борисович – аспирант, s.b.komissarov@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 004.056

П. Д. Мыльников**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ КЛЮЧЕЙ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИМО-КАНАЛА**

Дата поступления: 18.01.2016

Решение о публикации: 17.03.2016

Цель: Исследовать модели МИМО-канала с учетом случайных изменений параметров канала за счет многолучевого распространения радиоволн и определить применимость модели канала к задаче формирования ключей для корреспондентов беспроводной сети. **Методы:** Использован метод имитационного моделирования. **Результаты:** Оценены характеристики параметров принимаемого сигнала, распределения вероятностей отсчетов и степень их коррелированности. **Практическая значимость:** Системы на основе МИМО-канала можно использовать для построения системы распределения ключей в подвижных сетях железнодорожного транспорта.

Подвижная радиосвязь, ключ, квантование, многолучевость, МИМО.

Pavel D. Mylnikov, postgraduate student, paul.mylnikov@gmail.com (Petersburg State Transport University) A STUDY INTO CHARACTERISTICS OF KEY FORMING SYSTEM FOR MOBILE RAILWAY TRANSPORT OBJECTS BASED ON EVALUATION OF MIMO CHANNEL PARAMETERS

Objective: To study MIMO channel models based on random variations in the channel parameters due to multi-path propagation of radio waves, and to determine the applicability of the channel model to the task of forming the channel keys in mobile networks. **Method:** The method of simulation modelling was applied. **Results:** Evaluation of performance parameters of the received signal, probability distribution of samples and degree of correlation were established. **Practical significance:** The study established that the system based on model of MIMO channel can be used to build a system of key distribution in mobile networks on railway transport.

Mobile radio, key, quantization, multipath, MIMO.

Железнодорожные инфокоммуникационные системы с каждым годом развиваются все стремительнее, и все более актуальным становится вопрос использования беспроводных сетей для взаимодействия объектов железнодорожной инфраструктуры. Активно внедряются новые технологии в области связи, в частности, технология МИМО. Технология МИМО (Multiple Input Multiple Output – множественного входа и множественного выхода) широко применяется в сетях беспроводного широ-

кополосного доступа IEEE 802.11n (Wi-Fi), IEEE 802.12 (WiMAX) и LTE.

Для защиты информации в таких радиосетях необходимо использовать шифрование, применение которого, в свою очередь, требует обеспечить шифр-ключами базовые станции и подвижные объекты системы связи. Известно много способов распределения ключей [4]. В последнее время исследователей привлекает способ формирования ключей на основе одновременной оценки случайных параме-

тров канала связи [5, 7, 8] и использование этих параметров в качестве сессионного ключа между парой корреспондентов.

Для решения задачи распределения ключей в рамках этого способа рассмотрим систему, состоящую из двух абонентов: базовой станции (БС) и поезда (рис. 1). БС, используя ММО антенну с N антеннами, формирует тест-сигнал в момент времени t . Поезд, находящийся в пределах доступности этой БС, используя свою ММО-антенну с M антеннами, принимает отправленный БС сигнал и в момент времени $t + \Delta t$ отправляет идентичный тест-сигнал.

В силу принципа взаимности обе стороны, БС и поезд, примут примерно одинаковые сигналы:

$$y_T(t) = H(t) \cdot s + \varepsilon_1(t),$$

$$y_{BS}(t) = H(t) \cdot s + \varepsilon_2(t),$$

где H – канальная матрица размерности $M \times N$, каждый элемент которой – гауссовская случайная величина (СВ) с известным математическим ожиданием и дисперсией; s – вектор тест-сигнала; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – комплексные случайные гауссовские вектора шумов наблюдения с нулевым средним; y – наблюдаемый вектор размерности M .

Совокупность квантованных значений принимаемого сигнала $y(t)$ в различные моменты

времени является основой для формирования ключа у корреспондентов.

Если в системе связи присутствует злоумышленник, необходимо обеспечить независимость принимаемого сигнала у злоумышленника и законных абонентов. Данное условие, как показывают исследования, выполняется физическим удалением злоумышленника от законных абонентов более чем на 10 длин волн [7, 8].

Обобщенная модель ММО-канала взаимодействия базовой станции и подвижного объекта

Для распределения ключей между поездом и БС необходимо учитывать, что поезд является подвижным объектом и окружающая ситуация вокруг поезда постоянно меняется. Для этого рассмотрим следующую модель канала, учитывающую различные факторы распространения сигнала [1, 9]:

- число лучей L в многолучевой модели канала;
- интенсивность затухания сигнала β_l в каждом луче l ;
- углы передачи φ_l и приема ψ_l сигнала каждого луча l ;
- задержки каждого луча в канале τ_l ;
- фазовый сдвиг за счет движения мобильных объектов (эффект Доплера) ω_l .

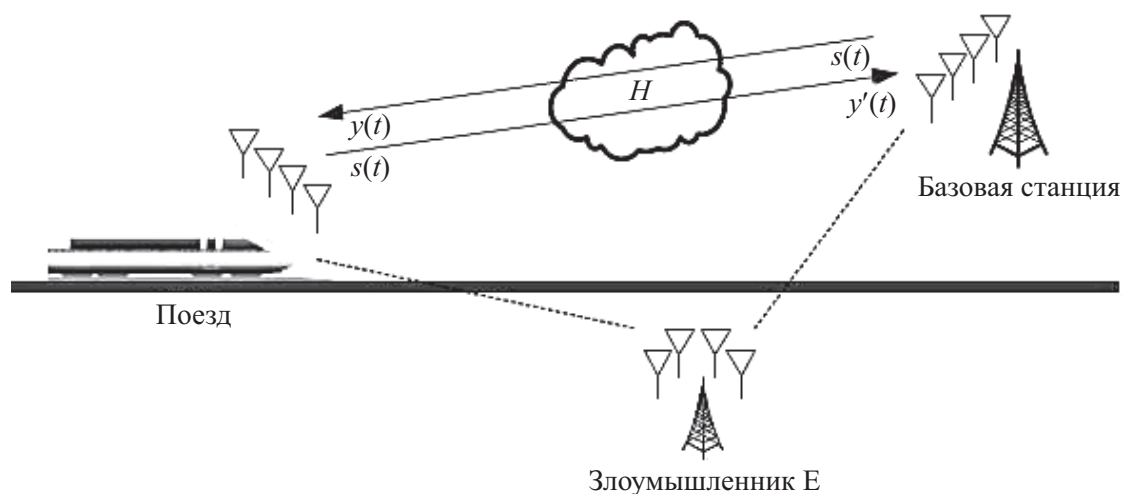


Рис. 1. Модель системы формирования ключей для абонентов сети подвижной радиосвязи железнодорожного транспорта

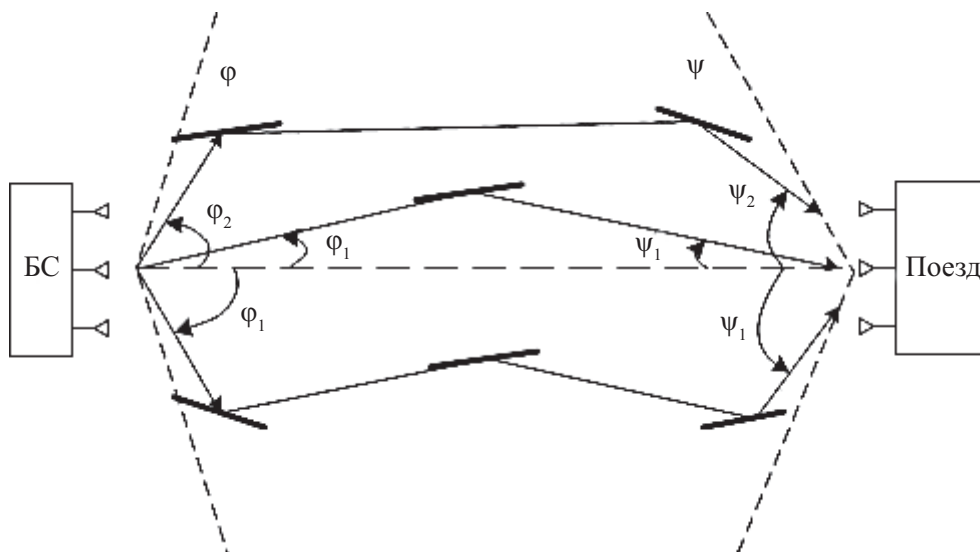


Рис. 2. Обобщенная многолучевая модель канала ММО

Введем полные углы передачи Φ и приема Ψ , в которых будут распределены многолучевые компоненты (рис. 2).

Рассмотрим БС, на которой установлен массив из N антенн, и подвижный объект – поезд, на котором установлен массив из M антенн. Тогда канальная матрица без учета задержек в канале имеет вид

$$H(t) = \sum_{l=1}^L \beta_l a_{R,l} a_{T,l}^T e^{j\omega_l t},$$

где $\beta_l = \alpha_l e^{j\theta_l}$ – затухание сигнала, вызванное отражением от препятствий; $a_{R,l}$ – отклик на приемной стороне, представленный в виде вектора размерностью M ; $a_{T,l}$ – отклик на передающей стороне, представленный в виде вектора размерностью N . Для линейного массива антенн вектора отклика на приеме и передаче имеют вид

$$a_{R,l} = \left[1, e^{-j\Omega_{R,l}} \dots e^{-j(M-1)\Omega_{R,l}} \right]^T;$$

$$a_{T,l} = \left[1, e^{-j\Omega_{T,l}} \dots e^{-j(N-1)\Omega_{T,l}} \right]^T,$$

где $\Omega_{T,l} = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) d_T \sin(\varphi_l)$ – угловая частота

на передаче; $\Omega_{R,l} = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) d_R \sin(\psi_l)$ – угловая

частота на приеме; λ – длина волны несущей частоты, м; d_T, d_R – разнесение элементов в массиве антенн друг от друга на передаче и на приеме, соответственно; φ_l – угол передачи l -го луча в направлении поезда; ψ_l – угол приема l -го луча на стороне поезда.

Оценивание принимаемого сигнала y и составляет основу для формирования ключа.

Оценка параметров принимаемого сигнала на основе моделирования ММО-канала

Описание модели эксперимента

Для моделирования канала зададим следующие параметры, взятые из модели WINNER II, которые описывают железнодорожную систему связи с подвижным объектом [6]:

- массив антенн 8×8 ;
- расстояние между антеннами в массиве $\lambda/2$;
- скорость движения объекта 100 км/ч;
- размах угла приема 8° ;
- размах углов передачи 30° ;
- частота несущей 2,6 ГГц.

Сигнал, наблюдаемый на входе приемного устройства, без учета шумовой составляющей имеет вид

$$y(t) = H(t) \cdot s.$$

Используя программный комплекс MATLAB, сформируем 10 000 канальных матриц H , соответствующих разным моментам времени. Кроме того, рассмотрим влияние многолучевой составляющей в канале путем изменения количества лучей L от 1 до 20.

Далее перейдем от комплексного представления выходного параметра канала y к амплитуде и фазе принимаемого сигнала по формулам

$$\mu = \sqrt{\text{imag}(y)^2 + \text{real}(y)^2};$$

$$\theta = \arctg\left(\frac{\text{imag}(y)}{\text{real}(y)}\right).$$

Исследование корреляционной зависимости амплитуд и фаз сигнала антенного массива

Важной характеристикой модели канала, определяющей ее пригодность для решения задачи распределения ключей, является величина коррелированности параметров принимаемого сигнала (μ и θ) [5].

Так как для формирования ключа используются все антенны массива, необходимо исследовать корреляционные зависимости между параметрами принимаемых сигналов с разных антенн.

Найдем коэффициенты корреляции между сигналами, принимаемыми разными антеннами, для фаз и амплитуд, соответственно:

$$R_{\mu_i, \mu_j} = \frac{\sum (\mu_i - \bar{\mu}_i)(\mu_j - \bar{\mu}_j)}{\sqrt{\sum (\mu_i - \bar{\mu}_i)^2 \sum (\mu_j - \bar{\mu}_j)^2}};$$

$$R_{\theta_i, \theta_j} = \frac{\sum (\theta_i - \bar{\theta}_i)(\theta_j - \bar{\theta}_j)}{\sqrt{\sum (\theta_i - \bar{\theta}_i)^2 \sum (\theta_j - \bar{\theta}_j)^2}},$$

где i и j – номера антенн в антенном массиве.

На рис. 3 показана зависимость коэффициентов корреляции амплитуды и фазы от коли-

чества лучей в канале передачи между всеми парами антенн массива.

Как видно из рис. 3а, увеличение числа лучей влияет на корреляцию амплитуд сигнала, принимаемого антенными элементами. При $L \geq 8$ корреляция амплитуд между антенными элементами уменьшается до $R_\mu \leq 0,5$. Для фазы (рис. 3б) при любом количестве лучей характерна низкая корреляции $R_\theta \leq 0,3$ между всеми антенными элементами.

Исследование плотности вероятности распределения амплитуды и фазы

Поскольку принимаемые значения амплитуды и фазы случайны, интересно найти законы распределения этих случайных величин. На рис. 4 изображены гистограммы реализации амплитуд и фаз, полученные в результате моделирования.

Для проверки гипотезы о виде распределения применим критерий согласия Пирсона [5], в котором сравниваются между собой теоретические и эмпирические числа попаданий в интервалы. Для оценки отклонения эмпирических данных от теоретического распределения используем величину среднеквадратичного отклонения:

$$Z = K \cdot \sum_{i=1}^r \frac{(P'_i - P_i)^2}{P_i},$$

где K – количество проведенных опытов; r – количество интервалов; P'_i – случайная частота попадания значений экспериментальных вычислений в эти интервалы; P_i – вероятность попадания в те же интервалы, вычисленная по теоретическому закону распределения, для которого математическое ожидание и дисперсия вычисляются по той же выборке, что и частота P'_i .

Для трех видов распределения амплитуд (гауссовского, нормального, по обобщенному закону Релея) получаем:

$$Z \text{ (равн.)} = 1,6 \cdot 10^6;$$

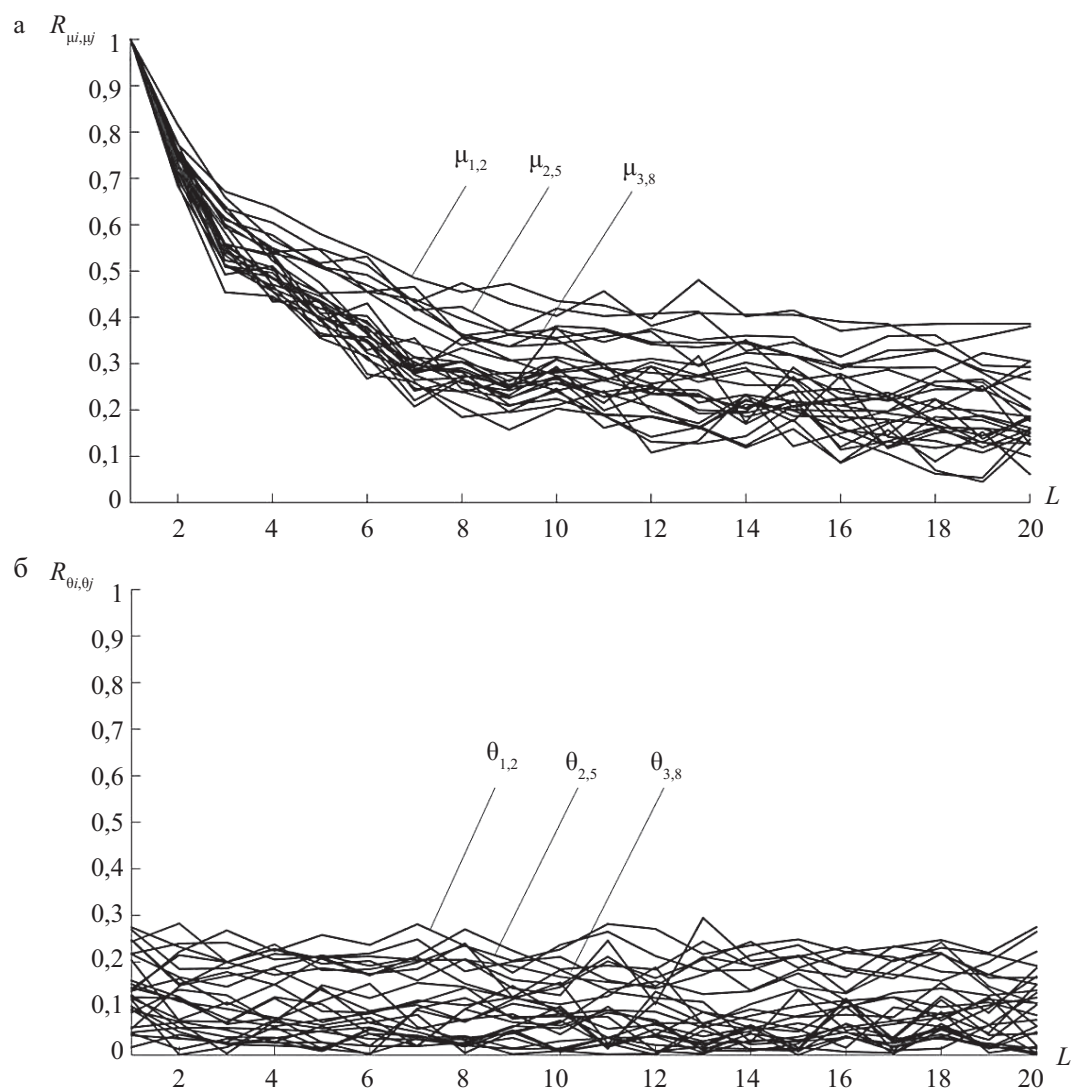


Рис. 3. Зависимость коэффициента корреляции амплитуды (а) и фазы (б) между парами антенн приемника от количества лучей

$$Z (\text{норм.}) = 7,1 \cdot 10^4;$$

$$Z (\text{рел.}) = 5,9 \cdot 10^4.$$

Можно сделать вывод, что амплитуда μ наиболее правдоподобно распределена по обобщенному закону Релея.

Аналогично используя критерий согласия Пирсона, получим значения среднеквадратичного отклонения для трех законов распределения фаз: нормального, равномерного и логарифмического: $Z (\text{равн.}) = 4,7 \cdot 10^4$; $Z (\text{лог.}) = 6,2 \cdot 10^5$; $Z (\text{норм.}) = 7,5 \cdot 10^5$, где наиболее приближенным к экспериментальным значениям является равномерное распределение.

Подводя итог исследованию плотности вероятности распределения принимаемых амплитуд и фаз, можно сделать вывод, что амплитуды и фазы являются СВ, имеющими распределение по обобщенному закону Релея и равномерное распределение, соответственно.

Квантование фазы и оценка качества формируемой последовательности

Для формирования ключа необходимо провести квантование параметров y , т. е. сформировать битовую последовательность. Так как фаза принятого сигнала имеет равномерное

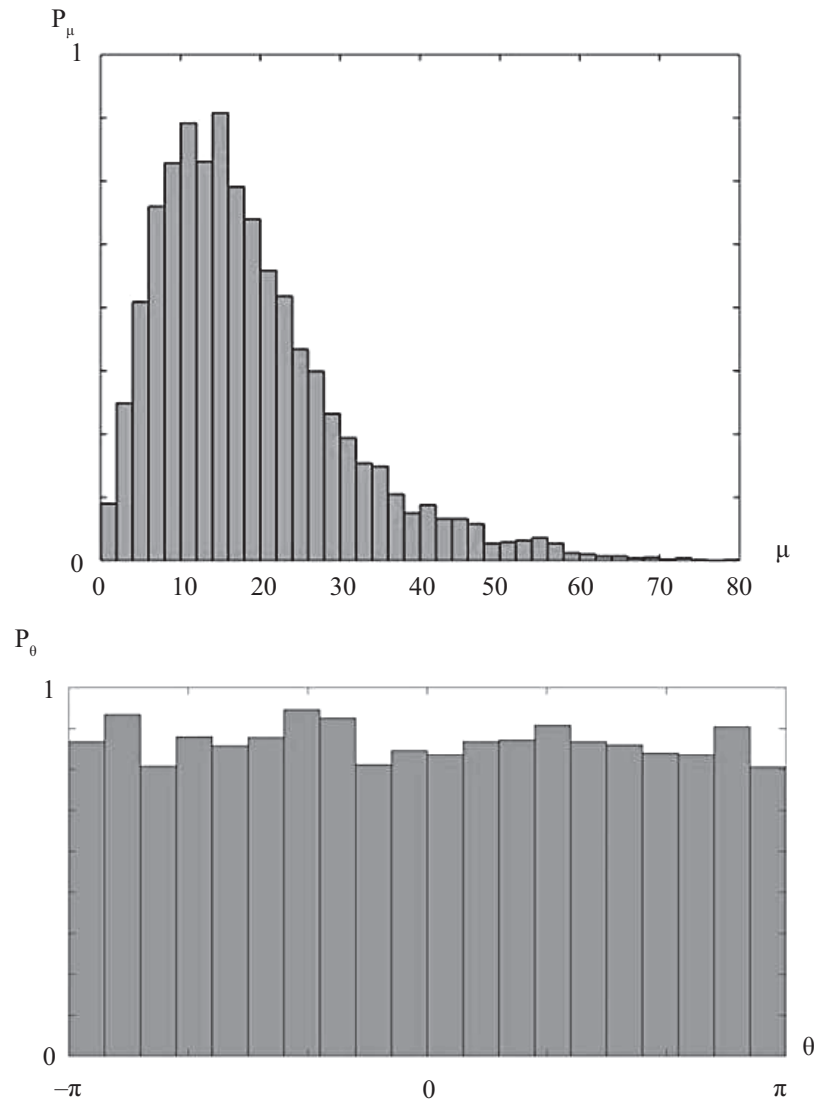


Рис. 4. Плотность распределения амплитуды (а) и фазы (б)

распределение и значения фаз с соседних антенн менее коррелированы, чем у амплитуды, остановимся на исследовании битовой последовательности, полученной путем квантования фазы.

Выполним квантование фазы каждого компонента вектора y с уровнем квантования Q . Для этого введем функцию квантования f_Q : $C \rightarrow \{1, \dots, Q\}$, обозначающую поэлементное отображение каждого значения фазы,

$$f_Q(y) = f_Q(\theta) = q$$

с условием

$$\theta \in \left[\frac{2\pi(q-1)}{Q}, \frac{2\pi q}{Q} \right), q = 1, \dots, Q.$$

Исходя из того, что фаза принимаемого сигнала имеет равномерное распределение, справедливо следующее уравнение:

$$P(f_Q(y) = q) = P(f_Q(\theta) = q) = \frac{1}{Q}.$$

Для оценивания качества формируемой последовательности воспользуемся тестом проверки на случайность появления элементов, заключающимся в оценке равномерности

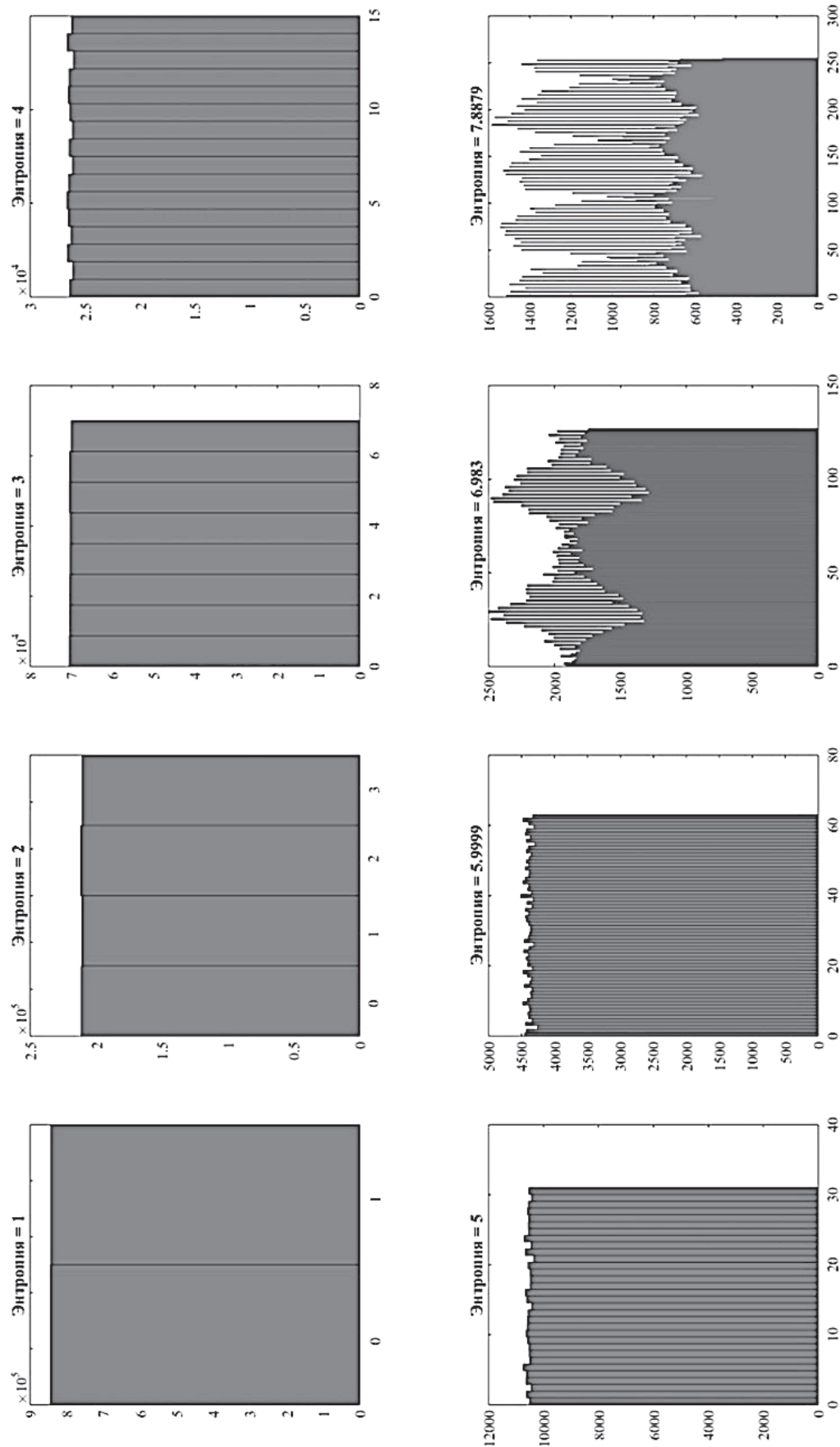


Рис. 5. Результаты теста «Проверка серий»

распределения символов в исследуемой последовательности на основе анализа частоты появления нулей и единиц и серий, состоящих из k бит («Проверка серий») [3].

Выполняя квантование фазы 10 000 принятых сигналов на 64 уровня, построим графики распределения СВ q для серий, состоящих от 1 до 8 бит и рассчитаем энтропию СВ q для этих серий по формуле [2] (рис. 5):

$$H(x) = -\sum_{i=1}^n p(i) \log_2 p(i).$$

Как видно из графиков, распределение элементов для серий из 7 и 8 бит имеет плохие статистические характеристики, что также подтверждается энтропией рассматриваемой выборки. Для выборок, состоящих из серий 1–6 бит, характерно равномерное распределение всех значений, поэтому в дальнейших работах необходимо рассмотреть способы улучшения статистических характеристик последовательности, пригодной для формирования ключа.

Заключение

Исследованы характеристики системы формирования ключей, основанной на использовании технологии ММО и случайных факторов в среде передачи сигналов. На основе моделирования построены функции распределения и коэффициенты корреляции амплитуды и фазы сигналов, принимаемых разными антеннами. Показано, что при увеличении числа лучей коэффициент корреляции уменьшается, причем амплитуды сигналов более коррелированы, чем фазы.

Исследованы статистические характеристики квантованных значений сигнала. Показано, что формируемая битовая последовательность при длине серий $k \geq 7$ имеет неравномерный характер распределения выборки. В последующих работах необходимо определить способ улучшения статистических характеристик последовательности.

Проведенные исследования дают основу для построения системы распределения ключей в подвижных сетях железнодорожного транспорта и доказательства ее безопасности.

Библиографический список

1. Бакулин М. Г. Технология ММО : принципы и алгоритмы / М. Г. Бакулин, Л. А. Варукина, В. Б. Крейделин. – М. : Горячая линия – Телеком, 2014. – 244 с.
2. Волькенштейн М. В. Энтропия и информация / М. В. Волькенштейн. – М. : Наука, 2006. – 193 с.
3. Иванов М. А. Теория, применение и оценка качества генераторов псевдослучайных последовательностей / М. А. Иванов, И. В. Чугунков. – М. : КУДИЦ-ОБРАЗ, 2003. – 240 с.
4. Коржик В. И. Основы криптографии / В. И. Коржик, В. П. Просихин, В. А. Яковлев. – СПб. : СПбГУТ, 2014. – 276 с.
5. Яковлев В. А. Распределение ключей в беспроводных локальных сетях на основе использования антенн со случайно изменяемой диаграммой направленности в условиях многолучевого распространения радиоволн / В. А. Яковлев, В. И. Коржик, Ю. В. Ковайкин // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2010. – № 4. – С. 51–64.
6. Guan K. Assessment of LTE-R using high speed Railway Channel Model / K. Guan, Zh. Zhong, B. Ai // Proc. 3rd IEEE Int. Conf. on Communications and Mobile Computing (CMC'11). – 2011, Apr. – P. 461–464.
7. Mathur S. Radio-telepathy: Extracting a secret key from an unauthenticated wireless channel / S. Mathur, W. Trappe, N. Mandayam et al. // Proc. 14th ACM Int. Conf. Mobile Computing and Networking (MobiCom'08), San Francisco, CA, Sept. 14–19, 2008. – San Francisco, 2008. – P. 128–139.
8. Wallace J. W. Automatic Secret Keys From Reciprocal MIMO Wireless Channels : Measurement and Analysis / J. W. Wallace, R. K. Sharma // IEEE Trans. Inf. Forensics Secur. – 2010. – Vol. 5, N 3, Sept. – P. 381–391.

9. Yigit H. Analytical Derivation of 2×2 MIMO Channel Capacity in Terms of Multipath Angle Spread and Signal Strength / H. Yigit, A. Kavak // *Frequenz*. – 2012. – Vol. 66, Is. 3–4. – P. 97–100. – DOI:10.1515/freq-2012-0023.

References

1. Bakulin M.G., Varukina L.A. & Kreydelin V.B. *Tekhnologiya MIMO: printsipy i algoritmy* [MIMO Technology: Principles and Algorithms]. Moscow, Goryachaya Liniya – Telekom, 2014. 244 p.
2. Volkenshteyn M.V. *Entropiya i informatsiya* [Entropy and Information]. Moscow, Nauka, 2006. 193 p.
3. Ivanov M.A. & Chugunkov I.V. *Teoriya, primeneniye i otsenka kachestva generatorov psevdosluchaynykh posledovatelnostey* [Theory, Application and Quality Control for Pseudo-Random Sequence Generators]. Moscow, KUDIC-OBRAZ, 2003. 240 p.
4. Korzhik V.I., Prosikhin V.P. & Yakovlev V.A. *Osnovy kriptografii* [Basic Cryptography]. St. Petersburg, SPbGUT, 2014. 276 p.

5. Yakovlev V.A., Korzhik V.I. & Kovaykin Yu.V. *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Kompyuternyye sistemy – Information Security Problems. Computer Systems*, 2010, no. 4, pp. 51-64.

6. Guan K., Zhong Zh. & Ai B. Assessment of LTE-R using HS Railway Channel Model. *Proc. 3rd IEEE Int. Conf. on Communications and Mobile Computing (CMC'11)*, 2011, Apr. Pp. 461-464.

7. Mathur S., Trappe W., Mandayam N., Ye C. & Reznik A. Radio-telepathy: Extracting a secret key from an unauthenticated wireless channel. *Proc. 14th ACM Int. Conf. Mobile Computing and Networking (MobiCom'08)*, San Francisco, CA, Sept. 14–19, 2008. San Francisco, 2008. Pp. 128-139.

8. Wallace J.W. & Sharma R.K. Automatic Secret Keys From Reciprocal MIMO Wireless Channels: Measurement and Analysis. *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.*, 2010, Vol. 5, no. 3, Sept., pp. 381-391.

9. Yigit H. & Kavak A. Analytical Derivation of 2×2 MIMO Channel Capacity in Terms of Multipath Angle Spread and Signal Strength. *Frequenz*, 2012, Vol. 66, Is. 3-4, pp. 97-100. DOI:10.1515/freq-2012-0023.

МЫЛЬНИКОВ Павел Дмитриевич – аспирант, paul.mylnikov@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 656.21.001.2

Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко, А. В. Мягкова**УТОЧНЁННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ ВРЕМЕНИ ДВИЖЕНИЯ И СКОРОСТИ ВАГОНА НА ВТОРОМ СКОРОСТНОМ УЧАСТКЕ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОПУТНОГО ВЕТРА**

Дата поступления: 14.12.2016

Решение о публикации: 09.02.2016

Цель: Исследовать вычисления ускорения вагона и найти время движения и скорость вагона на втором скоростном участке горки до и после стрелочного перевода при воздействии попутного ветра. **Методы:** Вычисления ускорения вагона основаны на принципе Даламбера, а вычисления времени движения и скорости вагона – на широко известные из курса элементарной физики формулах пути и скорости при равноускоренном движении тела. **Результаты:** Исследованы силовые соотношения на втором скоростном участке горки при воздействии попутного ветра малой величины. Найдены конкретные значения проекции силы тяжести вагона с грузом и силы сопротивления ветра на направления скатывания вагона как сдвигающих сил. Вычислены силы трения качения колёс и силы трения скольжения гребней колёс с учётом воздействия на вагон сопротивлений всякого рода (среды, стрелки, кривых) и проекции силы ветра на боковую поверхность вагона до и после стрелки. Рассчитана величина силы трения скольжения гребней колёс при вхождении вагона в кривой участок пути после стрелочного перевода как удерживающих сил. На основе этих силовых соотношений с учётом инерции вращающихся масс вычислены конкретные значения ускорения вагона при различных видах сопротивления движению вагона до и после стрелки. По заданной величине скорости входа вагона на второй скоростной участок горки и вычисленному значению ускорения вагона выполнен расчёт времени движения и скорости вагона на данном участке горки. Построены графические зависимости времени движения от длины исследуемого участка горки и скорости скатывания вагона от времени. **Практическая значимость:** По результатам исследований можно разработать программу расчётов ускорения, времени движения и скорости скатывания вагона при воздействии ветров различных направлений, которые позволяют выполнить расчёт и проектирование всей длины сортировочной горки.

Сортировочная горка, вагон, попутный ветер, движение вагона, ускорение, второй скоростной участок горки, стрелочный перевод.

***Khabibulla T. Turanov**, Dr. Sci. (Eng.), professor, khturanov@yandex.ru; **Andrey A. Gordiyenko**, Cand. Sci. (Eng.), teaching assistant, gordiii89@yandex.ru; **Alyona V. Myagkova**, assistant lecturer, myagkova0502@gmail.ru (Ural State University of Railway Transport) IMPROVED RESULTS OF CALCULATIONS OF MOVEMENT TIME AND SPEED OF A WAGON ON SECOND SPEED SECTION OF GRAVITY HUMPS UNDER THE INFLUENCE OF REAR WIND

Objective: To study calculations of wagon acceleration, and to find movement time and wagon speed on the second speed section of a gravity hump before and after railroad switch under the influence of rear wind. **Methods:** Calculations of wagon acceleration are based on the d'Alembert principle, and calculations of movement time and wagon speed are based on route and speed formulae for uniformly accelerated motion, widely known from elementary physics course. **Results:** Force correlations are studied for second speed section of a gravity wagon hump under the influence of low-intensity rear wind. Concrete values of projections of gravity force of a loaded wagon and of wind resistance force on

directions of wagon loading as shearing forces are established. Calculated are wheels' forces of rolling friction and wheel flanges' sliding friction forces, taking into account influences of resistances of various types (environment, switch, curves) and projection of wind force on wagon's side surface before and after the switch. The value of wheel flanges' sliding friction force upon wagon's entrance into a curve track under railroad switch is calculated as restraining forces. On the basis of these force correlations, taking into account rotating mass inertia, concrete values of wagon acceleration are calculated under various types of resistance to wagon movement before and after a switch. From the set value of a wagon's velocity at entry into second speed section of the gravity hump and from calculated value of wagon acceleration, calculation of the movement time and speed of a wagon at this section of the gravity hump is carried out. Characteristic curves of movement time from the length of gravity hump section under study and of wagon rolling speed from time are presented. **Practical importance:** Study results allow for development of a programme for calculation of acceleration, movement time and wagon rolling speed under the influence of winds from different directions, allowing calculating and designing the entire length of gravity hump.

Gravity hump, wagon, rear wind, wagon movement, acceleration, second speed section of a gravity hump, railroad switch.

Математические модели движения вагона на скоростных участках сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины, изложенные в [12, 13] в упрощённой постановке задачи, имели некоторые неточности представления диаграммы скорости попутного ветра и скорости движения вагона по уклону горки. Помимо этого, в [12, 13] сопротивления всякого рода (среды, стрелки, кривых) фактически учтены при движении вагона на всей длине второго скоростного участка (СК2) горки, т. е. до и после стрелочного перевода, хотя на втором скоростном участке горки до стрелочного перевода следовало бы учитывать только сопротивление среды, а после стрелочного перевода – сопротивления всякого рода. В [14] приведены примеры расчёта времени движения и скорости вагона с использованием аналитических формул [12].

В настоящей статье на основе данных [16] движение вагона на участке СК2 горки при воздействии попутного ветра разделено на два этапа: на первом вагон движется до стрелочного перевода (до стрелки), на втором – после стрелки по кривому участку пути. Исследователи еще не определили время движения и скорость скатывания вагона ни на первом, ни на втором этапе движения вагона на СК2 горки при воздействии попутного ветра малой величины.

Наша статья продолжает серию работ [1, 4, 8–17] о динамике скатывания вагона с сортировочной горки. Особо оговоримся, что в ней активно будут использованы основные подходы и результаты работы [16].

Цель статьи – на основе силовых соотношений в системе вагон – путь на СК2 горки при воздействии проекции попутного ветра малой величины вычислить ускорение вагона при его движении по кривому участку пути; далее, используя формулы пути и скорости движения тела, известные из курса элементарной физики, определить время и скорость скатывания вагона при его движении на каждом этапе СК2 горки.

Формулировка задачи

Требуется получить конкретный пример расчёта ускорения, времени и скорости вагона при его движении на каждом этапе СК2 горки по упрощённой методике, где по найденному на основе силовых соотношений значению ускорения вагона при движении на участке СК2 горки a_k и известной величине этого участка горки $l_j = x(t_k)$ можно было бы определить время t_k , в течение которого вагон движется с заданной начальной скоростью v_{0k} до и после стрелочного перевода этого участка горки, а по величине времени t_k – скорость

вагона $v_{ek}(t_k)$. Здесь и далее при $k = 2$ учитываются только сопротивление среды ($F_{cp} = F_c$) и отсутствие воздействия проекции ветра с боковой стороны вагона $F_{rby} = F_{rb.б}$ на СК2 горки до стрелки; при $k = 21$ учитываются сопротивление среды F_{cp} и воздействие проекции ветра с боковой стороны вагона F_{rby} ; при $k = 2$ с – сопротивление всякого рода (среды, стрелки, кривых) F_c и отсутствие воздействия проекции ветра с боковой стороны вагона F_{rby} на СК2 горки после стрелки; $k = 21$ с – сопротивление всякого рода F_c и воздействие проекции ветра с боковой стороны вагона F_{rby} ; $k = 22$ с – одновременно сопротивление всякого рода F_c , воздействие поперечной переносной силы инерции I_{ey} и проекции ветра с боковой стороны вагона F_{rby} . Здесь и далее $j = 2$ соответствует случаю, когда $k = 2$; 21, а $j = 2$ с – $k = 2$ с; 21 с; 22 с.

Общий подход к решению задачи при движении вагона на втором скоростном участке горки

При решении задачи движения вагона с сортировочной горки, как и в [12, 14, 16], использовано классическое положение теоретической механики – основной принцип Даламбера в координатной форме [5] и известные из курса элементарной физики классические формулы пути и скорости движения тела.

В условиях задачи и принятых предпосылках рассмотрен случай, когда вагон по уклону сортировочной горки входит на СК2 горки с заданной начальной скоростью v_{0k} . При входе одиночного вагона на рассматриваемый участок горки считаем, что вагон будет испытывать воздействие в основном внешних сил в виде силы тяжести вагона с грузом G , проекции силы аэродинамического сопротивления попутного ветра малой величины (например, юго-западного направления) F_{rb} по продольной оси Ox и поперечной оси Oy в виде F_{rbx} и F_{rby} , при этом оси Ox и Oy ортогональны в плоскости движения вагона (рис. 1), удельное

давление на 1 м^2 площади вагона с грузом равно $0,5 \text{ кН/м}^2$ [7].

Также будем считать, что на вагон будут воздействовать силы трения качения колёс о поверхности катания рельсовых нитей $F_{тр.к}$ и трения скольжения гребней колёс о боковую поверхность рельсовой нити $F_{тр.ск}$, учитывая воздействие поперечной переносной силы инерции I_{ey} и проекции ветра с боковой стороны вагона F_{rby} .

При формировании расчётной модели движения вагона на СК2 горки до стрелки принято, что колёсные пары по рельсовым нитям катятся при чистом качении колёс относительно поверхности катания рельсовых нитей $F_{тр.к}$ и трении скольжения гребней колёс о боковую поверхность рельсовой нити $F_{тр.ск}$, которое появляется при учёте воздействия проекции ветра с боковой стороны вагона F_{rby} , т. е. $F_{тр.к} = F_{тр.к} + F_{тр.ск}$. При движении вагона по кривому участку пути после стрелки следует учесть трение скольжения гребней колёс о боковую поверхность рельсовой нити $F_{тр.ск}$.

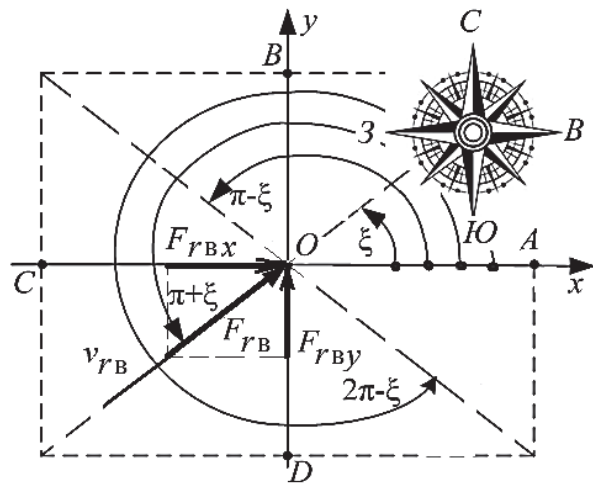


Рис. 1. Диаграмма попутного ветра юго-западного направления:

$\bar{v}_{rb}$ – абсолютная скорость попутного ветра;

$\pi + \xi$ – направляющий угол вектора

абсолютной скорости ветра $\bar{v}_{rb}$ относительно

горизонтальной (ось Ox), например для юго-

западного направления ветра; $\bar{F}_{rb}$ – сила

воздействия попутного ветра; F_{rbx} и F_{rby} –

проекции силы воздействия $\bar{F}_{rb}$ попутного

ветра на оси Ox и Oy , т. е. $(\bar{F}_{rbx}, \bar{F}_{rby}) \in \bar{F}_{rb}$

которое появляется при учёте воздействия поперечной переносной силы инерции I_{ey} и проекции силы F_{rby} на направление последней силы.

Этим условиям соответствует упрощённая расчётная модель движения вагона на участке СК2 горки, полученная с использованием принципа освобождения от связей [5] (рис. 2).

Упрощённая последовательность построения математической модели движения вагона на СК2 горки базируется на основном законе динамики для переносного движения вагона с неидеальной связью (принципе Даламбера) в координатной форме [5], который на основе силовых соотношений позволяет вычислить ускорение вагона при движении на СК2 горки a_k .

Таким образом, используя основной принцип Даламбера по силовым соотношениям, найдем ускорение вагона при движении на СК2 горки a_k , а затем по известной величине второго скоростного участка горки $l_j = x(t_k) -$

время t_k , в течение которого вагон движется с заданной начальной скоростью v_{0k} до начала стрелочного перевода этого участка горки, а по времени t_k – скорость вагона $v_{ek}(t_k)$. Аналогично определяется время движения t_{kc} и скорость вагона $v_{ekc}(t_{kc})$ после стрелки до начала первой тормозной позиции.

Упрощённая последовательность расчёта времени и скорости вагона при его движении на втором скоростном участке горки

Скорость вагона на СК2 сортировочной горки при движении вагона на первом и втором этапах движения при воздействии попутного ветра вычисляют в такой последовательности.

1) При проектировании сортировочной горки полную длину СК2 горки l_j принимают согласно рекомендациям [2]. Например,

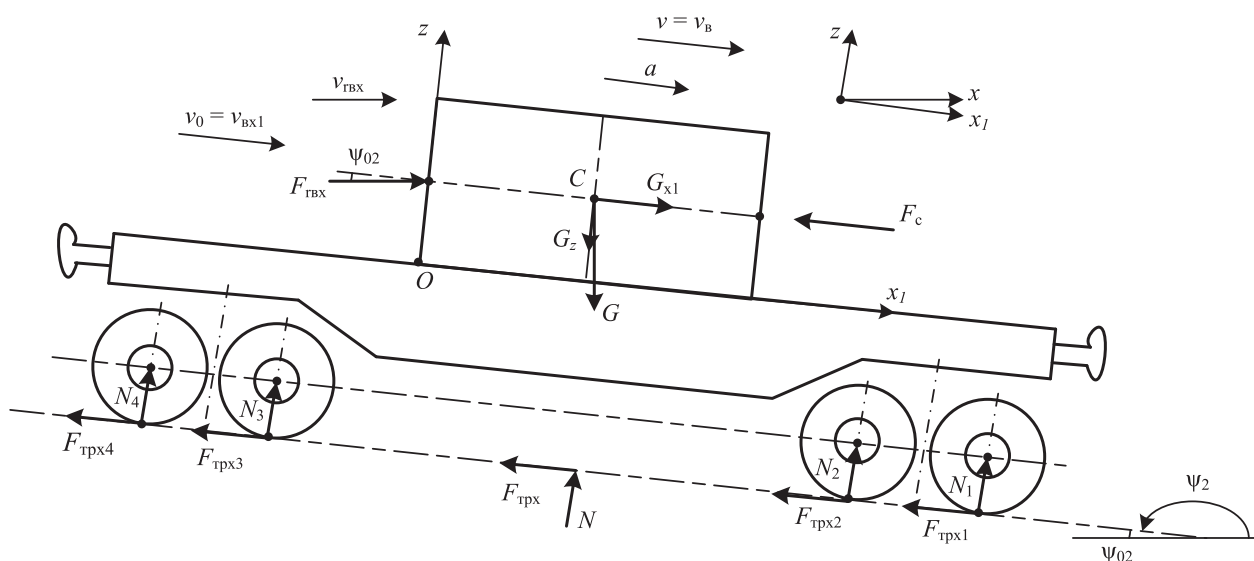


Рис. 2. Упрощённая расчетная модель движения вагона на участке СК2 при воздействии попутного ветра:

O – начало подвижной системы координат Ox_1yz , жёстко связанной с вагоном; Ox – ось по горизонтали; ψ_{02} – угол уклона (спуска) участка СК2 горки; $v_{ГВХ}$ – относительная скорость воздуха; $v_0 = v_{БХ1}$ – начальная скорость вагона; v_B – скорость вагона; G, G_{x1}, G_z – сила тяжести вагона с грузом и её проекции на оси Ox_1 и Ox_2 , соответственно; $F_c = F_{cp}$ – сила сопротивления среды до стрелки, после стрелки F_c – сила сопротивления всякого рода;

N и $F_{тр.x}$ – нормальная и касательная составляющие реакции связей (рельсовых нитей), причём $N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4$ и $F_{тр.x} = F_{трx1} + F_{трx2} + F_{трx3} + F_{трx4}$ как параллельные силы

если уклон горки 30 ‰, $\psi_{02} = 0,03$ рад. ($\operatorname{tg} \psi_{02} = 0,03$), то длина рассматриваемого участка до стрелки $l_2 \approx 15$ м, а после стрелки – $l_{2c} = 18,63$ м. При этом угол поворота кривых на СК2 горки α_2 принимают в зависимости от количества пути на горочной горловине, например, если горочная горловина спроектирована на 24-м или 32-м пути, то $\alpha_2 = 4,73^\circ = 0,083$ рад., а если на 40-м пути, то $\alpha_2 = 2,73^\circ = 0,048$ рад.

2) Подсчитывают проекции силы воздействия попутного ветра на вагон F_{rv} , например юго-западного направления, по продольной Ox и поперечной Oy_1 оси (на рис. 2 ось Oy_1 не показана) в виде (см. (2) [16]), кН:

$$F_{rvx} = 0,5 A_T; \quad F_{rvb} = 0,5 A_6,$$

где 0,5 – удельное давление на 1 м² площади, кН/м² [7]; A_T – площадь торцевой поверхности вагона с грузом, м²; A_6 – площадь боковой поверхности вагона с грузом, м². Например, если $A_T = 6,384$ и $A_6 = 27,36$ м², то $F_{rvx} = 3,192$ и $F_{rvb} = 13,68$ кН.

3) Рассчитывают сдвигающую силу $F_{сдх1}$, т. е. проекции силы тяжести вагона с грузом G_{x1} и силы сопротивления попутного ветра F_{rvx} на направление скатывания вагона по оси Ox_1 (см. рис. 2 и (3) [16]):

$$F_{сдх1} = G \sin(\psi_{0k}) + F_{rvx} \cos(\psi_{0k}), \quad (1)$$

где G – сила тяжести вагона с грузом с учётом инерции вращающихся масс, кН.

Например, независимо от значения $k = 2$ или 2 с, если $G = 908$ кН; $\sin(\psi_{02}) = 0,03$, $F_{rvx} = 3,192$ кН, $\cos(\psi_{02}) = 1$, то $F_{сдх1} = 30,426$ кН.

4) Вычисляют силу трения качения $F_{тр.к}$ от проекций силы тяжести вагона с грузом G_z и силы сопротивления попутного ветра F_{rvx} на направление оси Oz (см. рис. 2) как касательную составляющую реакции связи (рельсовых нитей) F_{τ} , которая, согласно закону Кулона, равна (см. (7) [16])

$$F_{тр.к} = f_0 (G \cos(\psi_{0k}) + F_{rvx} \sin(\psi_{0k})), \quad (2)$$

где f_0 – некоторый приведённый коэффициент трения качения, учитывающий количество колёс в тележках, трения качения (по кольцам подшипника и колеса по рельсу) (обычно принимают $f_0 = 0,0001$) [2–14, 16, 17]. Например, независимо от значения $k = 2$ или 2 с, если $f_0 = 0,0001$, $G = 908$ кН – сила тяжести вагона с грузом с учётом инерции вращающихся масс (колёсных пар)¹, $\cos(\psi_{02}) = 1$, $F_{rvx} = 3,192$ кН, $\sin(\psi_{02}) = 0,03$, то $F_{тр.к} = F_{тр.к} = 0,094$ кН.

5) Вычисляют силу трения скольжения $F_{тр.ск}$ от воздействия проекции ветра с боковой стороны вагона $F_{rvy} = F_{rvb}$ как касательную составляющую реакции связи (рельсовых нитей) F_{τ} , которая, согласно закону Кулона, равна (см. (8) [14])

$$F_{тр.бх} = F_{тр.ск} = f_{ск0} F_{rvy} = f_{ск0} F_{rvb}, \quad (3)$$

где $f_{ск0}$ – коэффициент трения скольжения гребней колёс о боковую поверхность рельсовой нити (обычно принимают $f_{ск0} = 0,25$). Например, если $f_{ск0} = 0,25$, $F_{rvy} = F_{rvb} = 13,68$ кН, то $F_{тр.бх} = F_{тр.ск} = 3,42$ кН.

6) С учётом (2) и (3) вычисляют силу трения вдоль движения вагона как сумму сил трения качения $F_{тр.к}$ и сил трения скольжения $F_{тр.ск}$ при учёте воздействия проекции ветра с боковой стороны вагона F_{rvy} в виде

$$F_{трх1} = F_{\tau} = F_{тр.к} + F_{тр.ск}.$$

Например, если $F_{тр.к} = 0,094$, $F_{тр.ск} = 3,42$ кН, то $F_{трх1} = 3,514$ кН.

7) Находят силы сопротивления движению вагона от среды $F_{ср}$ в виде (см. (8) [16])

$$F_{ср} = k_{ср} k_{нв} G,$$

где $k_{ср}$ – коэффициент, учитывающий долю силы тяжести G при учёте сопротивления сре-

¹ Без учёта этой инерции $G = 794$ кН при силе тяжести груза $G_{гр} = 650$ кН.

ды (обычно в пределах 0,0001–0,0005 при скорости попутного ветра 2–4 м/с) [16]; $k_{\text{нв}}$ – коэффициент, учитывающий неточность вычислений $k_{\text{сп}}$ (обычно принимают до 1,5). Например, если $k_{\text{сп}} = 0,0003$, $k_{\text{нв}} = 1,45$ и $G = 908$ кН, то $F_{\text{сп}} = 0,395$ кН.

8) Вычисляют удерживающие силы $F_{\text{удк.х1}}$, оказывающие сопротивление движению вагона на СК2 горки до и после стрелочного перевода в виде (см. (10 а) [16])

$$F_{\text{удк.х1}} = F_{\text{тр.к}} + F_{\text{сп}} + F_{\text{тр.ск}} \quad (4)$$

или (см. (10) [16])

$$F_{\text{удк.х1}} = f_0 (G \cos(\psi_{0k}) + F_{\text{рвх}} \sin(\psi_{0k})) + (k_{\text{сп}} + k_{\text{стр}} + k_{\text{кр}})G + f_{\text{ск0}} F_{\text{рвб}} \cos(\alpha_2), \quad (5)$$

где α_2 – угол поворота кривых на СК2 горки (обычно принимают 0,083 рад.).

В (5) $k_{\text{стр}}$, и $k_{\text{кр}}$ – коэффициенты, учитывающие долю силы тяжести G при учёте сопротивления стрелки, кривых (обычно принимают $k_{\text{стр}} = 0,00025$, $k_{\text{кр}} = 0,000066$) [6].

Например, при вычислении $F_{\text{удк.х1}}$ по (4): если $F_{\text{тр.к}} = 0,094$ кН (по (2)), $F_{\text{сп}} = 0,227$ кН, $F_{\text{рвх}} = 13,68$ кН, $F_{\text{трб.х}} = F_{\text{трб.к}} = 3,42$ кН (по (3)), то $F_{\text{уд2х1}} = 0,321$ кН, $F_{\text{уд21х1}} = 3,741$ кН. При вычислении $F_{\text{удк.х1}}$ по (5) $F_{\text{с}} = 2,557$ кН (при $k_{\text{сп}} + k_{\text{стр}} + k_{\text{кр}} = 0,0028$), $F_{\text{уд2сх1}} = 2,651$ кН, $F_{\text{уд21сх1}} = 6,059$ кН.

9) По величине сдвигающей $F_{\text{сдх1}}$ и удерживающей $F_{\text{удк.х1}}$ сил вычисляют силу F_k , способствующую движению вагона на СК2 до и после стрелочного перевода (см. (11) [14]), кН [17]:

$$F_k = F_{\text{сдх1}} - F_{\text{удк.х1}}.$$

Например, если $F_{\text{сдх1}} = 30,426$ кН, $F_{\text{уд2х1}} = 0,321$ кН, $F_{\text{уд21х1}} = 3,741$ кН, то значения сил F_k при $k = 2$; 21 имеют значения $F_2 = 30,1$ кН,

$F_{21} = 26,685$ кН, то значения сил F_k при $k = 2$; 21 составляет: $F_2 = 30,1$ кН, $F_{21} = 26,685$ кН.

После стрелочного перевода, если $F_{\text{сдх1}} = 30,426$ кН, $F_{\text{уд2сх1}} = 2,651$, $F_{\text{уд21сх1}} = 6,059$ кН, то значения сил F_k при $k = 2$ с; 21 с таковы: $F_{2с} = 27,775$ кН, $F_{21с} = 24,367$ кН.

10) По значению силы F_k и массы вагона M с учётом инерции вращающихся частей на основе силовых соотношений (принципа Даламбера) находят ускорение вагона a_k при движении на рассматриваемом участке горки с ускорением, м/с² (см. (14) [16]):

$$a_k = \frac{F_k \cdot 10^3}{M}.$$

Например, если $M = 5,484 \cdot 10^4$ кг – масса вагона с грузом с учётом инерции вращающихся частей вагона и $F_2 = 30,1$ кН, $F_{21} = 26,685$ кН, $F_{2с} = 27,775$ кН, $F_{21с} = 24,367$ кН, то ускорение вагона при $k = 2$; 21 равно: $a_2 = 0,325$ м/с², $a_{21} = 0,288$ м/с², а при $k = 2$ с, 21 с $a_{2с} = 0,3$ м/с², $a_{21с} = 0,263$ м/с².

Отсюда ясно, что независимо от того, движется вагон до или после стрелки при воздействии сопротивлений всякого рода (среды, стрелки, кривых) $F_{\text{с}}$, проекции попутного ветра на боковую сторону вагона $F_{\text{рвх}}$, происходит его равноускоренное движение.

11) На основе классической формулы пути элементарной физики вычисляют время t_k , с, в течение которого происходит прямолинейное равноускоренное движение вагона на СК2 горки длиной l_j , м, (см. (16) [16]):

$$t_k(l_j) = f(v_{0k}, a_k, l_j),$$

где v_{0k} – начальная скорость вагона (скорость входа вагона на СК2 горки), м/с. Например, по данным расчётов предыдущих участков горки при $k = 2$; 21 пусть $v_{02} = 6,647$ м/с, $v_{021} = 6,439$ м/с, а при $k = 2$ с; 21 с $v_{02с} = 7,341$ м/с, $v_{021с} = 7,075$ м/с.

Например, если $v_{02} = 6,647$ м/с, $v_{021} = 6,439$ м/с, $a_2 = 0,325$ м/с², $a_{21} = 0,288$ м/с², $l_2 = 15,007$ м, то при $k = 2$; 21 время, в течение которого вагон скатывается на СК2 гор-

ки до стрелки, $t_2 = 2,146$ с, $t_{21} = 2,22$ с; а при $k = 2$ с; 21 с если $v_{02c} = 7,341$ м/с, $v_{021c} = 7,075$ м/с, $a_{2c} = 0,3$ м/с², $a_{21c} = 0,263$ м/с², $l_{2c} = 18,638$ м, то время, в течение которого вагон скатывается на СК2 горки после стрелки, $t_{2c} = 2,418$ с, $t_{21c} = 2,515$ с.

При необходимости можно построить графическую зависимость $t_k = f(l_j)$.

12) На основе классической формулы скорости элементарной физики определяют скорость вагона на участке СК2 горки до и после стрелки v_k по классической формуле элементарной физики:

$$v_k = f(v_{0k}, a_k, t_k).$$

Например, для заданных исходных данных $v_{02} = 6,647$ м/с, $v_{021} = 6,439$ м/с, $a_2 = 0,325$ м/с², $a_{21} = 0,288$ м/с², $t_2 = 2,145$ с, $t_{21} = 2,22$ с; при $k = 2$; 21 скорость вагона на СК2 горки до стрелочного перевода $v(t_2) = 7,345$ м/с (26,4 км/ч), $v(t_{21}) = 7,08$ м/с (25,5 км/ч), а после стрелочного перевода при $k = 2$ с; 21 с, если $v_{02c} = 7,341$ м/с, $v_{021c} = 7,075$ м/с, $a_{2c} = 0,263$ м/с², $a_{21c} = 0,225$ м/с², $t_{2c} = 2,418$ с, $t_{21c} = 2,515$ с, то $v(t_{2c}) = 8,07$ м/с (29,0 км/ч), $v(t_{21c}) = 7,74$ м/с (27,87 км/ч).

Построение графических зависимостей времени и скорости скатывания вагона при его движении на втором скоростном участке горки

Приведём макет-документ, полученный в программе MathCAD [3]. Для примера покажем графические зависимости времени движения от вариации длины пройденного пути и скорости скатывания вагона на СК2 горки в любой момент времени t до стрелки (рис. 3, 4). $l_2 = 0,1-15$ – изменение пути прохождения вагона l_k СК2 горки до стрелки, м.

Время движения вагона $t_k(l_j)$, с, при вариации длины рассматриваемого участка сортировочной горки l_j под воздействием проекции ветра на торцевую сторону вагона $F_{rвх}$ с

учетом сопротивления среды $F_{ср}$, а также при воздействии $F_{rвх}$ с учетом одновременного воздействия $F_{ср}$ и проекции попутного ветра на боковую сторону вагона $F_{rвп}$ до стрелки (т.е. при $j = 2$, чему соответствуют $k = 2$; 21) можно представить так, как показано на рис. 3.

Графические зависимости времени движения от вариации длины пройденного пути l_j после стрелки при $k = 2$ с; 21 с имеют вид, как на рис. 3.

$t = 0, 0,1-2,1$ – изменение времени движения вагона t на СК2 горки, с.

Скорость скатывания вагона на СК2 горки в любой момент времени t равноускоренного движения вагона до стрелки при воздействии проекции ветра на торцевую сторону вагона $F_{rвх}$ с учётом сопротивления среды $F_{ср}$, а также при воздействии $F_{rвх}$ с учётом одновременного воздействия $F_{ср}$ и проекции попутного ветра на боковую сторону вагона $F_{rвп}$ (т.е. при $j = 2$, чему соответствуют $k = 2$; 21) можно представить графически (рис. 4).

Характер кривых скорости скатывания вагона на СК2 горки в любой момент времени t равноускоренного движения вагона после стрелки при воздействии проекции ветра на торцевую сторону вагона $F_{rвх}$ с учётом сопротивлений всякого рода $F_{с}$, а также при воздействии $F_{rвх}$ с учётом одновременного воздействия $F_{с}$ и проекции попутного ветра на боковую сторону вагона $F_{rвп}$ при $k = 2$ с; 21 с такой же, как на рис. 4.

Обобщая результаты исследований на примере учёта воздействия проекции ветра на торцевую сторону вагона $F_{rвх}$ с учетом сопротивления среды $F_{ср}$, а также при воздействии $F_{rвх}$ с учетом одновременного воздействия $F_{ср}$ и проекции попутного ветра на боковую сторону вагона $F_{rвп}$, можно отметить, что если время движения вагона до стрелки, например, при $k = 2$, $t_2 = 2,146$ с и его скорость $v(t_2) = 7,345$ м/с, или 26,4 км/ч, то эти данные после стрелки, например, при $k = 2$ с, равны $t_{2c} = 2,418$ с, его скорость $v(t_{2c}) = 8,07$ м/с, или 29,0 км/ч. С учётом воздействия проекции ветра на торцевую сторону вагона $F_{rвх}$ с учетом сопротивлений всякого рода $F_{с}$, а также при

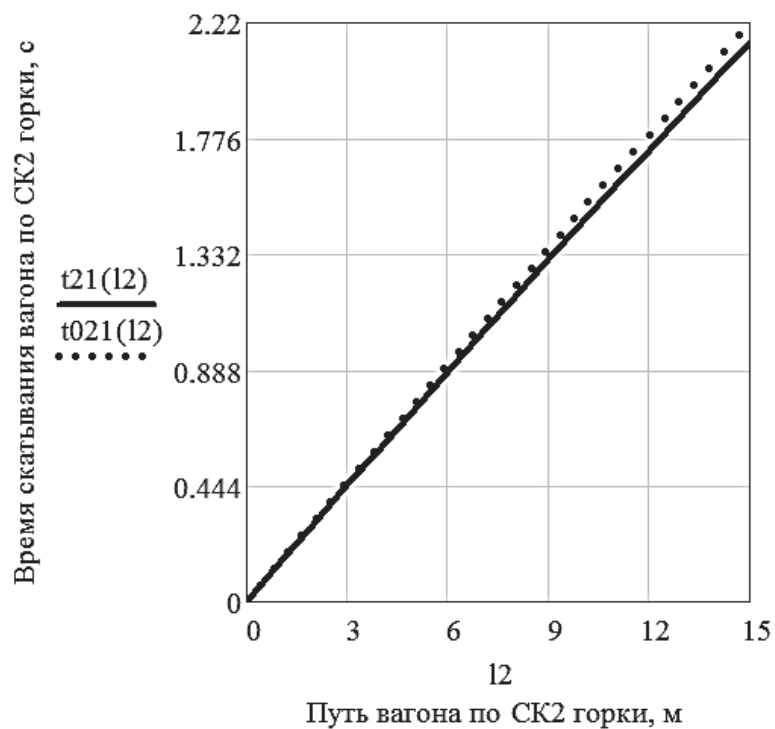


Рис. 3. Графическая зависимость времени движения вагона на втором скоростном участке горки до стрелки

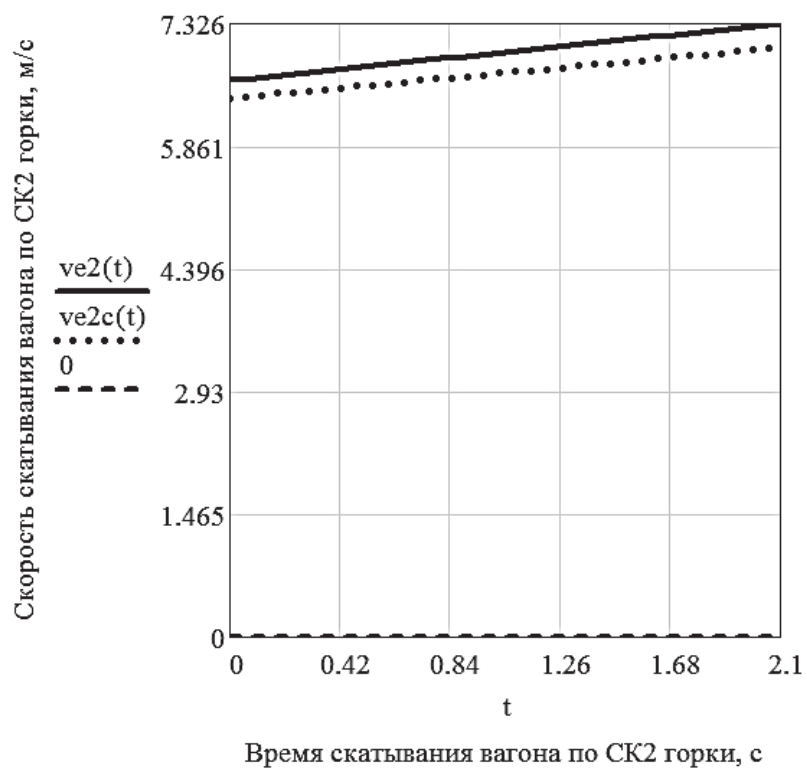


Рис. 4. Графическая зависимость скорости скатывания вагона на втором скоростном участке горки до стрелки

воздействии $F_{\text{рвх}}$ с учетом одновременного воздействия $F_{\text{с}}$ и проекции попутного ветра на боковую сторону вагона $F_{\text{рвп}}$, время движения и скорость скатывания вагона после стрелки также увеличиваются (например, при $k = 21$, $t_{21} = 2,22$ с, его скорость $v(t_{21}) = 7,08$ м/с, или 25,5 км/ч; при $k = 21$ с $t_{21\text{с}} = 2,515$ с, его скорость $v(t_{21\text{с}}) = 7,74$ м/с, или 27,87 км/ч).

Выводы

Ранее построенные нами математические модели движения вагона на участке СК2 горки при воздействии проекции попутного ветра малой величины, полученные нами в упрощенной постановке задачи [16], позволили разработать последовательность расчёта ускорения, время движения и скорость скатывания вагона при заданной длине рассматриваемого участка.

Данные подсчётов по определению ускорения, времени движения и скорости скатывания вагона по упрощенной методике позволили по известной величине пройденного расстояния вагона на втором скоростном участке горки до и после стрелки l_j определить время движения вагона t_k при различных условиях (воздействии только сопротивлений всякого рода, ветра с боковой стороны вагона и др.). Конкретные значения t_k позволили найти скорости скатывания вагона в конце рассматриваемого участка горки до и после стрелки $v_k(t_k)$.

Результаты выполненных исследований могут быть использованы для уточнённого расчета и проектирования первой тормозной позиции сортировочной горки.

Библиографический список

1. Долженко А. М. Оптимальное управление ро-спуском поездов на сортировочных горках малой мощности / А. М. Долженко // Вестн. транспорта Поволжья. – 2014. – № 1 (43). – С. 62–66.
2. Земблинов С. В. Альбом схем элементов стан-ций и узлов / С. В. Земблинов, И. И. Страковский. – М. : Всесоюз. изд.-полиграфич. объединение МПС, 1963. – 89 с.
3. Кирьянов Д. В. Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0 / Д. В. Кирьянов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.
4. Кобзев В. А. Особенности расчёта спускной части сортировочных горок методом покоординатного спуска / В. А. Кобзев, С. Н. Шмаль // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 1. – С. 17–20.
5. Лойцянский Л. Г. Курс теоретической меха-ники. Т. II. Динамика / Л. Г. Лойцянский, А. И. Лу-рье. – М. : Наука, 1983. – 640 с.
6. Образцов В. Н. Станции и узлы. Ч. II / В. Н. Об-разцов. – М. : Трансжелдориздат, 1938. – 492 с.
7. Приложение 3 к СМГС «Технические усло-вия размещения и крепления грузов». – URL : <http://osjd.org/doco/public/ru>.
8. Рудановский В. М. Влияние погрешностей АРС на образование «окон» и скорость соударе-ния отцепов в подгорочном парке / В. М. Руданов-ский // Вестн. ВНИИЖТ. – 1977. – № 3. – С. 47–50.
9. Рудановский В. М. Об определении удель-ных сопротивлений движению вагонов на путях с переменным уклоном / В. М. Рудановский // Вестн. ВНИИЖТ. – 1969. – № 1. – С. 46–50.
10. Сопротивление движению грузовых вагонов при скатывании с горок / под ред. Е. А. Сотнико-ва. – М. : Транспорт, 1975. – 104 с. (Труды «Вестн. ВНИИЖТ». Вып. 545.)
11. Старшов И. П. Определение воздушного со-противления движению вагонов на сортировочных горках / И. П. Старшов // Вестн. ВНИИЖТ. – 1970. – № 6. – С. 16–20.
12. Туранов Х. Т. Аналитическое определение времени скатывания вагона на втором скоростном участке сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины / Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко // Наука и техника транспорта. – 2015. – № 2. – С. 73–81.
13. Туранов Х. Т. Математическая модель вре-мени скатывания вагона на первом скоростном участке сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины / Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко // Бюл. транспортной информа-ции. – 2015. – № 6 (240). – С. 17–23.
14. Туранов Х. Т. Пример расчёта времени и скорости скатывания вагона на втором ско-

ростном участке сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины по новой методике / Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко // Наука и техника транспорта. – 2015. – № 3. – С. 63–70.

15. Устенко А. Б. Оценка надежности и эффективности систем прицельного регулирования скорости движения вагонов на сортировочных горках / А. Б. Устенко, В. М. Рудановский, Н. М. Фонарев // Повышение надежности технических средств на станциях : сб. науч. тр. – М. : Транспорт, 1984. – С. 21–35.

16. Turanov Kh. Analytical Description of Wagon Motion on the Second Speed Section of the Marshalling Hump with Switch Zone under the Impact of Fair Wind / Kh. Turanov, A. Gordienko, A. Myagkova // J. Multi. Eng. Sci. Technol. (JMEST). – 2015. – Vol. 2, Is. 11, Nov.

17. Turanov Kh. Analytical Determination of Conditions of Wagon Rolling Down Marshalling Hump Profiles / Kh. Turanov, A. Gordienko. – Open Access Libr. J. – 2015. – no. 2, e1912. – P. 1–11. – DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/oalib.1101912>.

References

1. Dolzhenko A. M. *Vestnik transporta Povolzhya – Volga Region Transport Bull.*, 2014, no. 1 (43), pp. 62–66.

2. Zemblinov S. V. & Strakovskiy I. I. *Albom skhem elementov stantsiy i uzlov* [Album of Schemes of Station and Junction Elements]. Moscow, Vsesoyuznoye izdatelsko-poligraficheskoye obiedineniye MPS, 1963. 89 p.

3. Kiryanov D. V. *Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0*. St. Petersburg, BKhV-Peterburg, 2012. 432 p.

4. Kobzev V. A. & Shmal S. N. *Nauka i tekhnika transporta – Transport Sci. and Eng.*, 2014, no. 1, pp. 17–20.

5. Loytsyanskiy L. G. & Lurye A. I. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki* [Theoretical Mechanics

Course]. Vol. II. Dynamics. Moscow, Nauka, 1983. 640 p.

6. Obratsov V. N. *Stantsii i uzly* [Stations and Junctions]. Pt. II. Moscow, Transzheldorizdat, 1938. 492 p.

7. Appendix 3 to Agreement on International Railway Freight Traffic, “Technical Conditions for Cargo Positioning and Fastening”, available at: <http://osjd.org/doco/public/ru>.

8. Rudakovskiy V. M. *Vestnik VNIIZhT – Bulletin of the Railway Res. Institute*, 1977, no. 3, pp. 47–50.

9. Rudakovskiy V. M. *Vestnik VNIIZhT – Bulletin of the Railway Res. Institute*, 1969, no. 1, pp. 46–50.

10. Soprotivleniye dvizheniyu gruzovykh vagonov pri skatyvaniy s gorok [Resistance to Freight Wagon Movement in Rolling from Gravity Humps]; ed. Ye. A. Sotnikov. Moscow, Transport, 1975. 104 p. (Proc. of „*Vestnik VNIIZhT – Bulletin of the Railway Res. Institute*“, Is. 545.)

11. Starshov I. P. *Vestnik VNIIZhT – Bulletin of the Railway Res. Institute*, 1970, no 6, pp. 16–20.

12. Turanov Kh. T. & Gordiyenko A. A. *Nauka i tekhnika transporta – Transport Sci. and Eng.*, 2015, no. 2, pp. 73–81.

13. Turanov Kh. T. & Gordiyenko A. A. *Byulleten transportnoy informatsii – Transp. inf. bull.*, 2015, no. 6 (240), pp. 17–23.

14. Turanov Kh. T. & Gordiyenko A. A. *Nauka i tekhnika transporta – Transport Sci. and Eng.*, 2015, no. 3, pp. 63–70.

15. Ustenko A. B., Rudanovsky V. M. & Fonarev N. M. *Povysheniye nadezhnosti tekhnicheskikh sredstv na stantsiyakh: sbornik nauchnykh trudov – Improving Reliability of Technical Facilities at Stations: Coll. of Sci. Papers*. Moscow, Transport, 1984. Pp. 21–35.

16. Turanov Kh., Gordienko A. & Myagkova A. *J. Multi. Eng. Sci. Technol. (JMEST)*, 2015, Vol. 2, Is. 11, Nov.

17. Turanov Kh. & Gordienko A. *Open Access Libr. J.*, 2015, no. 2, e1912, pp. 1–11; DOI <http://dx.doi.org/10.4236/oalib.1101912>.

*ТУРАНОВ Хабибулла Туранович – д-р техн. наук, профессор, khturanov@yandex.ru; ГОРДИЕНКО Андрей Александрович – канд. техн. наук, ассистент кафедры, gordiii89@yandex.ru; МЯГКОВА Алёна Валерьевна – ассистент, myagkova0502@gmail.ru (Уральский государственный университет путей сообщения).

УДК 621.314.21

А. Я. Якушев, А. Г. Середа**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА С СЕКЦИОНИРОВАННЫМИ
ВТОРИЧНЫМИ ОБМОТКАМИ**

Дата поступления: 22.12.2015

Решение о публикации: 28.02.2016

Цель: Адекватно воспроизвести переходные процессы в силовых цепях электроподвижного состава (ЭПС) при компьютерном моделировании рабочих режимов ЭПС переменного тока. **Методы:** Рассмотрен способ компьютерного моделирования тягового трансформатора с секционированными вторичными обмотками, в котором применена форма записи дифференциальных уравнений в пространстве состояний. Использована методика расчета индуктивностей рассеяния обмоток тягового трансформатора, основанная на теории многообмоточных трансформаторов. **Результаты:** Получена компьютерная модель тягового трансформатора, учитывающая изменение магнитного поля рассеяния при дискретном переключении нагрузки секций тяговых обмоток. Подтверждены выражения для расчета индуктивности рассеяния обмоток трансформатора и взаимной индуктивности, учитывающей изменение магнитного поля рассеяния обмоток при дискретном переключении нагрузки секций тяговых обмоток. **Практическая значимость:** Моделирование электромагнитных процессов в силовых цепях ЭПС позволяет воспроизводить переходные процессы в силовых цепях ЭПС, экспериментальное исследование которых требует применения дорогостоящих измерительных комплексов или же экспериментальные исследования работы ЭПС невыполнимы в реальных условиях. Тяговый трансформатор важнейший компонент электрооборудования ЭПС переменного тока, от параметров которого существенно зависят режимы работы тяговых преобразователей и их энергетические характеристики.

Тяговый трансформатор, многообмоточный трансформатор, индуктивность рассеяния, пространство состояний, уравнение состояния.

Aleksey Ya. Yakushev, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, professor, el_tyaga@mail.ru; ***Aleksandr G. Sereda**, postgraduate student, ag-sereda@mail.ru (Petersburg State Transport University) **COMPUTER SIMULATION OF A TRACTION TRANSFORMER WITH TAPPED SECONDARY COIL**

Objective: To reproduce adequately transient processes in power circuits of an electrically propelled vehicle in computer simulation of operating modes of alternating-current electrically propelled vehicles. **Methods:** A method for computer simulation of a traction transformer with tapped secondary coils in which recording format of differential equations into state space is considered. Applied was a method for calculating scattered inductions of traction transformer coils, based on multi-circuit-transformer theory. **Results:** A computer simulation of a traction transformer was obtained, taking into account changes to the stray magnetic field in case of discrete switching of loading of traction coils. Equations were confirmed for calculation of scattered induction of transformer coils and of mutual induction, which take into account changes to stray magnetic field of coils in case of discrete switching of loading of traction coils. **Practical importance:** Simulation of electromagnetic processes in electrically propelled vehicles' power circuits allows reproduction of transient processes in electrically propelled vehicles' power circuits, experimental study of which requires application of expensive measurement systems, or experimental study of electrically propelled vehicle operation is impossible in real conditions. A traction transformer is a crucial

component of an electric system of an alternating-current electrically propelled vehicle, and its parameters significantly influence operating regimes of traction transformers and their power characteristics.

Traction transformer, multi-circuit transformer, stray inductance, state space, state equation.

Статья описывает практическую реализацию теоретических положений, отображающих физические свойства многообмоточного трансформатора с одной сетевой обмоткой, рассмотренных в [8]. В качестве моделируемой системы выбран тяговый трансформатора ОНДЦЭ-5700/25-У2, применяемый на электровозах ВЛ65 и ЭП1. Для этого типа трансформатора напряжения короткого замыкания (табл. 1) [2] представлены в источниках наиболее полно. Предлагаемый способ компьютерного моделирования тягового трансформатора и методика определения параметров его обмоток применимы для других типов тяговых трансформаторов.

В основе компьютерной модели тягового трансформатора лежит его математическая модель в пространстве состояний (уравнения состояния и выхода, записанные в матричной форме) [4, 5]. Уравнения состояния и выхода являются результатом разрешения относительно производных системы дифференциальных уравнений первого порядка, описывающей работу n -обмоточного трансформатора [1, 3]. При переходе от собственной и взаимной индуктивности обмоток к индуктивности рас-

сеяния необходимо учесть их изменение при дискретном переключении нагрузки секций тяговых обмоток. Это изменение учитывается взаимной индуктивностью пары обмоток относительно индуктивности рассеяния обмоток, определенных для семи (по количеству моделируемых обмоток) опытов короткого замыкания трансформатора.

Математическая модель тягового трансформатора с секционированными вторичными обмотками в пространстве состояний

Обозначим сетевую обмотку $A-X$ символом 1, секцию вторичной обмотки $a1-1$ символом 2, секцию вторичной обмотки $1-2$ символом 3 и т. д (рис. 1).

Составим систему уравнений для шести опытов короткого замыкания пар обмоток (сетевой и одной из шести секций тяговых обмоток) и одного опыта короткого замыкания всех секций тяговых обмоток, соединенных последовательно, используя выражение (4) из [8]:

$$w^2 L_{k1s} = w^2 L_{\sigma 1} + \sum_{p=2}^n w_p^2 L'_{\sigma p};$$

$$\frac{1}{2\pi f} \cdot \begin{bmatrix} \sqrt{Z_{k12}^2 - (r_1' + r_2')^2} \\ \sqrt{Z_{k13}^2 - (r_1' + r_3')^2} \\ \sqrt{Z_{k14}^2 - (r_1' + r_4')^2} \\ \sqrt{Z_{k15}^2 - (r_1' + r_5')^2} \\ \sqrt{Z_{k16}^2 - (r_1' + r_6')^2} \\ \sqrt{Z_{k17}^2 - (r_1' + r_7')^2} \\ \sqrt{64^2 Z_{k12-7}^2 - (64r_1' + r_2' + r_3' + 4r_4' + r_5' + r_6' + 4r_7')^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 64 & 1 & 1 & 4 & 1 & 1 & 4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L'_{\sigma 1} \\ L'_{\sigma 2} \\ L'_{\sigma 3} \\ L'_{\sigma 4} \\ L'_{\sigma 5} \\ L'_{\sigma 6} \\ L'_{\sigma 7} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

ТАБЛИЦА 1. Технические характеристики тягового трансформатора
ОНДЦЭ-5700/25-У2

Номинальная мощность трансформатора, кВ·А	5682,9
Номинальная частота питающей сети, Гц	50
Ток холостого хода, %	0,53
Потери холостого хода, кВт	7,5
Потери короткого замыкания, кВт	59
Сетевая обмотка	
Номинальная мощность, кВ·А	5682,9
Номинальный ток, А	227,3
Номинальное напряжение, В	25000
Тяговые обмотки (ТО1, ТО2)	
Номинальная мощность, кВ·А	2×2482,2
Номинальное напряжение, В, на зажимах	
$a1-x1, a2-x2$	1260
$a1-2, 2-x1, a2-4, 4-x2$	630
$a1-1, 1-2, a2-3, 3-4$	315
Номинальный ток обмотки и ее частей, А	1970
Количество тяговых обмоток	2
Напряжение короткого замыкания, %	
CO (A-X) – TO [(a1-x1) + (a2-x2)]	7,4
CO (A-X) – TO [(a1-1) + (a2-3)]	4,88
CO (A-X) – TO [(1-2) + (3-4)]	5,4
CO (A-X) – TO [(1-x1) + (3-x2)]	6,02
CO (A-X) – TO [(a1-2) + (a2-4)]	7,4
CO (A-X) – TO [(2-x1) + (4-x2)]	7,4
CO (A-X) – TO (a1-x1)	4,0
CO (A-X) – TO (a1-1)	2,48
CO (A-X) – TO (1-2)	3,4
CO (A-X) – TO (a1-2)	3,73
CO (A-X) – TO (2-x1)	3,74
CO (A-X) – TO (1-x1)	3,1
CO (A-X) – TO (a2-x2)	4,0
CO (A-X) – TO (a2-3)	2,48
CO (A-X) – TO (3-4)	3,4
CO (A-X) – TO (a2-4)	3,75
CO (A-X) – TO (4-x2)	3,74
CO (A-X) – TO (3-x2)	3,1
Сопротивление обмоток постоянному току, Ом	
CO (A-X)	0,429
TO (a1-x1)	0,00278

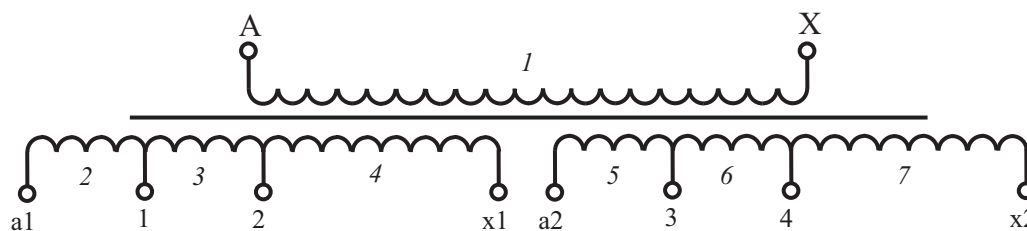


Рис. 1. Схема выводов тягового трансформатора ОНДЦЭ-5700/25-У2

ТАБЛИЦА 2. Индуктивность рассеяния сетевой обмотки и секций тяговых обмоток, определенная для семи опытов короткого замыкания трансформатора

$L_{\sigma 1}$, мГн	$L'_{\sigma 2}$, мГн	$L'_{\sigma 3}$, мГн	$L'_{\sigma 4}$, мГн	$L'_{\sigma 5}$, мГн	$L'_{\sigma 6}$, мГн	$L'_{\sigma 7}$, мГн
19,9836	59,4919	88,9950	39,8867	59,4919	88,9950	39,8867

где $L'_{\sigma p}$ – индуктивность рассеяния p -й обмотки ($p = 1, 2, \dots, n$ – номер обмотки), приведенная к числу витков сетевой обмотки;

$w = \sum_{p=2}^n w_p$ – суммарное число витков вторичных обмоток; r'_p – сопротивление p -й обмотки трансформатора постоянному току, приведенное к числу витков сетевой обмотки; $Z_{\kappa 1p}$ – полное сопротивление короткого замыкания трансформатора со стороны зажимов 1–1 при закороченной p -й секции тяговой обмотки (например: $Z_{\text{CO}(A-X) - \text{TO}(a1-1)}$ соответствует $Z_{\kappa 12}$); $Z_{\kappa 1s}$ – полное сопротивление короткого замыкания трансформатора со стороны зажимов 1–1, при закороченном последовательном соединении всех секций тяговых обмоток ($Z_{\text{CO}(A-X) - \text{TO}[(a1-x1) + (a2-x2)]}$ соответствует $Z_{\kappa 12-7}$).

Для опытов короткого замыкания трансформатора, когда $s < n - 1$, p -я обмотка не закорочена, w_p , r'_p , $L'_{\sigma p}$ равны нулю.

Отсутствие второй системы уравнений, составленной по выражению (5) из [8], обусловлено тем, что в [2] приводятся активные потери для опыта полного короткого замыкания трансформатора, поэтому учитываются

только активные потери в обмотках тягового трансформатора, что отражено в левой части системы уравнений (1).

Решением системы уравнений (1) являются значения индуктивности рассеяния сетевой обмотки и секций тяговых обмоток (табл. 2).

Для адекватного воспроизведения работы тягового трансформатора с секционированными вторичными обмотками в режимах коммутации тиристорных плеч выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) недостаточно опытов короткого замыкания, приведенных в табл. 1: $(n \cdot (n - 1)/2)$ [8]. Однако при типовом способе управления ВИП и одинаковом времени включения (выключения) тиристоров можно сделать допущение: $L'_{\sigma 26} = L'_{\sigma 53}$, $L'_{\sigma 27} = L'_{\sigma 54}$, $L'_{\sigma 37} = L'_{\sigma 64}$ ($L'_{\sigma pq} = L'_{\sigma qp}$ – взаимная индуктивность, учитывающая изменение индуктивности рассеяния обмоток при дискретном переключении нагрузки секций тяговых обмоток [8], приведенная к числу витков сетевой обмотки). Тогда определим взаимную индуктивность $L'_{\sigma pq}$, решив матричное уравнение, составленное по выражению (6) из [8]:

$$w^2 L_{\kappa 1s} - w^2 L_{\sigma 1} - \sum_{p=2}^n w_p^2 L'_{\sigma p} = -2w \sum_{p=2}^n w_p L'_{\sigma 1p} + \sum_{q=2}^n \sum_{\substack{p=2, \\ p \neq q}}^n w_q w_p L'_{\sigma pq};$$

$$\|L'_k\| = \begin{bmatrix} -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -4 & -4 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -6 & -12 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -8 & -8 & -16 & 2 & 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4 & -4 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6 & -12 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -8 & -8 & -16 & 2 & 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -16 & -16 & -32 & 2 & 4 & 4 & -16 & -16 & -32 & 2 & 4 & 4 & 2 & 2 & 4 & 2 & 4 & 8 \\ -4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -16 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -16 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \\ -8 & -8 & 0 & 2 & 0 & 0 & -8 & -8 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & -12 & -24 & 0 & 0 & 4 & 0 & -12 & -24 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 2 & 4 & 8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L'_{\sigma 12} \\ L'_{\sigma 13} \\ L'_{\sigma 14} \\ L'_{\sigma 23} \\ L'_{\sigma 24} \\ L'_{\sigma 34} \\ L'_{\sigma 15} \\ L'_{\sigma 16} \\ L'_{\sigma 17} \\ L'_{\sigma 56} \\ L'_{\sigma 57} \\ L'_{\sigma 67} \\ L'_{\sigma 25} \\ 2L'_{\sigma 26} \\ 2L'_{\sigma 27} \\ L'_{\sigma 36} \\ 2L'_{\sigma 37} \\ L'_{\sigma 47} \end{bmatrix},$$

где

$$\|L'_k\| = \frac{1}{2\pi f} \begin{bmatrix} \sqrt{Z_{k12}^2 - (r'_1 + r'_2)^2} \\ \sqrt{Z_{k13}^2 - (r'_1 + r'_3)^2} \\ \sqrt{Z_{k14}^2 - (r'_1 + r'_4)^2} \\ \sqrt{4^2 Z_{k123}^2 - (4r'_1 + r'_2 + r'_3)^2} \\ \sqrt{9^2 Z_{k134}^2 - (9r'_1 + r'_3 + 4r'_4)^2} \\ \sqrt{16^2 Z_{k1234}^2 - (16r'_1 + r'_2 + r'_3 + 4r'_4)^2} \\ \sqrt{Z_{k15}^2 - (r'_1 + r'_5)^2} \\ \sqrt{Z_{k16}^2 - (r'_1 + r'_6)^2} \\ \sqrt{Z_{k17}^2 - (r'_1 + r'_7)^2} \\ \sqrt{4^2 Z_{k156}^2 - (4r'_1 + r'_5 + r'_6)^2} \\ \sqrt{9^2 Z_{k167}^2 - (9r'_1 + r'_6 + 4r'_7)^2} \\ \sqrt{16^2 Z_{k1567}^2 - (16r'_1 + r'_5 + r'_6 + 4r'_7)^2} \\ \sqrt{64^2 Z_{k12-7}^2 - (64r'_1 + r'_2 + r'_3 + 4r'_4 + r'_5 + r'_6 + 4r'_7)^2} \\ \sqrt{4^2 Z_{k125}^2 - (4r'_1 + r'_2 + r'_5)^2} \\ \sqrt{4^2 Z_{k136}^2 - (4r'_1 + r'_6 + r'_7)^2} \\ \sqrt{16^2 Z_{k147}^2 - (16r'_1 + 4(r'_4 + r'_7))^2} \\ \sqrt{16^2 Z_{k12356}^2 - (16r'_1 + r'_2 + r'_3 + r'_5 + r'_6)^2} \\ \sqrt{36^2 Z_{k13467}^2 - (36r'_1 + r'_3 + 4r'_4 + r'_6 + 4r'_7)^2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 9 & 0 & 1 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 16 & 1 & 1 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 4 \\ 16 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 4 \\ 64 & 1 & 1 & 4 & 1 & 1 & 4 \\ 4 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 16 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 4 \\ 16 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 36 & 0 & 1 & 4 & 0 & 1 & 4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L'_{\sigma 1} \\ L'_{\sigma 2} \\ L'_{\sigma 3} \\ L'_{\sigma 4} \\ L'_{\sigma 5} \\ L'_{\sigma 6} \\ L'_{\sigma 7} \end{bmatrix}.$$

Система уравнений, описывающая работу семиобмоточного трансформатора, с учетом магнитного потока, все силовые линии которого полностью замыкаются по сердечнику переменными $L_m = 64,0078$ Гн и $r_m = 5167,9$ Ом (определены из опыта холостого хода трансформатора) примет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ -u_7' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_m + r_{\sigma 1} & \cdots & r_m \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_m & \cdots & r_m + r_{\sigma 7}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_p' \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} L_m + L_{\sigma 1} & \cdots & L_m + L_{\sigma 17}' \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L_m + L_{\sigma 71} & \cdots & L_m + L_{\sigma 7}' \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_7' \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где u – вектор размера (7×1) , компонентами которого являются напряжения на обмотках трансформатора, приведенные к числу витков сетевой обмотки; i – вектор размера (7×1) , компонентами которого являются токи, протекающие по обмоткам трансформатора, приведенные к числу витков сетевой обмотки;

$$R = \begin{bmatrix} 5168,2875 & 5167,859 & 5167,859 & 5167,859 & 5167,859 & 5167,859 & 5167,859 \\ 5167,859 & 5167,9958 & 5167,859 & 5167,859 & 5167,859 & 5167,859 & 5167,859 \\ 5167,859 & 5167,859 & 5167,9958 & 5167,859 & 5167,859 & 5167,859 & 5167,859 \\ 5167,859 & 5167,859 & 5167,859 & 5168,1326 & 5167,859 & 5167,859 & 5167,859 \\ 5167,859 & 5167,859 & 5167,859 & 5167,859 & 5167,9958 & 5167,859 & 5167,859 \\ 5167,859 & 5167,859 & 5167,859 & 5167,859 & 5167,859 & 5167,9958 & 5167,859 \\ 5167,859 & 5167,859 & 5167,859 & 5167,859 & 5167,859 & 5167,859 & 5168,1326 \end{bmatrix};$$

$$L = \begin{bmatrix} 64,0078 & 64,0078 & 64,0078 & 64,0078 & 64,0078 & 64,0078 & 64,0078 \\ 64,0078 & 64,0673 & 64,0131 & 64,0089 & 64,0647 & 64,0346 & 63,9839 \\ 64,0078 & 64,0131 & 64,0968 & 63,9751 & 64,0346 & 64,0519 & 63,9833 \\ 64,0078 & 64,0089 & 63,9751 & 64,0477 & 63,9839 & 63,9833 & 64,0465 \\ 64,0078 & 64,0647 & 64,0346 & 63,9839 & 64,0673 & 64,0138 & 64,0086 \\ 64,0078 & 64,0346 & 64,0519 & 63,9833 & 64,0138 & 64,0968 & 63,9751 \\ 64,0078 & 63,9839 & 63,9833 & 64,0465 & 64,0086 & 63,9751 & 64,0477 \end{bmatrix}.$$

Зная коэффициенты при токах, их производных и напряжениях обмоток трансформатора системы уравнений (2), вычислим элементы матриц уравнений динамики и выхода по алгоритму, описанному в [8]:

$$A = \begin{bmatrix} -40,0616 & -24,9550 & -24,6055 & -22,9332 & -24,9513 & -24,6110 & -22,9506 \\ -3,4386 & -5,2878 & -5,0587 & -10,9949 & -5,2010 & -3,8120 & 2,0982 \\ -6,4664 & -9,1813 & -11,4527 & -12,5459 & -7,9377 & -7,1766 & -5,4990 \\ -10,4759 & -17,4205 & -16,1347 & -17,7894 & -10,8734 & -12,6250 & -13,1646 \\ -3,4710 & -5,2451 & -3,8592 & 2,0553 & -5,3429 & -5,0946 & -11,0361 \\ -6,4184 & -7,8694 & -7,1113 & -5,4612 & -9,1079 & -11,3880 & -12,4632 \\ -10,4002 & -10,7710 & -12,5082 & -13,0616 & -17,3161 & -16,0230 & -17,7155 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} -34,3280 & -2,9020 & -5,4572 & -8,8409 & -2,9293 & -5,4167 & -8,7770 \\ 2,9020 & 4,4275 & 2,7523 & 23,0729 & 3,7926 & -6,3604 & -24,7819 \\ 5,4572 & 2,7523 & 19,3563 & 13,6737 & -6,3384 & -11,9023 & -12,0827 \\ 8,8409 & 23,0729 & 13,6737 & 12,8846 & -24,7864 & -11,9821 & -4,0189 \\ 2,9293 & 3,7926 & -6,3384 & -24,7864 & 4,5074 & 2,6928 & 23,0622 \\ 5,4167 & -6,3604 & -11,9023 & -11,9821 & 2,6928 & 19,3605 & 13,6100 \\ 8,7770 & -24,7819 & -12,0827 & -4,0189 & 23,0622 & 13,6100 & 12,9910 \end{bmatrix} \cdot C;$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 25000/315 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 25000/315 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 25000/630 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 25000/315 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 25000/315 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 25000/630 \end{bmatrix}.$$

ТАБЛИЦА 3. Взаимные индуктивности, учитывающие изменение индуктивностей рассеяния обмоток при дискретном переключении нагрузки секций тяговых обмоток

$L'_{\sigma 12}$, мГн	$L'_{\sigma 13}$, мГн	$L'_{\sigma 14}$, мГн	$L'_{\sigma 23}$, мГн	$L'_{\sigma 24}$, мГн	$L'_{\sigma 34}$, мГн
0	0	0	5,3162	1,1393	-32,7306
$L'_{\sigma 15}$, мГн	$L'_{\sigma 16}$, мГн	$L'_{\sigma 17}$, мГн	$L'_{\sigma 56}$, мГн	$L'_{\sigma 57}$, мГн	$L'_{\sigma 67}$, мГн
0	0	0	5,9577	0,8186	-32,7306
$L'_{\sigma 25}$, мГн	$L'_{\sigma 26}$, мГн	$L'_{\sigma 27}$, мГн	$L'_{\sigma 36}$, мГн	$L'_{\sigma 37}$, мГн	$L'_{\sigma 47}$, мГн
56,9486	26,8048	-23,8963	44,1204	-24,5214	38,6811

Реализация предложенной математической модели тягового трансформатора с секционированными вторичными обмотками в среде MATLAB Simulink

Модель трансформатора реализована в среде MATLAB Simulink на базе источника тока и параллельно подключенного измерителя напряжения [7]. Между выходами измерителей напряжения и входами источников тока

включен блок модели динамического объекта State-Space [6], в который занесены элементы матриц A , B , C , $D = Z_{(7 \times 7)}$. Схема компьютерной модели тягового трансформатора представлена на рис. 2.

Адекватность предложенной математической модели тягового трансформатора ОНДЦЭ-5700/25-У2 оценивалась по сопоставлению токов короткого замыкания, полученных из натурных опытов короткого замыкания и путем моделирования. В табл. 4 представле-

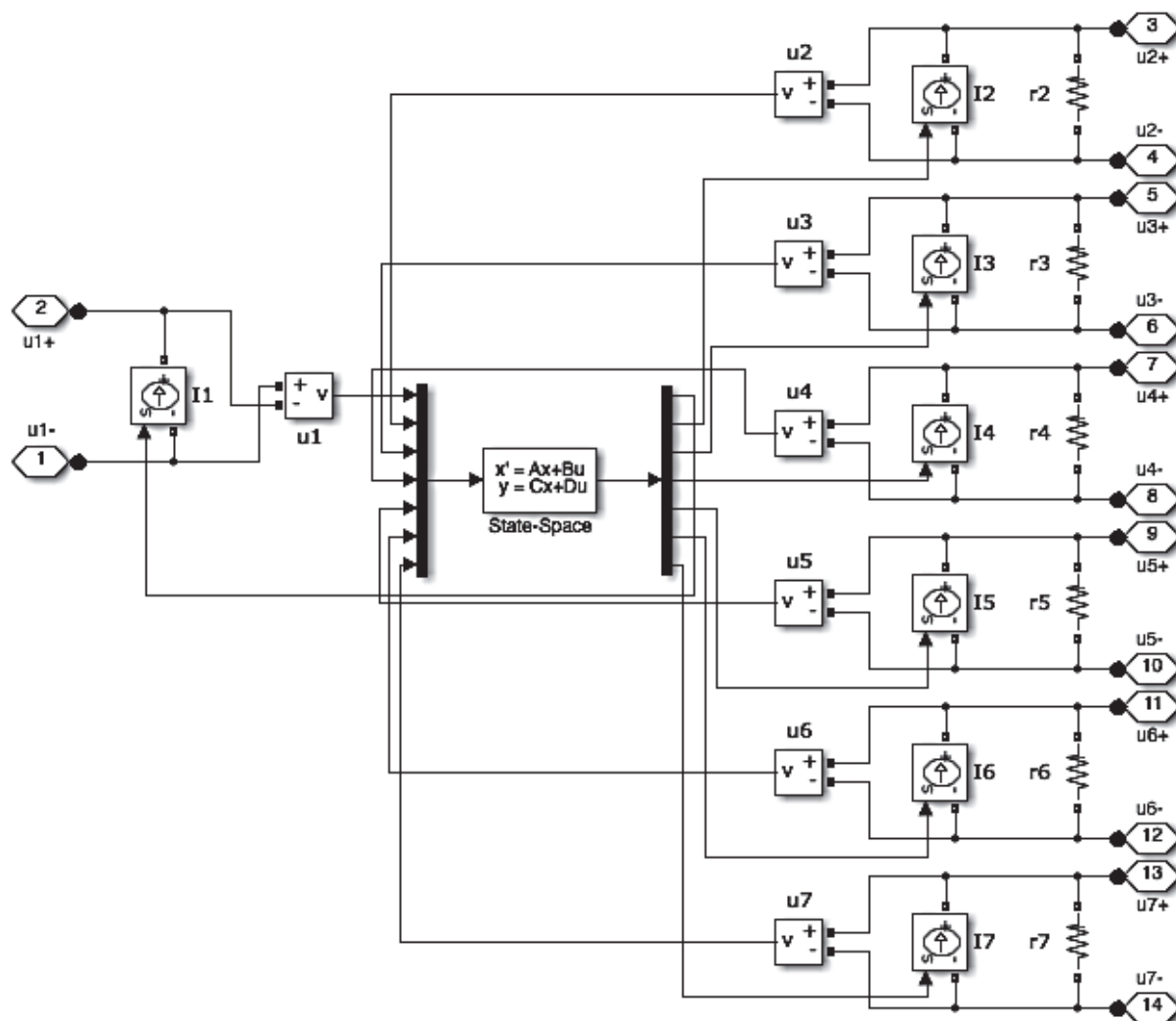


Рис. 2. Компьютерная модель тягового трансформатора

ны результаты моделирования, полученные на математической модели трансформатора state-space model и типовом блоке модели многообмоточного трансформатора multi-winding transformer из библиотеки MATLAB Simulink.

Как видно из табл. 4, типовый блок multi-winding transformer адекватно воспроизводит работу тягового трансформатора в семи опытах короткого замыкания, характеризующихся семью полями рассеяния обмоток, для которых по системе уравнений (1) определена индуктивность рассеяния обмоток $L'_{\sigma p}$, введенная в типовый блок модели многообмоточного трансформатора. В оставшихся опытах короткого замыкания трансформатора расхождение результатов моделирования блока

модели многообмоточного трансформатора с расчетными значениями объясняется тем, что секционированные вторичные обмотки тягового трансформатора в компьютерной модели воспроизводятся только последовательным соединением нескольких отдельных обмоток, при этом индуктивность рассеяния секционированных вторичных обмоток будет равна сумме индуктивности рассеяния отдельных обмоток, что не соответствует действительности.

Заключение

Результаты моделирования опытов короткого замыкания полностью подтверждают

ТАБЛИЦА 4. Результаты моделирования блока multi-winding transformer и state-space model

Опыт короткого замыкания тягового трансформатора	Действующее значение тока сетевой обмотки трансформатора, А			Относительная погрешность, %	
	Расчетное значение	Блок multi-winding transformer	State-space model	Блок multi-winding transformer	State-space model
$(A-X) - TO (a1-1)$	24,822	24,839	24,842	0,069	0,079
$(A-X) - TO (a2-3)$	24,822	24,839	24,842	0,069	0,080
$(A-X) - TO (1-2)$	24,822	24,849	24,851	0,107	0,116
$(A-X) - TO (3-4)$	24,822	24,849	24,850	0,107	0,115
$(A-X) - TO (2-x1)$	49,644	49,665	49,696	0,042	0,105
$(A-X) - TO (4-x2)$	49,644	49,665	49,697	0,042	0,106
$(A-X) - TO (a1-2)$	49,644	51,972	49,669	4,689	0,050
$(A-X) - TO (a2-4)$	49,644	52,251	49,669	5,250	0,050
$(A-X) - TO (1-x1)$	74,466	49,661	74,531	33,310	0,088
$(A-X) - TO (3-x2)$	74,466	49,661	74,531	33,310	0,088
$(A-X) - TO (a1-x1)$	99,288	81,045	99,342	18,374	0,054
$(A-X) - TO (a2-x2)$	99,288	81,045	99,341	18,374	0,054
$(A-X) - TO [(a1-1) + (a2-3)]$	49,644	78,062	49,679	57,243	0,070
$(A-X) - TO [(1-2) + (3-4)]$	49,644	66,647	49,685	34,250	0,082
$(A-X) - TO [(2-x1) + (4-x2)]$	99,288	147,282	99,352	48,338	0,064
$(A-X) - TO [(a1-2) + (a2-x4)]$	99,288	152,672	99,331	53,767	0,044
$(A-X) - TO [(1-x1) + (3-x2)]$	148,932	141,582	148,995	4,935	0,042
$(A-X) - TO [(a1-x1) + (a2-x2)]$	198,576	198,590	198,633	0,007	0,029

адекватность полученных выражений для расчета индуктивности рассеяния обмоток трансформатора и взаимной индуктивности, учитывающей изменение магнитного поля рассеяния обмоток при дискретном переключении нагрузки секций тяговых обмоток.

Если не учитывать изменения индуктивности рассеяния обмоток при дискретном переключении токовой нагрузки на смежные секции тяговых обмоток в типовой компьютерной модели multi-winding transformer, то адекватно воспроизвести переходные процессы в силовых цепях ЭПС можно только для

контуров токовой нагрузки, соответствующим n опытам короткого замыкания трансформатора из $n \cdot (n+1)/2$ возможных.

Библиографический список

1. Васютинский С. В. Вопросы теории и расчета трансформаторов / С. В. Васютинский. – Л. : Энергия, 1970. – 432 с.
2. Власьевский С. В. Повышение эффективности работы выпрямительно-инверторных преобразователей электровозов однофазно-постоянного

тока с рекуперативным торможением : дис. ... д-ра техн. наук / С.В. Власьевский. – М., 2001. – 396 с.

3. Лейтес Л.В. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов / Л.В. Лейтес, А.М. Пинцов. – М. : Энергия, 1974. – 192 с.

4. Стрейц В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления / В. Стрейц ; пер. с англ. ; под ред. Я.З. Цыпкина. – М. : Наука. Физматлит, 1985. – 296 с.

5. Филлипс Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филлипс, Р. Харбор ; пер. с англ. Б.И. Копылова. – М. : Лаборатория базовых знаний, 2001. – 616 с.

6. Черных И.В. Simulink: Инструмент моделирования динамических систем / И.В. Черных. – URL : <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book1/index.php> (дата обращения 06.07.2015).

7. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – СПб. : Питер, 2008. – 288 с.

8. Якушев А.Я. Математическая модель тягового трансформатора с секционированными вторичными обмотками в пространстве состояний / А.Я. Якушев, А.Г. Середа // Изв. ПГУПС. – 2015. – Вып. 4 (45). – С. 78–84.

References

1. Vasyutinskiy S. V. Voprosy teorii i rascheta transformatorov [Issues of Transformer Theory and Calculations]. Leningrad, Energiya, 1970. 432 p.

2. Vlasievskiy S. V. Povysheniye effektivnosti raboty vypryamitelno-invertornykh preobrazovateley elektrovozov odnofazno-postoyannogo toka s reku-perativnym tozmozheniyem [Improving Efficiency of Operation of Reversible Convertors of Single-Phase Direct Current Electric Locomotives with Regenerative Braking: A Dissertation for Doctorate in Engineering]. Moscow, 2001. 396 p.

3. Leytes L. V. & Pintsov A. M. Skhemy zameshcheniya mnogoobmotochnykh transformatorov [Multi-Circuit Transformer Equivalent Circuits]. Moscow, Energiya, 1974. 192 p.

4. Streits V. Metod prostranstva sostoyaniy v teorii diskretnykh lineynykh sistem upravleniya [State Space Method in the Theory of Discrete Linear Control Systems]; ed. Ya. Z. Tsypkin. Moscow, Nauka, Fizmatlit, 1985. 296 p.

5. Fillips Ch. & Kharbor R. Sistemy upravleniya s obratnoy svyazyu [Feedback Control Systems]. Moscow, Laboratoriya bazovykh znaniy, 2001. 616 p.

6. Chernykh I. V. Simulink: Instrument modelirovaniya dinamicheskikh sistem (Simulink: An Instrument for Simulation of Dynamic Systems). MATLAB, Exponenta, available at: <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book1/index.php>.

7. Chernykh I. V. Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems and Simulink [Simulation of Electrical Devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. St. Petersburg, Piter, 2008. 288 p.

8. Yakushev A. Ya. & Sereda A. G. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2015, Is. 4 (45), pp. 78–84.

ЯКУШЕВ Алексей Яковлевич – канд. техн. наук, доцент, профессор, el_tyaga@mail.ru; *СЕРЕДА Александр Геннадьевич – аспирант, ag-sereda@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 519.72

С. О. Вихарев, Е. Т. Мирончиков, М. В. Гофман

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ, УСТОЙЧИВЫХ К СБОЯМ СИНХРОНИЗАЦИИ

Дата поступления: 14.12.2015

Решение о публикации: 28.01.2016

Цель: Построить цифровые водяные знаки, устойчивые к сбоям синхронизации. **Методы:** Описываемые в статье методы относятся к области теории информации и стеганографии. **Результаты:** Предложена методика построения цифровых водяных знаков на основе БЧХ-синхрокодов. Представлены метод встраивания в цифровой аудиосигнал предлагаемых водяных знаков и алгоритм их выделения даже после того, как из аудиосигнала будут удалены некоторые отсчёты. **Практическая значимость:** Представленные в статье цифровые водяные знаки можно использовать в качестве средства для внедрения дополнительной информации в цифровой аудиосигнал так, что даже после удаления некоторых отсчётов аудиосигнала остаётся возможность восстановить внедрённую информацию.

БЧХ-код, синхронизация, цифровой водяной знак, цифровой аудиосигнал.

Sergey O. Vikharev, post-graduate student; **Yevgeny T. Mironchikov**, Dr. Sci. (Eng.), professor; ***Maksim V. Gofman**, Cand. Sci. (Eng.), senior lecturer, maxgof@gmail.com (Petersburg State Transport University) A METHOD FOR BUILDING SYNCHRONISATION FAULT-TOLERANT DIGITAL WATERMARKS

Objective: To build digital watermarks that are tolerant to synchronisation faults. **Methods:** Methods described in the paper fall within the domain of theory of information and steganography. **Results:** A method for building digital watermarks based on BCH codes is proposed. A method for embedding the proposed watermarks in the digital audio signal, and an algorithm for their acquisition even after some readings would be deleted from the audio signal were presented. **Practical importance:** Digital watermarks presented in the paper can be used as a means for introducing additional information into a digital audio signal in a manner that allows restoring embedded information even after deletion of some audio signal readings.

BCH code, synchronisation, digital watermark, digital audio signal.

Цифровые аудиосигналы как объекты, содержащие аудиоинформацию, могут иметь большую ценность. Так, они могут представлять собой результат работы музыкантов

и певцов и быть ориентированы на удовлетворение эстетических потребностей людей или служить вместилищем информации для работы, например, секретарей, журналистов,

следователей, работников служб безопасности и т. д.

Часто цифровые аудиосигналы наделяются дополнительными свойствами, которые позволяют защитить авторские права или внедрить в аудиосигнал цифровой ярлык или тэг. Так, звукозаписывающим компаниям важно, чтобы их юридические права на музыкальное произведение были защищены, а людям, которые работают со звуковой информацией, – чтобы имелась возможность внедрить тэг в цифровой аудиосигнал.

Аудиосигналы представляют собой объекты, допускающие обработку. Их можно сжимать, их части – удалять, изменять или добавлять новые. Из-за этого добавочная информация (от звукозаписывающей компании) или тэги может быть утеряна или искажена, поэтому вопрос встраивания дополнительной информации в цифровые аудиосигналы остается открытым.

Встраивание дополнительной информации в виде цифровых водяных знаков – на сегодня один из основных способов защиты авторских прав или внедрения тэгов. Когда водяные знаки встраиваются в цифровой аудиосигнал последовательно во временной области, тогда при удалении части отсчетов цифрового аудиосигнала невозможно будет определить, где начало и конец водяного знака, т. е. фактически произойдет сбой синхронизации.

Причины сбоев синхронизации могут быть различными. Так, весьма часты сбои при хранении больших объемов аудиоданных на различных носителях, особенно при многократных считываниях. Помимо технических причин сбой синхронизации могут быть следствием действий злоумышленников.

Вопросы применения последовательностей Баркера при построении водяных знаков, устойчивых к сбоям синхронизации, рассматриваются в статьях [2–4]. При этом сами последовательности Баркера не несут никакой полезной информации, а служат лишь для установления синхронизации.

В этой статье описывается методика построения цифровых водяных знаков на осно-

ве БЧХ-синхрокодов [1], которые не только восстанавливают синхронизацию, но и позволяют хранить в себе информацию. Кроме того, предлагается алгоритм их встраивания в цифровой аудиосигнал так, что они не будут слышны человеческому уху.

Сбои синхронизации и синхрокоды

Цифровой аудиосигнал – это последовательность квантованных отсчетов аналогового аудиосигнала. Если из цифрового аудиосигнала пропадет несколько отсчетов, то, скорее всего, человеческое ухо это не отметит. Однако если в такой аудиосигнал были внедрены цифровые водяные знаки, то их считывание станет весьма затруднительным, если вообще возможным, так как искажутся ориентиры для установления синхронизации, по которым можно было бы определить позиции элементов цифрового водяного знака.

В качестве ориентиров обычно используют начала и концы блоков или сегментов, на которые разбивается цифровой аудиосигнал. И тогда при пропаже нескольких первых или последних отсчетов блока удастся восстановить синхронизацию, если, например, не рассматривать оставшиеся отсчеты блока, а ориентироваться на границы соседнего блока. Благодаря этому достаточно определить, сколько отсчетов от блока осталось, чтобы установить начало соседнего блока.

В общем случае цифровой аудиосигнал не обладает никакими специфическими свойствами, на основании которых из него можно было бы выделить блоки, оставшиеся после удаления некоторых отсчетов, поэтому если в обычный цифровой аудиосигнал встроить водяные знаки, неустойчивые к сбоям синхронизации, то их не удастся выделить обратно после манипуляций, приведших к сбоям.

Водяные знаки, устойчивые к сбоям синхронизации, допускают возможность определить, сколько элементов осталось от водяного знака. В качестве инструмента создания таких

водяных знаков в этой статье предлагается использовать БЧХ-синхрокоды.

Для синхрокодового слова можно определить, сколько элементов с начала или с конца было потеряно, конечно, если это число не больше некоторого порогового значения, зависящего от применяемого синхрокода. Если встраивать элементы синхрокодовых слов в каждый отсчёт цифрового аудиосигнала, то при выпадении нескольких отсчётов сигнала пропадёт и несколько элементов синхрокодового слова, а значит, если применить методику вычисления сдвига синхронизации к оставшимся элементам синхрокодового слова, то удастся определить, сколько отсчётов из рассматриваемого блока осталось и где начало следующего блока, в котором будет ещё один водяной знак.

Для синхрокодов определяют два вида сбоев синхронизации: потерю и избыток. Пусть есть два синхрокодовых слова:

$$c_1 = (c_{1,n-1} \quad c_{1,n-2} \quad \dots \quad c_{1,0});$$

$$c_2 = (c_{2,n-1} \quad c_{2,n-2} \quad \dots \quad c_{2,0}),$$

которые, соответственно, в полиномиальной форме выглядят так:

$$c_k(x) = \sum_{i=0}^{n-1} c_{k,i} x^i.$$

А также пусть эти кодовые слова передаются так, что их элементы образуют последовательность

$$\alpha = c_{1,n-1}, c_{1,n-2}, \dots, c_{1,0}, c_{2,n-1}, c_{2,n-2}, \dots, c_{2,0}.$$

Потерей синхронизации в r символов является ситуация, когда теряются первые r символов последовательности α . В этом случае вместо первого кодового слова c_1 получится вектор

$$(c_{1,n-r-1} \quad c_{1,n-r-2} \quad \dots \quad c_{1,0} \quad c_{2,n-1} \quad c_{2,n-2} \quad \dots \quad c_{2,n-r}).$$

Избытком синхронизации в r символов является ситуация, когда теряются последние r

символов последовательности α . Тогда вместо второго кодового слова c_2 получится вектор

$$(c_{1,r-1} \quad c_{1,r-2} \quad \dots \quad c_{1,0} \quad c_{2,n-1} \quad c_{2,n-2} \quad \dots \quad c_{2,r}).$$

Синхрокоды можно построить разными способами. Наиболее просты, эффективны и исследованы с точки зрения свойств восстановления синхронизации синхрокоды, построенные на основе кодов БЧХ.

Синхрокоды на основе кодов БЧХ

Перед построением кодовых слов таких синхрокодов создают подходящий код БЧХ. Синхрокод является смежным классом БЧХ-кода. Смежный класс получается прибавлением сдвигающего полинома к каждому кодовому слову БЧХ-кода. Сдвигающий полином не должен делиться на x , а значит, его свободный член не должен быть равен нулю.

Как и всякий блочный код, синхрокод на основе БЧХ-кода имеет ряд основных параметров. Это, в первую очередь, длина n кодового слова, число k исходных информационных символов, а также максимальная величина произошедшего сдвига r_c , который ещё можно выявить посредством синхрокода. Величина r_c определяется по формуле

$$r_c = \left\lfloor \frac{n-k-s-1}{2} \right\rfloor,$$

где $[a]$ – целая часть числа a ; s – степень сдвигающего полинома.

Алгоритм построения синхрокодового слова на основе БЧХ-кода

Входные данные: порождающий полином $g(x)$ БЧХ-кода и информационный полином $m(x)$.

Выходные результаты: синхрокодовое слово $c(x)$ в полиномиальной форме.

1. Умножение информационного полинома на порождающий полином $g(x)$:

$$c_{\text{БЧХ}}(x) = m(x)g(x).$$

2. Задание смещающего полинома $p(x)$.

3. Сложение результата 3-го шага со смещающим полиномом, масштабированным x^{-1} :

$$c(x) = c_{\text{БЧХ}}(x) + x^{-1}p(x).$$

На практике вместо полинома x^{-1} обычно используется полином $w(x)$, который является обратным к полиному x^{-1} по модулю порождающего полинома $g(x)$ над полем $GF(2)$:

$$((x^{-1}w(x)) \bmod g(x)) \bmod 2 = 1.$$

Алгоритм определения величины сдвига синхронизации

Входные данные: полином

$$c'(x) = \sum_{i=1}^n c'_i x^{i-1},$$

который в отсутствие сбоев синхронизации представляет собой синхрокодовое слово.

Выходные значения: величина потери синхронизации $r_{\text{потеря}}$ и величина избытка синхронизации $r_{\text{избыток}}$.

1. Вычитание смещающего полинома из полинома $c'(x)$:

$$r_1(x) = (c'(x) - x^{-1}p(x)) \bmod 2.$$

2. Умножение на одночлен степени $r_c + 1$:

$$r_2(x) = x^{r_c+1} r_1(x).$$

3. Получение остатка от деления полинома $r_2(x)$ на порождающий полином:

$$r_3(x) = r_2(x) \bmod g(x).$$

4. Определение максимальной d_{max} и минимальной d_{min} степеней членов полинома $r_3(x)$:

$$d_{\text{max}} = \deg_{\text{max}} r_3(x) \text{ и } d_{\text{min}} = \deg_{\text{min}} r_3(x),$$

где $\deg_{\text{max}} a(x)$ и $\deg_{\text{min}} a(x)$ – это максимальная и минимальная степени членов полинома $a(x)$, соответственно. Таким образом, d_{max} – это наивысшая степень ненулевого слагаемого полинома $r_3(x)$, а d_{min} – это низшая степень ненулевого слагаемого полинома $r_3(x)$.

5. Если $d_{\text{max}} > r_c + s$, то произошла потеря синхронизации, в этом случае

$$r_{\text{потеря}} = d_{\text{max}} - r_c - s.$$

Если же $d_{\text{min}} < r_c$, то произошёл избыток синхронизации, в этом случае

$$r_{\text{избыток}} = r_c - d_{\text{min}}.$$

Если $r_3(x) = 0$, то сбой синхронизации не было, а $c'(x)$ – это синхрокодовое слово, в этом случае

$$r_{\text{потеря}} = r_{\text{избыток}} = 0.$$

Пример определения величины сдвига при помощи синхрокода

В качестве основы для синхрокода используем БЧХ-код со следующими параметрами: длина кодового слова $n = 63$, число информационных символов $k = 30$. Порождающий полином

$$\begin{aligned} g(x) = & 1 + x + x^2 + x^5 + x^6 + x^8 + \\ & + x^9 + x^{11} + x^{13} + x^{14} + x^{15} + x^{20} + \\ & + x^{22} + x^{23} + x^{26} + x^{27} + x^{28} + \\ & + x^{29} + x^{30} + x^{32} + x^{33}. \end{aligned}$$

Смещающий полином $p(x) = x + 1$; значит, $s = 1$. Синхрокод с такими параметрами позволяет определить величину сдвига синхронизации вплоть до

$$r_c = \left\lfloor \frac{n-k-s-1}{2} \right\rfloor = 15.$$

При построении синхрокодовых слов для рассматриваемого случая вместо x^{-1} удобно использовать полином

$$\begin{aligned} w(x) = & 1 + x + x^4 + x^5 + x^7 + \\ & + x^8 + x^{10} + x^{12} + x^{13} + x^{14} + \\ & + x^{19} + x^{21} + x^{22} + x^{25} + x^{26} + \\ & + x^{27} + x^{28} + x^{29} + x^{31} + x^{32}. \end{aligned}$$

Пусть есть два синхрокодовых слова. Первое синхрокодовое слово имеет полиномиальную форму

$$\begin{aligned} c_1(x) = & (m_1(x)g(x) + \\ & + w(x)p(x)) \bmod 2 = \sum_{i=0}^{62} c_{1,i}x^i = \\ = & x^3 + x^{11} + x^{12} + x^{13} + x^{16} + x^{17} + \\ & + x^{18} + x^{20} + x^{21} + x^{22} + x^{23} + x^{25} + \\ & + x^{26} + x^{28} + x^{30} + x^{32} + x^{33} + x^{35} + \\ & + x^{38} + x^{41} + x^{42} + x^{44} + x^{50} + x^{51} + \\ & + x^{53} + x^{54} + x^{55} + x^{57} + x^{59} + x^{62}, \end{aligned}$$

где $m_1(x) = \sum_{i=0}^{29} x^i$.

Второе синхрокодовое слово в форме полинома выглядит так:

$$\begin{aligned} c_2(x) = & (m_2(x)g(x) + \\ & + w(x)p(x)) \bmod 2 = \sum_{i=0}^{62} c_{2,i}x^i = \\ = & 1 + x^2 + x^3 + x^4 + x^5 + x^{11} + x^{13} + \\ & + x^{15} + x^{16} + x^{18} + x^{22} + x^{23} + x^{29} + \\ & + x^{32} + x^{33} + x^{38} + x^{41} + x^{42} + x^{44} + \\ & + x^{50} + x^{51} + x^{53} + x^{54} + x^{55} + x^{57} + \\ & + x^{59} + x^{62}, \end{aligned}$$

где $m_2(x) = \sum_{i=3}^{29} x^i$.

Предположим, что кодовые слова поэлементно передаются в канал, начиная со старших степеней, а также что первым передаётся первое кодовое слово $c_1(x)$, потом второе кодовое слово $c_2(x)$. Таким образом, в канал будет передаваться последовательность

$$c_{1,62}, c_{1,61}, \dots, c_{1,0}, c_{2,62}, c_{2,61}, \dots, c_{2,0}.$$

Рассмотрим две ситуации: потерю и избыток синхронизации. При любом из этих сбоев синхронизации блок в полиномиальной форме, для которого будет вычисляться величина сдвига, вместо целого кодового слова будет содержать сумму из слагаемых первого и второго кодового слова.

Пусть произошла потеря синхронизации на величину сдвига $r = 3$. Значит, из первого кодового слова пропали три слагаемых наивысших степеней. Таким образом, вместо первого кодового слова получится вектор:

$$(c_{1,59} \quad c_{1,58} \quad \dots \quad c_{1,0} \quad c_{2,62} \quad c_{2,61} \quad c_{2,60}),$$

который в полиномиальной форме будет таким:

$$\begin{aligned} c'(x) = & \sum_{i=r}^{62} c_{1,i-r}x^i + \sum_{i=0}^{r-1} c_{2,62-i}x^{r-i-1} = \\ = & x^2 + x^6 + x^{14} + x^{15} + x^{16} + x^{19} + \\ & + x^{20} + x^{21} + x^{23} + x^{24} + x^{25} + x^{26} + \\ & + x^{28} + x^{29} + x^{31} + x^{33} + x^{35} + x^{36} + x^{38} + \\ & + x^{41} + x^{44} + x^{45} + x^{47} + x^{53} + x^{54} + \\ & + x^{56} + x^{57} + x^{58} + x^{60} + x^{62}. \end{aligned}$$

В соответствии с алгоритмом определения величины сдвига получим полином

$$r_3(x) = ((x^{r_c+1}(c'(x) - w(x) \times p(x))) \bmod g(x)) \bmod 2 = x^{15} + x^{16} + x^{18} + x^{19}.$$

По полиному $r_3(x)$ видно, что $d_{\max} = 19$, а $d_{\min} = 15$. Следовательно, выполняется нера-

венство $d_{\max} > r_c + s$, поэтому рассматриваемый сбой синхронизации представляет собой потерю синхронизации с величиной сдвига $r_{\text{потеря}} = d_{\max} - r_c - s = 3$, тогда как $r_{\text{избыток}} = r_c - d_{\min} = 0$.

Пусть возник избыток синхронизации на величину сдвига $r = 5$. Значит, из второго кодового слова пропали 5 слагаемых низших степеней. Таким образом, вместо второго кодового слова получится вектор:

$$(c_{1,4} \ c_{1,3} \ c_{1,2} \ c_{1,1} \ c_{1,0} \ c_{2,62} \ c_{2,61} \ \dots \ c_{2,5}),$$

который в полиномиальной форме будет таким:

$$\begin{aligned} c'(x) &= \sum_{i=0}^{r-1} c_{1,r-i-1} x^{62-i} + \sum_{i=r}^{62} c_{2,i} x^{i-r} = \\ &= 1 + x^6 + x^8 + x^{10} + x^{11} + x^{13} + x^{17} + \\ &+ x^{18} + x^{24} + x^{27} + x^{28} + x^{33} + x^{36} + \\ &+ x^{37} + x^{39} + x^{45} + x^{46} + x^{48} + x^{49} + \\ &+ x^{50} + x^{52} + x^{54} + x^{57} + x^{61}. \end{aligned}$$

В соответствии с алгоритмом определения величины сдвига получим полином

$$\begin{aligned} r_3(x) &= ((x^{r_c+1}(c'(x) - w(x)z(x))) \times \\ &\times \text{mod } g(x)) \text{mod } 2 = x^{10} + x^{13} + x^{16}. \end{aligned}$$

По полиному $r_3(x)$ видно, что $d_{\max} = 16$, а $d_{\min} = 10$. Следовательно, выполняется неравенство $d_{\min} < r_c$, значит, возник избыток синхронизации с величиной сдвига $r_{\text{избыток}} = 5$, тогда как $r_{\text{потеря}} = 0$.

Рассмотренный БЧХ-синхрокод (63,30) позволяет верно определить не только величину сдвига вплоть до $r_c = 15$, но и вид сбоя синхронизации. Так, если произошла потеря синхронизации со сдвигом на $1 \leq r \leq r_c$, то $r_{\text{избыток}} = 0$, тогда как $r_{\text{потеря}} = r$; то же самое можно сказать о ситуации, когда возник избыток синхронизации, только в этом случае будет $r_{\text{потеря}} = 0$.

Метод встраивания водяного знака в цифровой аудиосигнал

Цифровой аудиосигнал, т.е. последовательность квантованных отсчётов аналогового аудиосигнала, можно представлять в виде вектора. В общем случае любой отсчёт цифрового аудиосигнала может быть утерян, поэтому для устойчивости водяного знака к сбоям синхронизации синхрокодовое слово, являющееся водяным знаком, полезно внедрять в цифровой аудиосигнал так, чтобы каждый элемент вектора, описывающего аудиосигнал, содержал часть синхрокодового слова.

Один из вариантов встраивания водяного знака – это изменение младших разрядов значения отсчёта цифрового аудиосигнала в соответствии со встраиваемым значением. Пусть есть водяной знак, представляющий собой БЧХ-синхрокодовое слово c :

$$c = (c_0 \ \dots \ c_{n-1}),$$

где $c_i \in \{0,1\} \forall i \in \{0, \dots, n-1\}$, а цифровой аудиосигнал пусть представляет собой вектор

$$y = (y_1 \ \dots \ y_N),$$

где $y_i \in \{0, \dots, 2^{16} - 1\} \forall i \in \{1, \dots, N\}$. Предположим, что длина N вектора y кратна длине n синхрокодового слова:

$$N = kn,$$

где k – это целое положительное число. В этом случае вектор y можно разделить на k векторов, длина которых равна длине синхрокодового слова. Далее такие «подвекторы» будем называть блоками, или сегментами цифрового аудиосигнала.

Так как длина вектора y кратна длине синхрокодового слова, изменение младшего бита i -го элемента вектора y на битовое значение j -го элемента вектора c можно выполнить так:

$$y'_i = (y_i - (y_i \bmod 2)) + c_j$$

при $j = (i - 1) \bmod n$,

где $i \in \{1, \dots, N\}$, а $\bmod b$ – это остаток от деления числа a на число b . Из чисел y'_i можно составить вектор

$$y' = (y'_1 \quad \dots \quad y'_N),$$

который будет описывать цифровой аудиосигнал, содержащий водяной знак c в каждом своём сегменте.

Алгоритм выделения двоичных синхрокодовых слов из аудиофайла

Входные данные: вектор $y_B = (y_{B,1} \dots y_{B,N'})$ где $y_{B,i}$ – целые числа; $N' \geq n$, n – длина синхрокодового слова.

Выходные данные: множество C выделенных синхрокодовых слов, представленных в виде битовых векторов.

1. Присвоить вектору c первые n значений вектора y_B :

$$c \leftarrow (\text{МлБит}(y_{B,1}) \quad \dots \quad \text{МлБит}(y_{B,n})),$$

где МлБит (a) – значение младшего бита целого числа a .

2. Присвоить переменной i значение 1:

$$i \leftarrow 1.$$

3. В соответствии с описанным ранее алгоритмом по вектору c определить пару чисел $(r_{\text{избыток}}, r_{\text{потеря}})$.

4. Если $(r_{\text{потеря}}, r_{\text{избыток}}) = (0, 0)$, то перейти к шагу 5. Если $(r_{\text{потеря}}, r_{\text{избыток}}) = (r, 0)$, при этом $1 \leq r \leq r_c$, то перейти к шагу 6. Если $(r_{\text{потеря}}, r_{\text{избыток}}) = (0, r)$, при этом $1 \leq r \leq r_c$, то перейти к шагу 7. Если $(r_{\text{потеря}}, r_{\text{избыток}}) = (r, r')$, то перейти к шагу 8.

5. Сбоя синхронизации не было, а значит вектор c – синхрокодовое слово (в векторной форме). Добавить его в множество C . Присвоить переменной i значение $i + n$:

$$i \leftarrow i + n;$$

перейти к шагу 9.

6. Произошла потеря синхронизации. Присвоить переменной i значение $i + n - r$:

$$i \leftarrow i + n - r;$$

перейти к шагу 9.

7. Возник избыток синхронизации. Присвоить переменной i значение $i + r$:

$$i \leftarrow i + r;$$

перейти к шагу 9.

8. Присвоить переменной i значение $i + 1$:

$$i \leftarrow i + 1;$$

перейти к шагу 9.

9. Если $N' - i \geq n$, то присвоить вектору c элементы вектора y_B с i по $i + n - 1$:

$$c \leftarrow (\text{МлБит}(y_{B,i}) \quad \dots \quad \text{МлБит}(y_{B,i+n-1}));$$

перейти к шагу 3; иначе, если $N' - i < n$, то **ОСТАНОВ**.

Пример восстановления данных после атаки «вырезание»

Пусть в соответствии с описанным методом цифровой водяной знак c был встроен в аудиосигнал y , в результате был получен аудиосигнал y' .

Теперь пусть на цифровой аудиосигнал y' была выполнена атака «вырезание», т. е. было удалено несколько отсчётов аудиосигнала, в результате которой получился аудиосигнал

$$y_B = (y_{B,1} \quad \dots \quad y_{B,N'}),$$

где $N' \geq n$; n – длина синхрокодового слова. Применив алгоритм выделения синхрокодовых слов к вектору y_B , получим множество

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_K\},$$

где K – количество выделенных синхрокодовых слов; c_k ($k \in \{1, 2, \dots, K\}$) – битовый вектор длиной n , представляющий собой синхροкодовое слово.

Пусть первый элемент вектора c_k – это коэффициент при старшей степени полиномиальной формы соответствующего синхрокодового слова, а последний его элемент – свободный член полиномиальной формы. Таким образом, если синхрокодовое слово в векторной форме $c_k = (c_{k,1} \dots c_{k,n})$, то в полиномиальной форме синхрокодовое слово будет

$$c_k(x) = \sum_{i=1}^n c_{k,i} x^{n-i}.$$

Теперь, если вычесть из каждого полинома $c_k(x)$ сдвигающий полином $x^{-1}p(x)$, а затем к разности применить БЧХ-декодирование, получится множество информационных полиномов $\{m_1(x), m_2(x), \dots, m_K(x)\}$.

Следует отметить, что из-за атаки «вырезание» синхрокодовые слова c_k в общем случае могут не совпасть с исходным водяным знаком c . Значит, информационные полиномы $m_k(x)$ также в общем случае могут не совпасть с исходным информационным полиномом $m(x)$.

Заключение

Рассмотрен метод построения цифровых водяных знаков на основе БЧХ-синхрокодов. Приведены примеры вычисления сдвигов синхронизации при разных видах сбоев синхронизации. Предложен такой алгоритм встраивания в цифровой аудиосигнал представленных водяных знаков, который позволяет использовать их устойчивость к сбоям синхронизации и противостоять атаке «вырезание» во временной области. Предложен алгоритм вос-

становления данных после атаки «вырезание», осуществлённой по отношению к аудиосигналу с представленными цифровыми водяными знаками.

Биографический список

1. Питерсон У. У. Коды, исправляющие ошибки : моногр. / У. У. Питерсон, Э. Уэлдон. – М. : Мир, 1976. – 594 с.
2. Huang J. A blind audio watermarking algorithm with self-synchronization / J. Huang, Yo. Wang, Yu.Q. Shi // *IEEE Int. Symp. Circuits Syst.* – 2002. – Vol. 3. – P. 627–630.
3. Wang X.-Ya. A Novel Synchronization Invariant Audio Watermarking Scheme Based on DWT and DCT / X.-Ya. Wang, H. Zhao // *IEEE Trans. Signal Proc.* – 2006. – Vol. 54, Is. 12. – P. 4835–4840.
4. Wu Sh. Efficiently self-synchronized audio watermarking for assured audio data transmission / Sh. Wu, J. Huang, D. Huang, Y.Q. Shi // *IEEE Trans. Broadcast.* – 2005. – Vol. 51, Is. 1. – P. 69–76.

References

1. Piterson U. U. & Ueldon E. Kody, ispravlyayushchiye oshibki: monografiya [Error-Correcting Codes]. Moscow, Mir, 1976. 594 p.
2. Huang J., Wang Yo. & Shi Yu.Q. A blind audio watermarking algorithm with self-synchronization. *IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, 2002, Vol. 3. Pp. 627–630.
3. Wang X.-Ya. & Zhao H. A Novel Synchronization Invariant Audio Watermarking Scheme Based on DWT and DCT. *IEEE Trans. Signal Proc.*, 2006. Vol. 54, Is. 12, pp. 4835–4840.
4. Wu Sh., Huang J., Huang D. & Shi Y.Q. Efficiently self-synchronized audio watermarking for assured audio data transmission. *IEEE Trans. Broadcast.*, 2005. Vol. 51, Is. 1, pp. 69–76.

ВИХАРЕВ Сергей Олегович – аспирант; МИРОНЧИКОВ Евгений Тимофеевич – д-р. техн. наук, профессор; *ГОФМАН Максим Викторович – канд. техн. наук, ст. преподаватель, maxgof@gmail.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 556.5.06

Ю. А. Канцибер, А. Б. Пономарев**РАСЧЕТЫ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА СИСТЕМ
ВОДООТВЕДЕНИЯ НА СЕЛИТЕБНЫХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
ТЕРРИТОРИЯХ СЕВЕРО-ЗАПАДА РФ**

Дата поступления: 21.12.2015

Решение о публикации: 09.02.2016

Цель: Обосновать способы оценки расчетных расходов и объемов загрязненного талого и дождевого стока воды для систем водоотведения на селитебных и производственных территориях применительно к условиям Северо-Запада РФ. **Методы:** Использован статистический метод обобщений и аналогий. За основу приняты нормативно-методические документы и данные о природных условиях территории. **Результаты:** Получены и обоснованы способы оценки расчетных расходов и объемов загрязненного талого и дождевого стока воды. **Практическая значимость:** Полученные данными способами расчетные гидрологические характеристики могут быть использованы для решения прикладных задач, в первую очередь, для расчета параметров систем водоотведения (ливневой, бытовой и производственной канализации, очистных сооружений) при новом строительстве и реконструкции.

Застроенная территория, система водоотведения, гидрологическая характеристика, талый сток, дождевой сток, расчетный расход, объем стока.

Yuriy A. Kantsiber, Cand. Sci. (Eng.), senior researcher, associate professor, kanziber3@yandex.ru, ***Andrey B. Ponomarev**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, pol1nom@yandex.ru (Petersburg State Transport University) CALCULATION OF CHARACTERISTICS OF SURFACE DRAINAGE IN WATER DISPOSAL SYSTEMS IN HABITABLE AND PRODUCTION TERRITORIES IN NORTH-WEST RUSSIAN FEDERATION

Objective: To justify methods of evaluation of calculated flow rates and volumes of polluted snowmelt and stormwater run-off for water disposal systems in habitable and production territories relating to the conditions of north-west Russian Federation. **Methods:** A statistical method of generalisation and analogy was applied. Regulatory and procedural guidelines and data regarding natural conditions of the territory are taken as a basis. **Results:** Methods for evaluation of calculated flow rates and volumes of polluted snowmelt and stormwater run-off were obtained and justified. **Practical importance:** Calculated hydrological characteristics obtained in this manner can be used to solve applied tasks, primarily to calculate parameters of water disposal systems (stormwater, domestic and industrial sewage, treatment facilities) in new construction and reconstruction.

Built-up territory, water disposal system, hydrological characteristic, snowmelt run-off, stormwater run-off, calculated flow rate, run-off volume.

Система водоотведения (СВ) предназначена для сбора, отведения и очистки поверхностных, дренажных, бытовых и производственных сточных вод с застраиваемых и застроенных селитебных и производственных территорий (ЗТ), в том числе с объектов железных и автомобильных дорог.

Гидрологические характеристики стока воды с ЗТ необходимо рассчитывать:

- для обоснования конструкций и параметров систем водоотведения (ливневой, бытовой и производственной канализации, очистных сооружений) при новом строительстве и реконструкции;

- при водохозяйственных балансовых вычислениях по учету объемов сбросных вод;
- для оценки предельно допустимых сбросов воды в реки-водоприемники и необходимой степени очистки поверхностных и сточных вод с ЗТ;
- при разработке проектов нормативов допустимых сбросов сточных вод и платы за них различными водопользователями.

Загрязненный поверхностный сток с ЗТ, как и речной сток в водоприемнике, имеет существенные особенности формирования в течение года, поэтому гидрологические характеристики СВ надо определять отдельно для весеннего половодья, дождевых паводков и меженных периодов.

К основным гидрологическим характеристикам СВ следует отнести расчетные расходы и объемы поверхностного, дренажного, бытового и производственного стока воды с ЗТ, а также речного стока в водоприемнике.

Способы расчетов гидрологических характеристик СВ должны основываться на действующих нормативно-методических документах, учитывать природные условия водосбора (района) и особенности ЗТ. При этом используются различные данные по климату, свойствам и литологии грунтов, гидрологическим и гидрогеологическим наблюдениям, конструкциям и параметрам СВ и другие, содержащиеся в справочных материалах, нормативно-методических документах, гидрологических ежегодниках, проектах строительства (реконструкции) СВ и пр.

Способы расчета характеристик поверхностного стока

К поверхностным сбросным водам относят загрязненную талую, дождевую и поливную воду, стекающую с ЗТ непосредственно в водный объект или отводимую в него системой водоотведения [7].

Талые воды с ЗТ, поступающие в СВ и (или) непосредственно в водный объект при

таянии снега, формируют зимние паводки и весеннее половодье.

По данным [11], средняя продолжительность оттепелей в Северо-Западной зоне РФ (СЗ РФ), которые наблюдаются при неустойчивых морозах и снежном покрове в северных районах, как правило, в ноябре – первой половине декабря, а в южных и юго-западных – в ноябре – первой половине января, составляет 3–5 сут (табл. 1). При этом число зимних оттепелей уменьшается в северо-восточном направлении от 3–5 до 2–3.

Средний слой стока талых вод в период зимней оттепели достигает 3–4 мм, а в отдельные «теплые» зимы – 4–6 и более мм.

Однако максимальный талый сток с ЗТ наблюдается в весенний период при таянии накопленных за зиму запасов снега. Средний из наибольших запасов воды в снеге перед весенним снеготаянием в СЗ РФ изменяется от 80 до 140 мм (табл. 1), уменьшаясь в районах, прилегающих к крупным водоемам.

Температура воздуха на ЗТ весной в среднем на 1–2 °С выше, чем в пригородах (в естественных условиях). Это обстоятельство наряду с большей загрязненностью снежного покрова предопределяет более ранние сроки снеготаяния на ЗТ. Начало таяния снега на ЗТ наблюдается после прекращения устойчивых морозов, а сток талых вод из водонасыщенного снежного покрова – при переходе температуры воздуха примерно через –2...–3 °С (табл. 1). Средняя продолжительность склонового стока талых вод составляет 10–15 сут., возрастая до 15–20 сут. в многоводные годы (при больших снеговых запасах) повторяемостью 1 раз в 5–10 лет ($p = 10\text{--}20\%$). Таким образом, более короткий период снеготаяния и стока талых вод наблюдается, как правило, при меньших снеговых запасах на ЗТ.

Расчетный расход талых вод с ЗТ (среднесуточный за период весеннего снеготаяния) определяется по формуле

$$Q_{\text{тв}} = 10 \cdot \frac{H_{\text{с}}}{t_{\text{с}}} \cdot \varphi_t \cdot F \cdot K, \text{ м}^3/\text{сут.}, \quad (1)$$

ТАБЛИЦА 1. Климатические характеристики холодного периода года в Северо-Западной зоне РФ

Пункт (метеостан- ция)	Даты зимы	Дата наступления устойчивых морозов	Сумма осадков за зиму, мм	Запасы воды в снеге, мм	Дата прекращения устойчивых морозов	Дата перехода температуры воздуха весной выше	
						–2 °С	0 °С
Лоухи	19.10–23.04	13.11	172	201	30.03	13.04	23.04
Паданы	28.10–15.04	20.11	145	100	24.03	06.04	15.04
Пудож	26.10–09.04	26.11	160	110	20.03	01.04	09.04
Олонец	04.11–11.04	06.12	190	130	19.03	01.04	11.04
С.-Петербург	12.11–03.04	07.12	167	80	10.03	23.03	03.04
Тихвин	04.11–04.04	29.11	188	110	10.03	24.03	04.04
Николаевская	09.11–02.04	05.12	170	80	03.03	21.03	02.04
Веребье	03.11–01.04	02.12	230	140	07.03	20.03	01.04
Новгород	08.11–03.04	10.12	154	70	10.03	23.03	03.04
Боровичи	04.11–03.04	30.11	140	90	12.03	24.03	03.04
Валдай	03.11–05.04	27.11	183	100	14.03	25.03	05.04
Псков	13.11–01.04	12.12	138	70	08.03	20.03	01.04
Дно	11.11–31.03	07.12	164	80	07.03	19.03	31.03
Идрица	13.11–01.03	11.12	158	80	08.03	19.03	31.03

Примечания. 1. Датам начала и окончания зимы соответствуют даты перехода температуры воздуха ниже и выше 0 °С. 2. Запасы воды в снеге – средние из наибольших перед снеготаянием.

где H_c – среднееголетний из наибольших перед снеготаянием запас воды в снеге, мм; принимается по данным [8, 11], а для отдельных пунктов СЗ РФ – по табл. 1; t_c – средняя продолжительность снеготаяния, сут.; φ_t – коэффициент стока талых вод в весенний период; F – площадь ЗТ, га; $K = 0,6–0,8$ – коэффициент, учитывающий частичный вывоз и окучивание снега на ЗТ.

Коэффициент стока талых вод в весенний период φ_t , учитывающий потери на заполнение понижений рельефа и испарение воды (инфильтрация в промерзшие грунты считается практически отсутствующей), определяется в виде средневзвешенной величины из частных значений с различным видом поверхности согласно данным [1, 5] или при-

нимается ориентировочно для ЗТ в пределах 0,6–0,8.

Так как в течение суток талый сток продолжается в среднем от 5 до 10 ч, то среднечасовой расход талых вод ($\text{м}^3/\text{ч}$) составит

$$Q_{\text{ТВ(час)}} = \frac{Q_{\text{ТВ}}}{t_{\text{час}}},$$

где $t_{\text{час}}$ – средняя продолжительность стока в сутках, ч.

Расчетный секундный $Q_{\text{ТВ(с)}}$ расход талых вод с ЗТ будет равен

$$Q_{\text{ТВ(с)}} = \frac{Q_{\text{ТВ(час)}}}{3600} \cdot 10^3, \text{ л/с.}$$

Максимальный расход талых вод в замыкающем створе водосбора ЗТ площадью менее 100 га, соответствующий максимальной часовой интенсивности снеготаяния весной, рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{мтв}} = K_p \cdot A_{\text{max(час)}} \cdot \varphi_t \cdot F, \text{ л/с},$$

где $K_p = 2,8$ – коэффициент размерности, принятой для часовой интенсивности снеготаяния и площади водосбора в га; $A_{\text{max(час)}}$ – максимальная среднемноголетняя часовая интенсивность снеготаяния, принимается по данным [9] для СЗ РФ равной 3–5 мм/ч.

Максимальный расход талых вод в замыкающем створе водосбора ЗТ площадью более 1 км² (100 га) определяется по редуциционной формуле [10] при $\mu \approx \delta \approx \delta_1 \approx \delta_2 \approx \delta_3 \approx 1$ и $h_b = H_c \cdot \varphi_t \cdot K$:

$$Q_{\text{мтв}} = \frac{K_0 \cdot h_b \cdot F_{\text{км}}}{(F_{\text{км}} + b)^n}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где K_0 – параметр, характеризующий дружность половодья, принимаемый по данным рек-аналогов или приближенно по справочнику [6] для СЗ РФ в пределах 0,006–0,008; $F_{\text{км}}$ – площадь водосбора, км²; n, b – эмпирические параметры редукиции максимального стока талых вод в зависимости от площади водосбора; принимаются для равнинных рек СЗ РФ равными $n = 0,17$; $b = 1$ [6].

Расчетный объем стока талых вод в весенний период снеготаяния определяется по формуле

$$W_{\text{тв}} = Q_{\text{тв}} \cdot t_c, \text{ м}^3.$$

Объем стока талых вод в периоды зимних оттепелей приближенно равен

$$W_{\text{то}} = 10 \cdot (X_0 - H_c) \cdot \varphi_0 \cdot F \cdot K, \quad (2)$$

где X_0 – сумма осадков за зимний период, мм; принимается по данным [8, 11] или для СЗ РФ – по табл. 1; φ_0 – коэффициент стока талых вод в период оттепелей; принимается для

ЗТ ориентировочно 0,4–0,5. Так как в период оттепелей наблюдается инфильтрация талых вод, как правило, в слабопромерзшие или не промерзшие грунты открытых площадей ЗТ, коэффициент стока в эти периоды будет примерно на 40–60% меньше, чем при весеннем снеготаянии.

Суммарный объем стока талых вод в холодный период года складывается из объема стока талых вод при зимних оттепелях ($W_{\text{то}}$) и объема стока талых вод в весенний период снеготаяния ($W_{\text{тв}}$), т. е.

$$W_{\text{т}} = W_{\text{то}} + W_{\text{тв}}, \text{ м}^3.$$

Вероятные значения характеристик стока талых вод с ЗТ следует определять в соответствии с указаниями [4, 10].

Расчетный расход **дождевых вод**, необходимый для расчетов параметров коллекторов ливневой канализационной сети, вычисляется в соответствии с указаниями СНиП 2.04.03-85 [7] (п. 2.11–2.19) при периоде однократного превышения расчетных осадков P (год), изменяющимся для СЗ РФ в пределах от 0,33 до 5.

Расчетный суточный расход дождевого стока с ЗТ, используемый для расчетов параметров очистных сооружений и предельно допустимых сбросов (ПДС) в водные объекты, определяется для теплого периода года по максимальным суточным осадкам с учетом их потерь на впитывание, аккумуляцию в понижениях и инфильтрацию в грунты [2, 3, 5]:

$$Q_g = 10 \cdot h \cdot F;$$

$$h = (H_p^{0,5} - H_0^{0,5})^2;$$

$$H_p = h_1 \left(1 + \frac{\lg p}{\lg m} \right)^{1/\beta},$$

где Q_g – суточный расход дождевых вод, м³/сут.; h – суточный слой дождевого стока, мм; H_p – суточный слой осадков при периоде однократного превышения P , мм; H_0 – суточный слой потерь осадков на ЗТ, мм; m – сред-

нее количество дождей за теплый период; β – климатический коэффициент; h_1 – суточный слой осадков при периоде однократного превышения $P = 1$ год, мм.

Величины h_1 и m принимаются на основании результатов статистических расчетов и анализа многолетних данных наблюдений за осадками по ближайшей метеостанции. Для приближенной оценки можно использовать данные [5] или табл. 2.

Период однократного превышения суточных осадков составляет $P = 0,05–0,1$ год [7].

Величина β в среднем изменяется в пределах 0,6–0,7. Большие значения следует принимать для районов СЗ РФ с большим количеством осадков в теплый период года.

Значения слоя потерь осадков H_0 , зависящих от характера использования ЗТ, водопроницаемости поверхности и грунтов, приведены в работе [5].

При различном характере использования ЗТ, водопроницаемости поверхности и грунтов величины H_0 и h определяются для основных типов ЗТ.

Результирующий расчетный расход дождевого стока, поступающего на очистку и в водный объект, вычисляется по формуле

$$Q_q = 10 \cdot (h_{p1} \cdot F_1 + h_{p2} \cdot F_2 + \dots + h_{pn} \cdot F_n),$$

где $h_{p1}, h_{p2}, \dots, h_{pn}$ – слои дождевого стока с основных типов площадей $F_1, F_2, \dots, F_n$, соответственно, мм.

Расчетный среднечасовой $Q_{q(\text{час})}$ и секундный $Q_{q(c)}$ расходы дождевых вод с ЗТ будут равны:

$$Q_{q(\text{час})} = \frac{Q_q}{24}, \text{ м}^3/\text{ч};$$

ТАБЛИЦА 2. Климатические характеристики теплового периода года в Северо-Западной зоне РФ

Пункт (метеостанция)	Сумма осадков в теплый период, мм	h_1 , мм	m	Даты теплового периода
Лоухи	295	21	90	24.04–18.10
Паданы	318	20	90	16.04–27.10
Пудож	366	25	91	10.04–27.10
Олонец	396	23	95	12.04–05.11
С.-Петербург	402	24	108	04.04–13.11
Тихвин	415	26	–	05.04–05.11
Николаевская	425	25	115	03.04–10.11
Веребье	492	26	110	02.04–04.11
Новгород	402	27	105	04.04–09.11
Боровичи	413	23	108	04.04–05.11
Валдай	470	26	112	06.04–04.11
Псков	419	31	102	02.04–14.11
Дно	424	27	104	01.04–12.11
Идрица	479	27	107	01.04–14.11

Примечание. Прочерк – нет данных.

$$Q_{q(c)} = \frac{Q_q}{86400} \cdot 10^3, \text{ л/с.}$$

Расчетный объем стока дождевых вод в теплый период года определяется в зависимости от суммы осадков за этот период и средневзвешенного коэффициента стока с ЗТ:

$$W_q = 10 \cdot X \cdot \varphi_q \cdot F, \quad (3)$$

где X – сумма осадков за теплый период года, мм; принимается по климатическому справочнику [11], СНиП 23-01-99 [8] или для СЗ РФ – по табл. 2; φ_q – коэффициент стока дождевых вод; определяется в виде средневзвешенной величины из частных значений для различных видов поверхности селитебной территории согласно данным [1, 5]. Для производственных территорий частные значения коэффициента стока можно приближенно принять равными:

- для водонепроницаемых покрытий – 0,6–0,8;
- для грунтовых покрытий – 0,2;
- для газонов – 0,1.

Вероятные значения расчетного объема стока дождевых вод с ЗТ определяются в соответствии с указаниями [4, 10].

При наличии данных об объемах стока сбросных вод, полученных на аналогичных объектах, коэффициенты талого и дождевого стока для конкретных условий ЗТ следует определять на основании обобщения результатов «обратных» расчетов, выполненных по формулам (1)–(3). Фактические объемы водоотведения по основным периодам стока берутся из первичных журналов, сводных таблиц и форм отчетности в специализированных службах «Водоканала», промышленных, транспортных и сельскохозяйственных предприятий, ведущих их учет при очистке и сбросе в водные объекты.

Расчетные расходы и объемы **поливомочных вод** определяются в соответствии с указаниями СНиП 2.04.03-85 [7].

Заключение

Разработаны способы расчета гидрологических характеристик систем водоотведения с застроенных территорий, в том числе с объектов железных и автомобильных дорог в Северо-Западной зоне РФ, основанные на действующих нормативно-методических документах с учетом климатических условий, рельефа, типа землепользования и грунтов и других факторов. Определены необходимые для расчетов климатические и гидрологические характеристики.

Библиографический список

1. Водогрецкий В. Е. Антропогенное изменение стока малых рек : моногр. / В. Е. Водогрецкий. – Л. : Гидрометеиздат, 1990. – 176 с.
2. Алексеев М. И. Методика расчета объемов поверхностного (дождевого, талого) и дренажного стока с территории Санкт-Петербурга и административно подчиненных городов / М. И. Алексеев, А. М. Курганов. – СПб., 1997.
3. Дикаревский В. С. Отведение и очистка поверхностных сточных вод / В. С. Дикаревский, А. М. Курганов, А. М. Нечаев, М. И. Алексеев. – Л. : Стройиздат. Ленингр. отд., 1990. – 224 с.
4. Пособие по определению основных расчетных гидрологических характеристик. – Л. : Гидрометеиздат, 1984. – 447 с.
5. Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока с селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты / ФГУП «НИИ Водгео». – М., 2006. – 61 с.
6. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 2, ч. 1, 2. – Л. : Гидрометеиздат, 1972.
7. СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения.
8. СНиП 23-01-99. Строительная климатология.
9. Соколовский Д. Л. Речной сток / Д. Л. Соколовский. – Л. : Гидрометеиздат, 1968. – 527 с.
10. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик.

11. Справочник по климату СССР. Ч. 1. – Л. : Гидрометеиздат, 1972.

References

1. Vodogretskiy V.Ye. Antropogennoye izmeneniye stoka malykh rek: monografiya [Man-made Changes to the Flow of Minor Rivers: A Monograph]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1990. 176 p.

2. Alekseyev M. I. & Kurganov A. M. Metodika rascheta obyemov poverkhnostnogo (dozhdevogo, talogo) i drenazhnogo stoka s territorii Sankt-Peterburga i administrativno podchinennykh gorodov [A Method for Calculation of Volume of Surface (Rainfall, Snowmelt) and Drainage Run-Off from the Territory of St Petersburg and Towns Administered by St Petersburg]. St. Petersburg, 1997.

3. Dikarevskiy V. S., Kurganov A. M., Nechaev A. M. & Alekseyev M. I. Otvedeniye i ochistka poverkhnostnykh stochnykh vod [Deflection and Processing of Surface Wastewater]. Leningrad, Stroyizdat, 1990. 224 p.

4. A Guide for Determination of Basic Calculated Hydrological Characteristics. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1984. 447 p.

5. Recommendations for Calculation of Systems for Collection, Deflection and Processing of Surface Wastewater from Habitable Territories, Production Grounds, and for Determination of Conditions for Releasing It into Water Objects. Moscow, FGUP NII Vodgeo, 2006. 61 p.

6. Resursy poverkhnostnykh vod SSSR [Resources of Surface Waters of the USSR]. Vol. 2, pts. 1–2. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1972.

7. SNiP 2.04.03-85. Sewage. Outside Networks and Facilities.

8. SNiP 23-01-99. Construction Climatology.

9. Sokolovsky D. L. Rechnoy stok [River Flow]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1968. 527 p.

10. SP 33-101-2003. Determination of Basic Calculable Hydrological Characteristics.

11. Spravochnik po klimatu SSSR [Reference Book for the USSR Climate]. Pt. 1. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1972.

КАНЦИБЕР Юрий Алексеевич – канд. техн. наук, ст. научный сотрудник, доцент, kanziber3@yandex.ru, *ПОНОМАРЕВ Андрей Борисович – канд. техн. наук, доцент, pollnom@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 681.518.5:004.052.32

**В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов,
В. В. Дмитриев, Ц. Хуан**

ОПТИМАЛЬНЫЙ СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ КОД НА ОСНОВЕ ВЗВЕШИВАНИЯ РАЗРЯДОВ ИНФОРМАЦИОННЫХ ВЕКТОРОВ И СУММИРОВАНИЯ БЕЗ ПЕРЕНОСОВ ДЛЯ СИСТЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

Дата поступления: 15.01.2016

Решение о публикации: 15.01.2016

Цель: Построить код с суммированием с минимальным общим количеством обнаруживаемых ошибок в информационных векторах со смещением распределения обнаруживаемых ошибок в сторону их большей кратности. **Методы:** Использованы методы теории информации и кодирования, теории дискретных устройств и технической диагностики дискретных систем. **Результаты:** Формализованы правила построения кода с суммированием, который относится к классу модульно взвешенных кодов с суммированием. Приведенный код с суммированием имеет такое же количество контрольных разрядов, как и классический код Бергера, однако, в отличие от последнего, имеет минимальное общее количество обнаруживаемых ошибок в информационных векторах, то есть является оптимальным. Полученный код также идентифицирует 100% двукратных ошибок в информационных векторах и предназначен только для обнаружения ошибок. В статье также приводятся результаты экспериментов с набором контрольных комбинационных схем MCNC Benchmarks по оценке сложности технической реализации систем функционального контроля, организованных по предложенному коду, в сравнении со стандартной структурой дублирования. **Практическая значимость:** Использование предложенного кода с суммированием в системах функционального контроля позволяет организовывать контролепригодные дискретные устройства с меньшей структурной избыточностью, чем дают известные подходы, например, дублирование. Это, в свою очередь, позволяет уменьшать затраты на техническую реализацию устройства и его дальнейшую эксплуатацию. Описанный код с суммированием может также быть полезен и в других задачах технической диагностики.

Система функционального контроля, комбинационная схема, дублирование, код Бергера, код с суммированием, взвешенный код с суммированием, обнаруживаемая ошибка, структурная избыточность.

Valeriy V. Sapozhnikov, Dr. Sci. (Eng.), professor, port.at.pgups1@gmail.com; **Vladimir V. Sapozhnikov**, Dr. Sci. (Eng.), professor, at.pgups@gmail.com; ***Dmitriy V. Yefanov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, TrES-4b@yandex.ru; **Vyacheslav V. Dmitriyev**, assistant lecturer, webus@pisem.net; **Jie Huang**, student, 1340632392@qq.com (Petersburg State Transport University) **OPTIMISED SYSTEMATIC CODE BASED ON WEIGHTING ORDERS OF DATA VECTORS AND FALSE ADD FOR CONCURRENT ERROR DETECTION CONTROL SYSTEMS**

Objective: To build a sum code with minimum total amount of undetectable errors in data vectors with a shift in distribution of undetectable errors towards their higher frequency. **Methods:** Methods of theory of information and coding, theory of discrete devices and technical diagnostics of discrete systems were applied. **Results:** Rules for building a sum code which is in the class of modular weighted sum codes are formalised. The presented sum code has the same number of check bits as the classic Berger

code but unlike the latter it has the minimum total amount of undetectable errors in data vectors, thus is optimised. The code obtained also identifies 100 per cent of double-bit errors in data vectors and is only designed for error detection. The paper also presents results of experiments with a set of MCNC Benchmarks control combinational circuits for evaluation of complexity of technical implementation of concurrent error detection systems organised on the code proposed, compared to standard duplication structure. **Practical importance:** Application of the proposed sum code in concurrent error detection systems allows organising testable discrete devices with lesser structure redundancy compared to known approaches such as duplication. In its turn, this allows to cut expenses on technical implementation of a device and its further operation. The described sum code can also be useful for other technical diagnostics tasks.

Concurrent error detection system, combinational circuit, duplication, Berger code, sum code, weight-based sum code, undetectable error, structure redundancy.

Для определения технического состояния устройств автоматики и вычислительной техники в процессе выполнения ими своих функций используются системы функционального контроля (рабочего или on-line диагностирования) [3, 5, 8]. При построении надежных систем управления методы функционального контроля используются в совокупности с методами тестового диагностирования и резервирования [19].

На рис. 1 изображена структурная схема системы функционального контроля. В ней

контролируемое логическое устройство $F(x)$, вычисляющее значения системы булевых функций $f_1, f_2, \dots, f_m$, снабжается специализированным контрольным оборудованием, предназначенным для косвенного контроля возникающих в процессе его работы неисправностей по результатам вычислений [17, 18]. В составе контрольного оборудования выделяется блок контрольной логики $G(x)$, формирующий значения системы специальных контрольных функций $g_1, g_2, \dots, g_k$, а также самопроверяемый тестер, реализуемый в виде

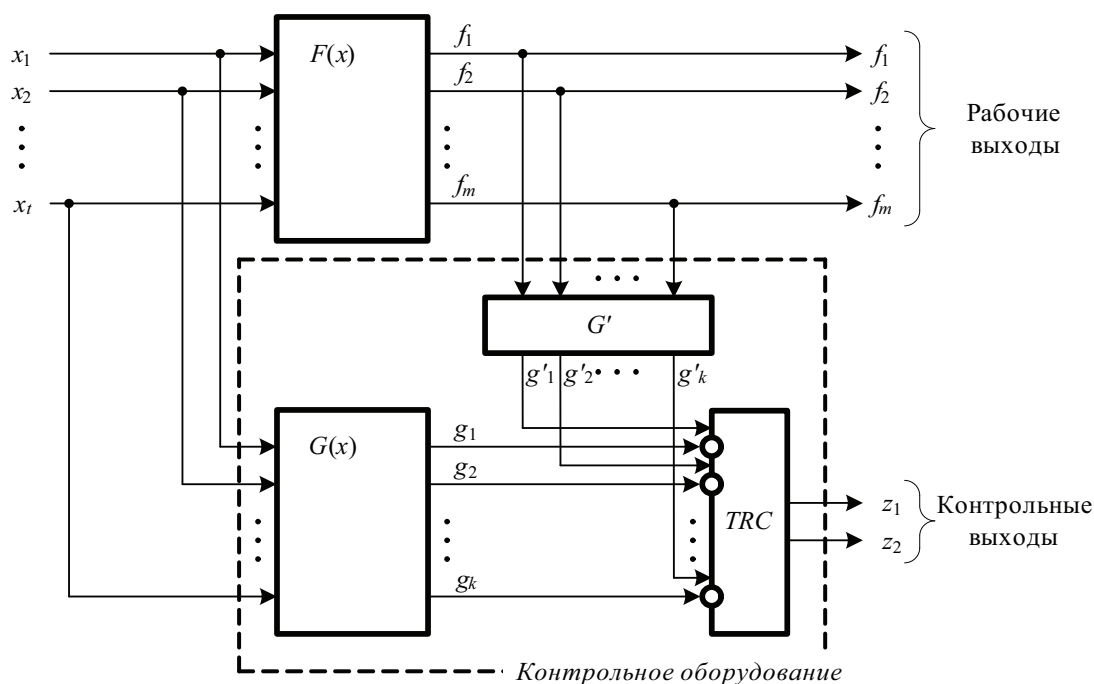


Рис. 1. Структурная схема системы функционального контроля

генератора контрольных разрядов G' и компаратора TRC . Генератор контрольных разрядов G' формирует значения контрольных функций g'_i , $i = 1, k$ по правилам заранее выбранного систематического кода, а компаратор TRC сравнивает одноименные контрольные функции, вычисленные блоками $G(x)$ и G' . Для построения самопроверяемой структуры тестера компаратор реализуется в виде схемы сжатия парафазных сигналов $\langle g_i, g'_i \rangle$, где сигналы от блока контрольной логики предварительно инвертируются. Это позволяет свести контроль технического состояния к контролю одного парафазного сигнала на выходах компаратора [8].

При построении структуры, приведенной на рис. 1, часто используются коды с суммированием – как классические, так и их модификации [1, 4, 6, 7, 12, 14]. Выходы контролируемого устройства отождествляются с разрядами информационного вектора, а выходы блока контрольной логики – с разрядами контрольного вектора. Тестер же в системе функционального контроля играет роль устройства, проверяющего соответствие между информационным и контрольным векторами.

Системы функционального контроля характеризуются различными параметрами, среди которых ключевыми являются структурная избыточность и свойства обнаружения ошибок в контролируемом устройстве. Характеристика структурной избыточности показывает, насколько сложна система функционального контроля по сравнению с самим объектом диагностирования. Свойства обнаружения ошибок в контролируемом устройстве фактически определяют ограничения на вид идентифицируемых искажений в информационном векторе. Так или иначе, оба описанных параметра напрямую зависят от кода, лежащего в основе системы функционального контроля.

В настоящей работе мы опишем систематический код, который может быть эффективно использован при организации систем функционального контроля взамен классических кодов с суммированием (кодов Бергера [10] –

далее будем обозначать их как $S(m, k)$ -коды, где m и k – длина информационных и контрольных векторов) и их модификаций.

Код с суммированием со смещением количества необнаруживаемых ошибок в информационных векторах в сторону большей кратности

Для построения оптимального кода будем использовать идею установления неравноправия между разрядами в информационном векторе путем приписывания им весовых коэффициентов w_i , $i = 1, m$ [9, 13, 15, 16]. Весовые коэффициенты при этом будем брать из специальной последовательности.

Алгоритм построения оптимального кода с суммированием:

1. Разрядам информационного вектора, начиная с младшего, приписываются весовые коэффициенты, образующие ряд последовательно возрастающих натуральных чисел: $[m; m-1; \dots; 2; 1]$;
2. Значение каждого весового коэффициента w_i представляется в двоичном виде: $[w_i]_2$;
3. Определяется число $[W]_2$ – сумма двоичных чисел $[w_i]_2$ весовых коэффициентов единичных разрядов информационного вектора (при суммировании отсутствует операция переноса):

$$[W]_2 = \bigoplus_{i=1}^m f_i[w_i].$$

4. Число $[W]_2$ записывается в разряды контрольного вектора.

Данный код обозначим как $WS^{mod}(m, k)$ -код. Количество контрольных разрядов в нем определяется по максимальному значению весового коэффициента $w_m = m$: $k = \lceil \log_2(m+1) \rceil$, где запись $\lceil \dots \rceil$ обозначает целое сверху от $\log_2(m+1)$. Такое же количество контрольных разрядов используется и в классическом коде Бергера.

Поскольку при образовании разрядов контрольного вектора используется только операция сложения по модулю 2 и рассматриваются

ТАБЛИЦА 1. Получение разрядов контрольного вектора $WS^{mod}(5,3)$ -кода

Разряды информационного вектора					Суммируемые весовые коэффициенты		Разряды контрольного вектора		
f_5	f_4	f_3	f_2	f_1	В десятичном виде	В двоичном виде	g_3	g_2	g_1
0	0	0	0	0	–	–	0	0	0
0	0	0	0	1	1	001	0	0	1
0	0	0	1	0	2	010	0	1	0
0	0	0	1	1	1+2	001+010	0	1	1
0	0	1	0	0	3	011	0	1	1
0	0	1	0	1	1+3	001+011	0	1	0
0	0	1	1	0	2+3	010+011	0	0	1
0	0	1	1	1	1+2+3	001+010+011	0	0	0
0	1	0	0	0	4	100	1	0	0
0	1	0	0	1	1+4	001+100	1	0	1
0	1	0	1	0	2+4	010+100	1	1	0
0	1	0	1	1	1+2+4	001+010+100	1	1	1
0	1	1	0	0	3+4	011+100	1	1	1
0	1	1	0	1	1+3+4	001+011+100	1	1	0
0	1	1	1	0	2+3+4	010+011+100	1	0	1
0	1	1	1	1	1+2+3+4	001+010+011+100	1	0	0
1	0	0	0	0	5	101	1	0	1
1	0	0	0	1	1+5	001+101	1	0	0
1	0	0	1	0	2+5	010+101	1	1	1
1	0	0	1	1	1+2+5	001+010+101	1	1	0
1	0	1	0	0	3+5	011+101	1	1	0
1	0	1	0	1	1+3+5	001+011+101	1	1	1
1	0	1	1	0	2+3+5	010+011+101	1	0	0
1	0	1	1	1	1+2+3+5	001+010+011+101	1	0	1
1	1	0	0	0	4+5	100+101	0	0	1
1	1	0	0	1	1+4+5	001+100+101	0	0	0
1	1	0	1	0	2+4+5	010+100+101	0	1	1
1	1	0	1	1	1+2+4+5	001+010+100+101	0	1	0
1	1	1	0	0	3+4+5	011+100+101	0	1	0
1	1	1	0	1	1+3+4+5	001+011+100+101	0	1	1
1	1	1	1	0	2+3+4+5	010+011+100+101	0	0	0
1	1	1	1	1	1+2+3+4+5	001+010+011+100+101	0	0	1

все 2^m информационных векторов, $WS^{mod}(m,k)$ -код будет иметь равномерное распределение информационных векторов между контрольными векторами. Это признак оптимального кода [2].

Действие алгоритма продемонстрируем на примере построения $WS^{mod}(5,3)$ -кода (см. табл. 1). Рис. 2 иллюстрирует процесс получения разрядов контрольного вектора для информационного вектора $\langle 01101 \rangle$. Для формирования значений разрядов контрольного вектора суммируются весовые коэффициенты единичных разрядов в информационном векторе: 1, 3 и 4.

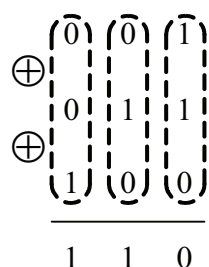


Рис. 2. Получение разрядов контрольного вектора

Исходя из алгоритма построения, любой $WS^{mod}(m, k)$ -код будет иметь простые линейные функции вычисления значений контрольных разрядов. Например, для рассматриваемого $WS^{mod}(5,3)$ -кода эти функции будут иметь вид:

$$\begin{cases} g_1 = f_1 \oplus f_3 \oplus f_5; \\ g_2 = f_2 \oplus f_3; \\ g_3 = f_4 \oplus f_5. \end{cases}$$

В табл. 2 дается распределение информационных векторов $WS^{mod}(5,3)$ -кода на группы контрольных векторов (контрольные группы). Анализ такой формы задания кода позволяет определить характеристики обнаружения ошибок кодом.

Дадим характеристику необнаруживаемым ошибкам в информационных векторах данного кода. Для этого необходимо проанализировать все возможные переходы внутри каждой контрольной группы. Для каждой группы таких переходов будет $3 \cdot 4 = 12$. Примечательно, что правила построения кода таковы, что в каждой контрольной группе переходы будут иметь одинаковый характер. На рис. 3 приведена диаграмма переходов внутри контрольной группы $\langle 000 \rangle$, где на каждом переходе указано количество искажаемых разрядов – это кратность необнаруживаемой ошибки d – расстояние Хэмминга между соответствующей парой информационных векторов. В каждой контрольной группе имеются по четыре перехода, вызываемых одновременным искажением четырех разрядов, и по восемь переходов, вызываемых одновременным искажением трех разрядов. Умножая полученные величины на количество контрольных групп, получаем, что $WS^{mod}(m, k)$ -кодом не

ТАБЛИЦА 2. Распределение информационных векторов $WS^{mod}(5,3)$ -кода на контрольные группы

Контрольные группы							
000	001	010	011	100	101	110	111
Информационные векторы							
00000	00001	00010	00011	01000	01001	01010	01011
00111	00110	00101	00100	01111	01110	01101	01100
11001	11000	11011	11010	10001	10000	10011	10010
11110	11111	11100	11101	10110	10111	10100	10101

обнаруживается 64 трехкратных ошибки и 32 четырехкратных ошибки.

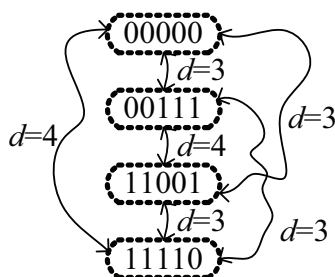


Рис. 3. Анализ переходов внутри контрольной группы <000>

Общее количество необнаруживаемых $WS^{mod}(m, k)$ -кодом подсчитывается по формуле

$$N_m = 2^m (2^{m-k} - 1) = 2^m (2^{m - \lceil \log_2(m+1) \rceil} - 1). \quad (1)$$

Например, применение формулы (1) для подсчета необнаруживаемых ошибок в рассматриваемом $WS^{mod}(5, 3)$ -коде дает следующий результат:

$$\begin{aligned} N_5 &= 2^5 (2^{5 - \lceil \log_2(5+1) \rceil} - 1) = \\ &= 2^5 (2^2 - 1) = 32 \cdot 3 = 96. \end{aligned}$$

Результаты экспериментов с системой контрольных комбинационных схем MCNC Benchmarks

В ходе исследования практических приложений описываемого $WS^{mod}(m, k)$ -кода была оценена эффективность его применения при организации систем функционального контроля комбинационных логических схем. Для этой цели был использован набор стандартных комбинационных схем MCNC Benchmarks [11].

В MCNC Benchmarks комбинационные логические схемы представлены в различных форматах, в том числе в формате *.pla. Данный формат фактически задает комбинационную схему в виде сжатой таблицы истинности функций, реализуемых схемой. Используя

интерпретатор SIS [20], можно анализировать различные характеристики схемы, реализованной в том или ином базисе (библиотеке функциональных элементов). Немаловажной характеристикой является площадь логического устройства, занимаемая им на кристалле (L , в усл. единицах). Ее значение фактически определяет стоимость разработки и эксплуатации устройства.

С использованием разработанного программного комплекса по анализу характеристик кодов с суммированием в системах функционального контроля нами получены все блоки системы функционального контроля в том же формате, что и набор комбинационных схем. Для полученных блоков определены показатели площади и рассчитано значение площади, занимаемой всей системой функционального контроля на кристалле. Использование $WS^{mod}(m, k)$ -кода при организации систем функционального контроля сравнивалось с применением для этих целей классического $S(m, k)$ -кода. Кроме того, дана оценка эффективности использования $WS^{mod}(m, k)$ -кода по сравнению с системой дублирования (duplication system). В ходе исследований оценивались показатели структурной избыточности систем функционального контроля, организованных по модульно взвешенному коду, а именно:

- коэффициент δ_f – отношение площади системы функционального контроля к площади контролируемой комбинационной схемы;
- коэффициент δ_d – отношение площади системы функционального контроля к площади системы дублирования;
- коэффициент δ'_s – отношение площади системы функционального контроля к площади системы контроля по коду Бергера при отдельной реализации блоков $F(x)$ и $G(x)$;
- коэффициент δ''_s – отношение площади системы функционального контроля к площади системы контроля по коду Бергера при совместной реализации блоков $F(x)$ и $G(x)$;
- коэффициент μ – коэффициент «сжатия» для системы функционального контроля с совместной реализацией блоков $F(x)$ и $G(x)$ по отношению к системе функционального кон-

ТАБЛИЦА 3. Оценка параметров площадей структур систем функционального контроля, организованных по $WS^{mod}(m, k)$ - и $S(m, k)$ -кодам

Кон- троль- ная схема	Чис- ло вхо- дов	Чис- ло выхо- дов	Double System	$S(m, k)$ -код				$WS^{mod}(m, k)$ -код				Показатели системы контроля по $WS^{mod}(m, k)$ - коду, %					
				L_{cl}	L_{ji}	$\mu, \%$	L_{cl}	L_{ji}	$\mu, \%$	$\delta_{f,cl}$	$\delta_{f,ji}$	$\delta_{D,cl}$	$\delta_{D,ji}$	$\delta'_{S,cl}$	$\delta''_{S,ji}$		
misex1	8	7	4064	4176	3280	78,544	2904	2144	73,829	207,429	153,143	71,457	52,756	69,54	65,366		
table3	14	14	81664	65992	58232	88,241	53968	49648	91,995	136,725	125,78	66,085	60,795	81,78	85,259		
table5	17	15	78688	66760	54944	82,301	52840	39456	74,671	139,493	104,161	67,151	50,142	79,149	71,811		
tcheck	3	3	672	584	432	73,973	536	408	76,119	446,667	340	79,762	60,714	91,781	94,444		
newtpla2	10	4	2320	2024	1736	85,771	1848	1496	80,952	220	178,095	79,655	64,483	91,304	86,175		
newscwp	4	5	1728	1952	1712	87,705	1360	1088	80	309,091	247,273	78,704	62,963	69,672	63,551		
root	8	5	7840	6200	6224	100,387	5880	4872	82,857	168,192	139,359	75	62,143	94,839	78,278		
max512	9	6	20320	15512	14960	96,441	14992	10344	68,997	155,648	107,392	73,78	50,906	96,648	69,144		
max1024	10	6	36688	27408	35688	130,21	28384	22144	78,016	159,317	124,293	77,366	60,358	103,561	62,049		
dc1	4	7	3216	3424	2872	83,879	2328	1856	79,725	238,525	190,164	72,388	57,711	67,991	64,624		
decoder	4	7	2736	3104	1224	39,433	2040	1808	88,627	277,174	245,652	74,561	66,082	65,722	147,712		
wim	4	7	2688	3160	1568	49,62	2024	1568	77,47	284,27	220,225	75,298	58,333	64,051	100		
br1	12	8	8688	9048	5160	57,029	6440	3448	53,54	178,492	95,565	74,125	39,687	71,176	66,822		
br2	12	8	7376	8024	5936	73,978	5448	3152	57,856	184,553	106,775	73,861	42,733	67,896	53,1		
newbyte	5	8	2656	4368	4360	99,817	2072	1928	93,05	350	325,676	78,012	72,59	47,436	44,22		
inc	7	9	6432	9112	8328	91,396	5088	3800	74,686	214,141	159,933	79,104	59,08	55,838	45,629		
b10	15	11	20432	32824	18576	56,593	17192	16192	94,183	187,522	176,614	84,143	79,248	52,376	87,166		
m1	6	12	8432	13224	2512	18,996	5568	3216	57,759	181,723	104,961	66,034	38,14	42,105	128,025		
p82	5	14	7456	16568	15648	94,447	5312	4432	83,434	224,324	187,162	71,245	59,442	32,062	28,323		
m2	8	16	23328	29984	8640	28,815	14672	6952	47,383	145,325	68,859	62,894	29,801	48,933	80,463		
m3	8	16	30064	33984	9624	28,319	18544	8296	44,737	137,73	61,616	61,682	27,594	54,567	86,201		
m4	8	16	40544	40152	14280	35,565	25464	13376	52,529	136,142	71,514	62,806	32,991	63,419	93,669		
tms	8	16	16704	26352	7840	29,751	10936	6936	63,424	161,203	102,241	65,469	41,523	41,5	88,469		
b2	16	17	85248	74992	42040	56,059	51400	27408	53,323	125,513	66,927	60,295	32,151	68,541	65,195		
in1	16	17	85248	74992	57328	76,445	51400	27408	53,323	125,513	66,927	60,295	32,151	68,541	47,809		
Средние значения			–	–	–	69,749	–	–	71,299	203,788	150,812	71,647	51,781	67,617	76,14		

троля с отдельной реализацией блоков $F(x)$ и $G(x)$.

Все показатели определены в процентах.

Для $S(m, k)$ - и $WS^{mod}(m, k)$ -кодов получены характеристики площадей систем функционального контроля при их использовании с двумя вариантами технической реализации для 25 комбинационных схем: а) при отдельной реализации блоков $F(x)$ и $G(x)$; б) при совместной реализации блоков $F(x)$ и $G(x)$ (табл. 3). Вид реализации в таблице обозначен латинскими буквами «cl» и «ji» – классическая структура (classic, cl) и структура с совместной реализацией блоков основной и контрольной логики (with joint implementation, ji).

Для 25 контрольных комбинационных схем в среднем получено, что структура системы функционального контроля на основе $WS^{mod}(m, k)$ -кода при отдельной реализации блоков $F(x)$ и $G(x)$ занимает площадь на кристалле, равную 71,647% площади системы дублирования и 67,617% площади системы функционального контроля, построенной на основе кода Бергера. Для некоторых комбинационных схем получено уменьшение площади структуры на основе $WS^{mod}(m, k)$ -кода по сравнению с дублированием более чем на четверть, а по сравнению с системой на основе кода Бергера – более чем вдвое.

Структура с совместной реализацией блоков основной и контрольной логики по сравнению с дублированием оказывается в среднем еще проще системы дублирования – 51,781% (уменьшение площади практически вдвое). Для 9 схем из 25 достигнуто значительное уменьшение – от 27,594 до 42,733% от площади системы дублирования. При сравнении структур с совместной реализацией блоков основной и контрольной логики, построенных на основе кода Бергера и нового кода, выигрыш в площади системы на основе нового кода составляет 76,14%.

Результаты экспериментов позволяют говорить о высокой эффективности $WS^{mod}(m, k)$ -кода в задачах технической диагностики, прежде всего, – при организации систем функ-

ционального контроля комбинационных логических схем.

Заключение

Использование предложенного оптимального кода с суммированием при организации систем функционального контроля является эффективным способом, позволяющим синтезировать надежные дискретные устройства с уменьшенными характеристиками структурной избыточности по сравнению с системами функционального контроля, реализованными по классическим кодам Бергера и по методу дублирования. Следует отметить, что $WS^{mod}(m, k)$ -код позволяет обнаруживать больше ошибок на рабочих выходах систем функционального контроля, чем $S(m, k)$ -код. Однако для 100%-ной идентификации любых одиночных неисправностей в структурах контролируемых комбинационных схем с использованием $WS^{mod}(m, k)$ -кодов требуются анализ их влияния на выходы, а также разработка алгоритмов модификации структур комбинационных схем в контролепригодные.

Библиографический список

1. Блюдов А. А. О кодах с суммированием единичных разрядов в системах функционального контроля / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 8. – С. 131–145.
2. Блюдов А. А. Построение модифицированного кода Бергера с минимальным числом обнаруживаемых ошибок информационных разрядов / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Электронное моделирование. – 2012. – Т. 34, № 6. – С. 17–29.
3. Дрозд А. В. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем / А. В. Дрозд, В. С. Харченко, С. Г. Антошук и др. ; под ред. А. В. Дрозда, В. С. Харченко. – Харьков :

Национальный аэрокосмический ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2012. – 614 с.

4. Ефанов Д. В. О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 6. – С. 155–162.

5. Пархоменко П. П. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомонян. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 320 с.

6. Сапожников В. В. Обнаружение опасных ошибок на рабочих выходах комбинационных логических схем / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1, № 2. – С. 195–211.

7. Сапожников В. В. Применение кодов с суммированием при синтезе систем железнодорожной автоматики и телемеханики на программируемых логических интегральных схемах / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 84–107.

8. Согомонян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян, Е. В. Слабаков. – М. : Радио и связь, 1989. – 208 с.

9. Berger J. M. A Note on Burst Detecting Sum Codes / J. M. Berger // Inf. Control. – 1961. – Vol. 4, Is. 2–3. – P. 297–299.

10. Berger J. M. A Note on Error Detecting Codes for Asymmetric Channels / J. M. Berger // Inf. Control. – 1961. – Vol. 4, Is. 1. – P. 68–73.

11. Collection of Digital Design Benchmarks. – URL : <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks>.

12. Das D. Low Cost Concurrent Error Detection Based on Modulo Weight-Based Codes / D. Das, N. A. Touba, M. Seuring, M. Gossel // Proc. of the 6th IEEE Int. On-Line Testing Workshop (IOLTW), Spain, Palma de Mallorca, July 3–5, 2000. – Palma de Mallorca, 2000. – P. 171–176.

13. Das D. Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multi-level Circuits / Das D., Touba N. A. // Proc. of the 17th IEEE VLSI Test Symp., USA, CA, Dana Point, Apr. 25–29, 1999. – Dana Point, 1999. – P. 370–376.

14. Dong H. Modified Berger Codes for Detection of Unidirectional Errors / H. Dong // IEEE Trans. Comput. – 1984. – Vol. C-33, June. – P. 572–575.

15. Favalli M. Optimization of Error Detecting Codes for the Detection of Crosstalk Originated Errors / M. Favalli, C. Metra // Des., Autom. and Test in Eur. (DATE). – 2001. – March 13–16. – P. 290–296.

16. Ghosh S. Scan Chain Fault Identification Using Weight-Based Codes for SoC Circuits / S. Ghosh, K. W. Lai, W. B. Jone, S. C. Chang // Proc. of the 13th Asian Test Symp., Taiwan, Kenting, Nov. 15–17, 2004. – Taiwan, 2004. – P. 210–215.

17. Mitra S. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? / S. Mitra, E. J. McClaskey // Proc. Int. Test Conf., USA, Atlantic City, NJ, 3–5 Oct., 2000. – Atlantic City, 2000. – P. 985–994.

18. Nicolaidis M. On-Line Testing for VLSI – A Compendium of Approaches / M. Nicolaidis, Y. Zorian // J. Electron. Test. : Theory Appl. – 1998. – N 12. – P. 7–20.

19. Ubar R. Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source) : Inf. Sci. Ref. / R. Ubar, J. Raik, H.-T. Vierhaus. – Hershey : NY : IGI Global, 2011. – 578 p.

20. Yang S. Logic Synthesis and Optimization Benchmarks : User Guide : Version 3.0 / S. Yang. – Microelectronics Center of North Carolina (MCNC), 1991. – 88 p.

References

1. Blyudov A. A., Yefanov D. V., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov V. I. *Avtomatika i telemekhanika – Automatics and Remote Control*, 2014, no. 8, pp. 131–145.

2. Blyudov A. A., Yefanov D. V., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov V. I. *Elektronnoye modelirovaniye – Electronic Simulation*, 2012, Vol. 34, no. 6, pp. 17–29.

3. Drozd A. V., Kharchenko V. S., Antoshchuk S. G., Drozd Yu. V., Drozd M. A. & Sulima Yu. Yu. *Rabocheye diagnostirovaniye bezopasnykh informatsionno-upravlyayushchikh sistem* [Operational Diagnostics of Safe Information-Control Systems]; eds. A. V. Drozd, V. S. Kharchenko. Kharkiv, Zhukovsky National Aerospace University, 2012. 614 p.

4. Yefanov D. V., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov V. I. *Avtomatika i telemekhanika – Automatics and Remote Control*, 2010, no. 6, pp. 155–162.

5. Parkhomenko P. P. & Sogomonyan Ye. S. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki (optimizatsiya algoritmov*

diagnostirovaniya, apparaturnyye sredstva) [Basic Technical Diagnostics (Diagnosis Algorithm Optimization, Hardware Means). Moscow, Energoatomizdat, 1981. 320 p.

6. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. & Yefanov D. V. *Avtomatika na transporte – Automatics at Transport*, 2015, Vol. 1, no. 2, pp. 195-211.

7. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. & Yefanov D. V. *Avtomatika na transporte – Automatics at Transport*, 2015, Vol. 1, no. 1, pp. 84-107.

8. Sogomonyan Ye. S. & Slabakov Ye. V. *Samoproveryayemye ustroystva i otkazoustoychivyye sistemy* [Self-Checking Machines and Fail-Safe Systems]. Moscow, Radio i svyaz, 1989. 208 p.

9. Berger J. M. A Note on Burst Detecting Sum Codes. *Inf. Control*, 1961, Vol. 4, Is. 2-3, pp. 297-299.

10. Berger J. M. A Note on Error Detecting Codes for Asymmetric Channels. *Inf. Control*, 1961, Vol. 4, Is. 1, pp. 68-73.

11. Collection of Digital Design Benchmarks, available at: <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks>.

12. Das D., Touba N. A., Seuring M. & Gossel M. Low Cost Concurrent Error Detection Based on Modulo Weight-Based Codes. *Proc. of the 6th IEEE Int. On-Line Testing Workshop (IOLTW)*, Spain, Palma de Mallorca, July 3-5, 2000. Palma de Mallorca, 2000. Pp. 171-176.

13. Das D. & Touba N. A. Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection

of Multilevel Circuits. *Proc. of the 17th IEEE VLSI Test Symp.*, USA, CA, Dana Point, April 25-29, 1999. Dana Point, 1999. Pp. 370-376.

14. Dong H. Modified Berger Codes for Detection of Unidirectional Errors. *IEEE Trans. Comput.*, 1984, vol. C-33, June, pp. 572-575.

15. Favalli M. & Metra C. Optimization of Error Detecting Codes for the Detection of Crosstalk Originated Errors. *Des., Autom. and Test in Eur. (DATE)*, 2001, March 13-16, pp. 290-296.

16. Ghosh S., Lai K. W., Jone W. B. & Chang S. C. Scan Chain Fault Identification Using Weight-Based Codes for SoC Circuits. *Proc. of the 13th Asian Test Symposium*, Taiwan, Kenting, Nov. 15-17, 2004. Taiwan, 2004. Pp. 210-215.

17. Mitra S. & McClaskey E. J. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? *Proc. Int. Test Conf.*, 2000, USA, Atlantic City, NJ, 3-5 Oct., 2000. Atlantic City, 2000. Pp. 985-994.

18. Nicolaidis M. & Zorian Y. On-Line Testing for VLSI – A Compendium of Approaches. *J. Electron. Test.: Theory Appl.*, 1998, no. 12, pp. 7-20.

19. Ubar R., Raik J. & Vierhaus H.-T. Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source): *Inf. Sci. Ref.* Hershey – NY, IGI Global, 2011. 578 p.

20. Yang S. Logic Synthesis and Optimization Benchmarks: User Guide: Version 3.0. Microelectronics Center of North Carolina (MCNC), 1991. 88 p.

САПОЖНИКОВ Валерий Владимирович – д-р техн. наук, профессор, port.at.pgups1@gmail.com; САПОЖНИКОВ Владимир Владимирович – д-р техн. наук, профессор, at.pgups@gmail.com; *ЕФАНОВ Дмитрий Викторович – канд. техн. наук, доцент, TrES-4b@yandex.ru; ДМИТРИЕВ Вячеслав Владимирович – ассистент, webus@pisem.net; ХУАН Цзе – студент, 1340632392@qq.com (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 519.21

С. А. Сергеев

МНОГОКАНАЛЬНАЯ НЕСТАЦИОНАРНАЯ МОДЕЛЬ УДАЛЁННОГО СЕРВЕРА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ИСКУССТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ

Дата поступления: 18.01.2016

Решение о публикации: 17.03.2016

Цель: Определить возможность реализации всех операций, связанных с технологическим циклом обработки, поступающих от датчиков автоматизированной системы мониторинга технического состояния искусственных сооружений. **Методы:** Задача решена путём построения имитационной и аналитической нестационарных моделей автоматизированной системы мониторинга и моделирования. Для построения матрицы коэффициентов для системы однородных дифференциальных уравнений использован рекурсивный метод. **Результаты:** Достоверность расчётов подтверждена путём их взаимного сравнения. Результаты моделирования показали, что система значительно превосходит предъявленные к ней требования к оперативности обработки поступающих заявок. Впервые была реализована многоканальная нестационарная аналитическая модель. **Практическая значимость:** Методика определения возможности реализации всех операций, связанных с технологическим циклом обработки данных, поступающих от датчиков автоматизированной системы мониторинга технического состояния искусственных сооружений, может применяться и для других высоконагруженных систем. Предложенный рекурсивный алгоритм генерации матрицы коэффициентов для системы однородных дифференциальных уравнений, описывающих нестационарную систему обслуживания, значительно упрощает составление этой матрицы для многопараметрических нестационарных аналитических моделей.

Нестационарная модель, автоматизированная система мониторинга, искусственные сооружения, вероятности состояний системы.

Sergey A. Sergeyev, post-graduate student, assistant lecturer, serega_svetl@mail.ru (Petersburg State Transport University) MULTIPLE-LINE NON-STATIONARY MODEL OF A REMOTE SERVER FOR AUTOMATED SYSTEM FOR MONITORING OF ENGINEERING STRUCTURES

Objective: To determine possibility of realisation of all operations related to technological cycle of processing data coming from detectors of an automated system for monitoring of engineering structures' technical condition. **Methods:** The problem is solved through building simulation and analytical non-stationary models of automated system for monitoring and simulation. Recursive method was deployed for building a coefficient matrix for homogeneous differential equations system. **Results:** Dependability of calculations is confirmed by reciprocal comparison. Simulation results indicated that the system significantly exceeds demands placed on it, as regards promptness of processing incoming requests. For the first time, a multiple-line non-stationary analytical model was realised. **Practical importance:** The method for determining possibility of realisation of all operations related to the technological cycle of processing data coming from detectors of an automated system for monitoring of engineering structures' technical condition can also be applied to other highly loaded systems. The proposed recursive algorithm for generating a coefficient matrix for a homogeneous differential equations system which describes a non-stationary service system significantly simplifies compiling this matrix for multi-parameter non-stationary analytical models.

Non-stationary model, automated monitoring system, engineering structures, system state probabilities.

Для своевременного реагирования на опасные изменения параметров искусственных сооружений необходимо мониторить их геодезическое состояние. Проблема мониторинга искусственных сооружений рассмотрена в [1, 2, 7–10]. Однако в этих источниках рассматривались вопросы архитектуры автоматизированной системы мониторинга технического состояния искусственных сооружений (АСМИС) и использование данных от датчиков. Настоящая работа посвящена определению возможности реализовать все операции, связанные с технологическим циклом обработки данных, поступающих от датчиков, за отведённый интервал времени. При перегрузке либо отказе работы компонентов АСМИС возникает вероятность несвоевременного получения информации о нежелательном состоянии искусственного сооружения, что может привести к значительным материальным потерям и даже к человеческим жертвам.

Исследование удалённого сервера системы АСМИС

В [2] описана АСМИС «АСМАДС». Система состоит из двух серверов: локального и удалённого. Ранее была разработана нестационарная модель локального сервера, проведены его аналитическое и имитационное моделирование, а также нагрузочное тестирование, которое подтвердило результаты моделирования.

Для получения полной картины возможности реализации всех операций, связанных с технологическим циклом удалённого сервера, также разработаны имитационная и аналитическая модели, каждая из которых характеризуется следующими параметрами:

- 1) M – количество типов заявок;
- 2) $KT_i (i = \overline{1, M})$ – количество заявок i -го типа, поступающих в нестационарную систему обслуживания (НСО) за интервал моделирования;
- 3) λ_{ij} – элемент матрицы интенсивности поступления заявки i -го типа с номером j ;

4) L – число каналов обслуживания;

5) $\mu_{ij} (i = \overline{1, M}, j = \overline{1, L})$ – элемент матрицы интенсивности обслуживания каналом с номером j заявки i -го типа;

6) $\varphi_{ij} (i = \overline{1, M}, j = \overline{1, L})$ – элемент матрицы доступности каналов. $\varphi_{ij} = 1$, если заявке типа i доступен канал с номером j , $\varphi_{ij} = 0$ – в противном случае;

7) $\vec{n} = \{n_i\} (i = \overline{1, M})$ – вектор, определяющий количество заявок i -го типа, находящихся в НСО;

8) $\vec{m} = \{m_i\} (i = \overline{1, M})$ – вектор, определяющий количество заявок каждого типа, уже получивших обслуживание и покинувших НСО;

9) $\vec{l} = \{l_j\} (j = \overline{1, L})$ – вектор состояний каналов обслуживания, $l_j = 0$, если j -й канал свободен, $l_j = i$, если j -й канал обслуживает заявку типа i ;

10) $\vec{Q}$ – вектор очереди, причём i -я компонента вектора равна номеру типа заявки, стоящей на i -м месте в очереди на обслуживание. При этом если заявка, стоящая первой в очереди, не имеет доступа к только что освободившемуся каналу обслуживания, последний занимает заявка, стоящая ближе всего к началу очереди, имеющая доступ к этому каналу;

11) $pr = \{pr_i\}, i = \overline{1, M}$ – i -я компонента вектора, которая определяет приоритет заявок i -го типа.

Состояние НСО в каждый момент времени характеризуется упорядоченным набором векторов: $(\vec{n}, \vec{m}, \vec{l}, \vec{Q})$. Составим систему однородных дифференциальных уравнений Чепмена – Колмогорова в векторно-матричном виде:

$$dP_{(\vec{n}, \vec{m}, \vec{l}, \vec{Q})}(t) = A \cdot P_{(\vec{n}, \vec{m}, \vec{l}, \vec{Q})}(t), \quad (1)$$

где $P_{(\vec{n}, \vec{m}, \vec{l}, \vec{Q})}(t)$ – вектор вероятностей нахождения НСО в одном из состояний в момент времени t ; A – квадратная матрица. Задав затем начальные условия $P_{(\vec{0}, \vec{0}, \vec{0}, \vec{0})}(0) = 1$, где вероятности остальных состояний равны 0, можно решить соответствующую задачу Коши.

Исходя из требований к развёртыванию описанной системы, она должна решать сле-

дующую задачу. По условиям задачи на удалённом сервере возникло состояние, которое требует запустить прогнозирующий анализ данных, поступающих от 15 датчиков с интенсивностью $10c^{-1}$. Кроме того, с интенсивностью $2c^{-1}$ поступают три запроса от пользователей системы через графический интерфейс на углублённый прогнозирующий анализ. Процессор удалённого сервера имеет 4 ядра обслуживания. Каждое ядро обрабатывает заявку прогнозирующего типа с интенсивностью $0,2743c^{-1}$, а заявку типа углублённого прогноза – с интенсивностью $0,2071c^{-1}$. Распределение времени поступления и обработки заявок подчинено экспоненциальному закону. Необходимо найти момент времени t_1 , в котором все 18 заявок будут обработаны с вероятностью не менее 90%, а также момент времени t_2 , в котором заявки на углублённый анализ, поступившие от пользователей, будут обработаны с вероятностью не менее 90%. Если $t_1 > 60$ или $t_2 > 30$, необходимо разработать стратегии ускорения работы удалённого сервера. В постановке условий задачи введено допущение. Интенсивность обработки заявок обоих типов была получена из статистики обработки этих заявок на одном ядре. Предполагается, что при запуске обработки одновременно четырёх заявок на отдельном ядре каждая интенсивность их обработки останется прежней, так как затраты процессорного времени удалённого сервера на обработку других запросов, а также операций операци-

онной системы ничтожно малы по сравнению с заявками на прогнозирование.

Для определения значений t_1 и t_2 были использованы программы для имитационного и аналитического моделирования НСО [3, 5, 6]. Так как вывод общего уравнения для системы дифференциальных уравнений, описывающих нестационарную систему обслуживания, модель которой дана выше, – трудновыполнимая задача, решено составлять матрицу коэффициентов для аналитической модели с помощью метода, предложенного в [4].

Переходы между состояниями системы происходят по следующим правилам:

1) из состояния $P_{\vec{n}, \vec{m}, \vec{l}, \vec{Q}}$, в котором $n_i + m_i < KT_i$, система может перейти в состояние $P_{\vec{n}1, \vec{m}1, \vec{l}, \vec{Q}1}$ с интенсивностью $\lambda_{i, n_i + m_i + 1}$. Если $l_j = 0$, то $l_j = i$, вектор $\mathbf{q}$ остаётся без изменений. $n1_i = n_i + 1$. Вектор $\vec{m}$ остаётся без изменений;

2) из состояния $P_{\vec{n}, \vec{m}, \vec{l}, \vec{Q}}$, в котором $l_i > 0$, система может перейти в состояние $P_{\vec{n}1, \vec{m}1, \vec{l}, \vec{Q}1}$ с интенсивностью $\mu_{l_i, i}$, где $n1_i = n_i - 1$, $m1_i = m_i + 1$, $l_i = \vec{Q}_1$, при этом необходимо удалить Q_1 .

Кроме того, в алгоритме используется функция проверки наличия состояния isExist, задача этой функции – проверять все полученные состояния на дубликаты. Блок-схема алгоритма генерации матрицы состояний для многоканальной модели приведена на рис. 1.

Исходные данные моделей:

$$1. M = 2.$$

$$2. \overline{KT} = \{15, 3\}.$$

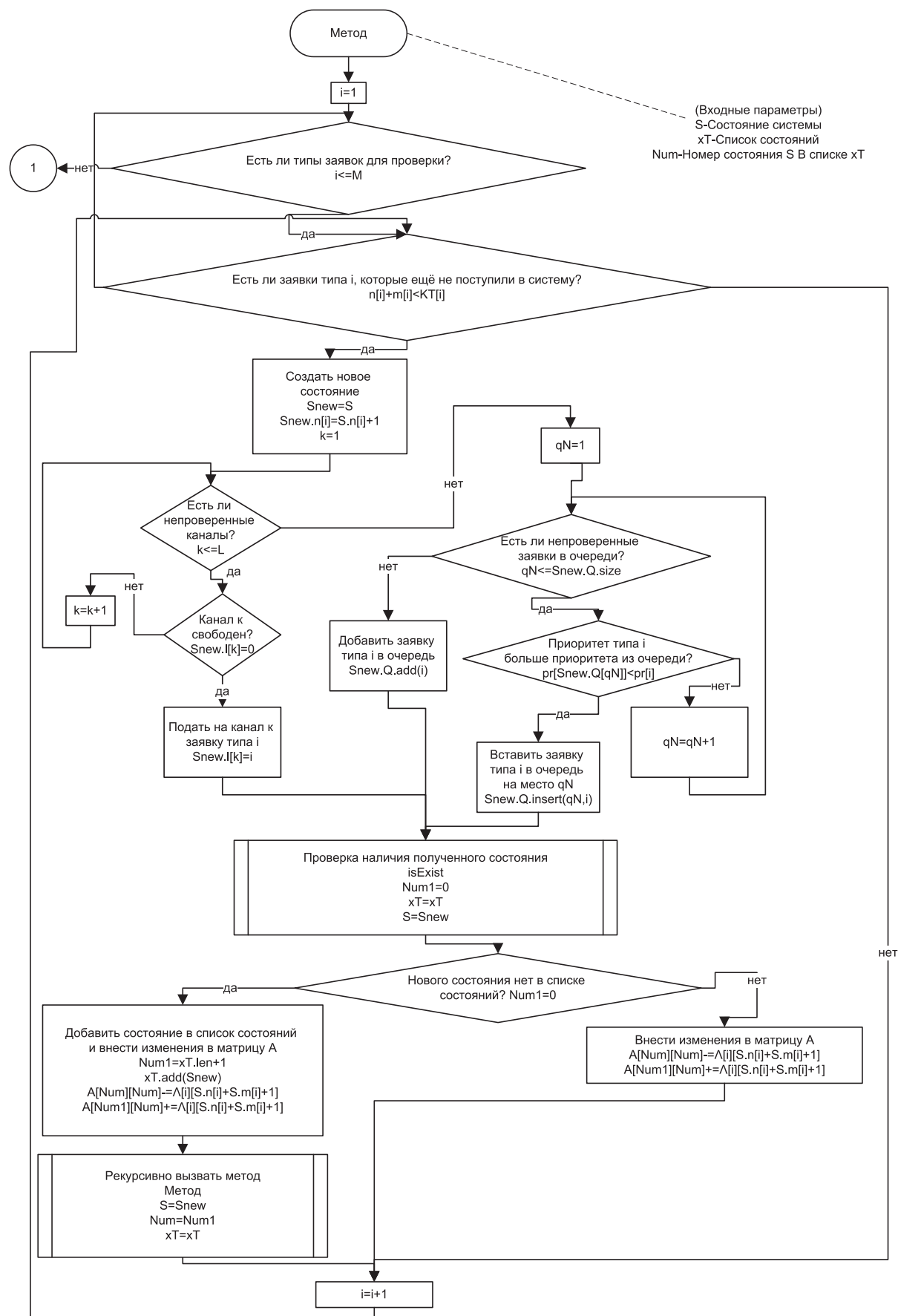
$$3. \lambda_{ij} = \begin{bmatrix} 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 \\ 2 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

$$4. L = 4.$$

$$5. \mu_{ij} = \begin{bmatrix} 0,2743 & 0,2743 & 0,2743 & 0,2743 \\ 0,2071 & 0,2071 & 0,2071 & 0,2071 \end{bmatrix}.$$

$$6. \Phi_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$7. \overline{pr} = \{1, 2\}.$$



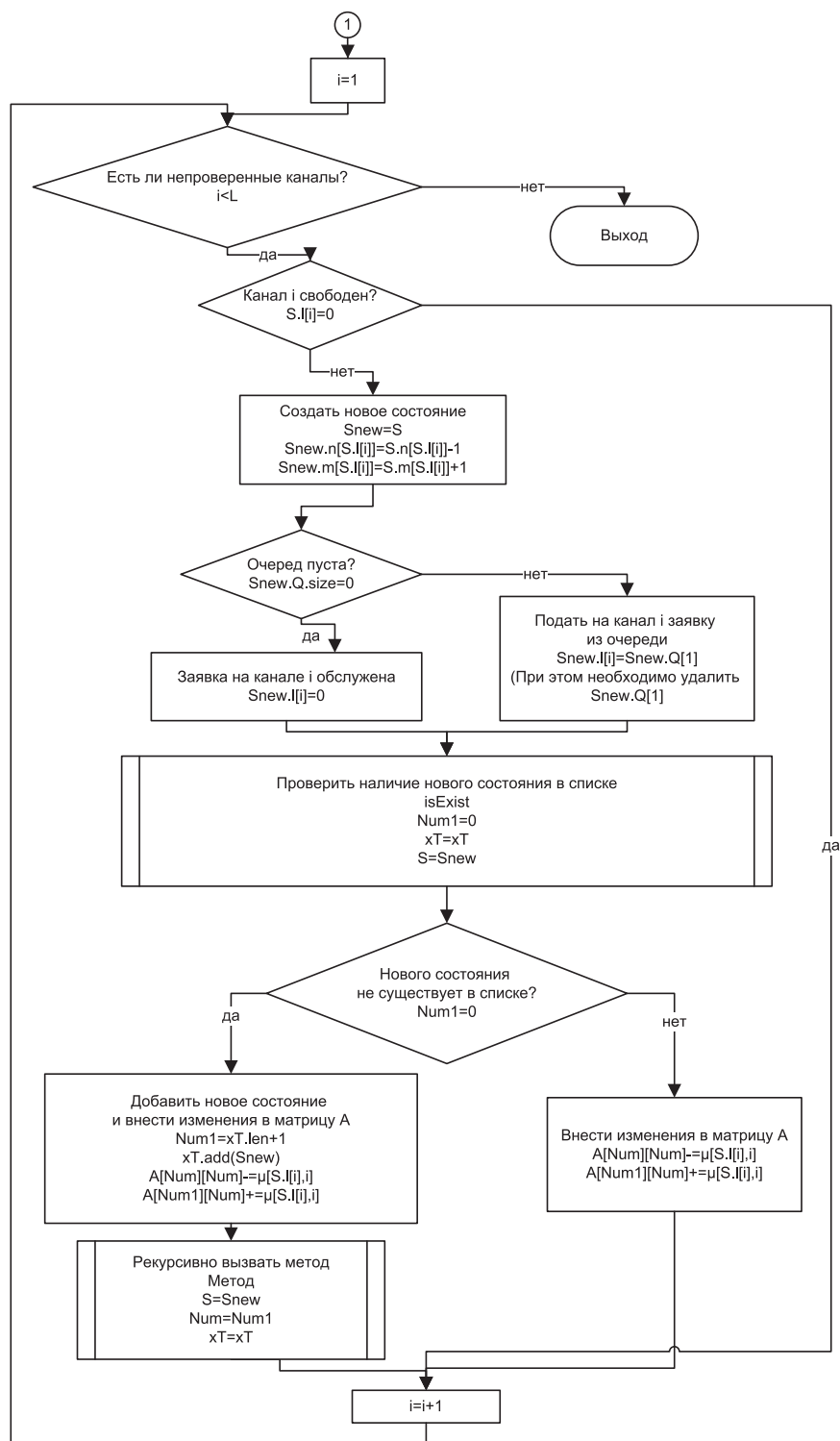


Рис. 1. Блок-схема алгоритма генерации матрицы состояний для многоканальной модели

Для определения t_1 построены графики зависимости вероятности нахождения системы в состоянии, где $\vec{m} = \{15, 3\}$, с помощью аналитической и имитационной моделей. Раз-

ница в значениях вероятностей, полученных с помощью обеих моделей, была только в 4-м знаке после запятой. На рис. 2 приведён график вероятности нахождения системы в по-

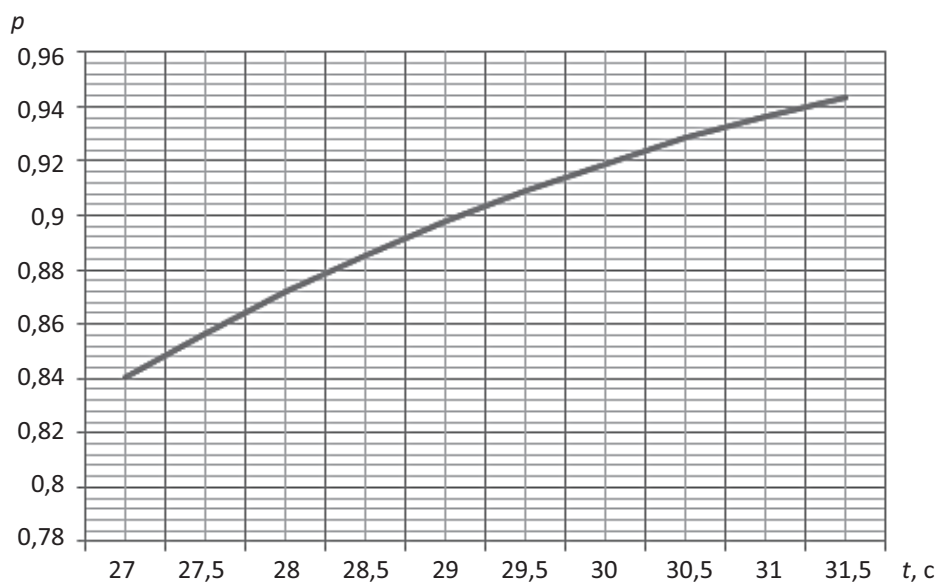
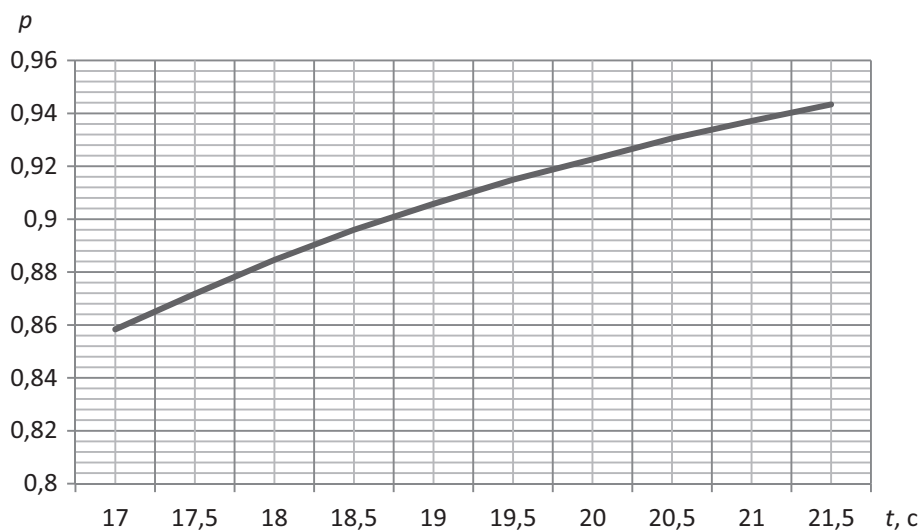


Рис. 2. Вероятность нахождения системы в поглощающем состоянии

Рис. 3. Вероятность нахождения системы в состоянии, где $m_2 = 3$

глощающем состоянии в разные моменты времени.

Для определения t_2 построены графики зависимости вероятности нахождения системы в состояниях, где $m_2 = 3$, с помощью аналитической и имитационной моделей. Разница в значениях вероятностей, полученных с помощью обеих моделей, также была только в 4-м знаке после запятой. На рис. 3 приведён

график вероятности нахождения системы в искомым состояниях в разные моменты времени.

Из рис. 2 и 3 видно, что t_1 и t_2 не превышают максимально допустимые для них показатели, следовательно, скорость реакции системы на возникновение внештатной ситуации будет выше нормы и данный узел системы не нуждается в оптимизации.

Заключение

Описанный в статье метод пригоден для расчёта вероятностно-временных характеристик большого количества нестационарных моделей различной сложности. Благодаря предложенному рекурсивному алгоритму генерации матрицы коэффициентов для системы однородных дифференциальных уравнений, описывающих НСО, стала возможна программная реализация таких многопараметрических аналитических моделей, как сетевая и L-канальная.

Библиографический список

1. Брынь М. Я. Геодезический мониторинг деформаций вантовых мостов на основе спутниковых технологий / М. Я. Брынь, Е. Г. Толстов, А. А. Никитчин и др. // Изв. ПГУПС. – 2009. – Вып. 2 (19). – С. 120–128.

2. Брынь М. Я. Программный комплекс для мониторинга деформаций особо опасных объектов / М. Я. Брынь, А. Д. Хомоненко, В. П. Бубнов, А. А. Никитчин, С. А. Сергеев, П. А. Новиков, А. И. Титов // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2014. – № 1. – С. 36–41.

3. Бубнов В. П. Особенности программной реализации численно-аналитического метода расчёта моделей нестационарных систем обслуживания / В. П. Бубнов, А. С. Еремин, С. А. Сергеев // Тр. СПИИРАН. – 2015. – № 1. – С. 218–232.

4. Бубнов В. П. Рекурсивный метод генерации матрицы коэффициентов системы однородных дифференциальных уравнений, описывающих нестационарную систему обслуживания / В. П. Бубнов, А. Д. Хомоненко, С. А. Сергеев // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям. Т. 1, секция 1–3. 2015. – С. 164–166.

5. Сергеев С. А., Бубнов В. П., Бубнов В. В. Программа для имитационного моделирования нестационарных систем обслуживания. Роспатент : Свид-во о гос. регистрации программы ЭВМ № 201561735. – М., 2015.

6. Сергеев С. А., Бубнов В. В., Ерёмин А. С. Программа для расчёта вероятностей состояний нестационарных систем обслуживания. Роспатент : Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014662753. – М., 2014.

7. Li A. Q. Analysis and assessment of bridge health monitoring mass data – progress in research/development of «Structural Health Monitoring» / A. Q. Li, Y. L. Ding, H. Wang, T. Guo // Sci. China Ser. E: Technol. Sci. – 2012. – Vol. 55, N 8. – P. 2212–2224.

8. Li S. L. SMC structural health monitoring benchmark problem using monitored data from an actual cable-stayed bridge / S. L. Li, H. Li, Y. Liu et al. // Struct. Control and Health Monit. – 2014. – Vol. 21, N 2. – P. 156–172.

9. Spencer B. F. Campaign Monitoring of Railroad Bridges in High-Speed Rail Shared Corridors using Wireless Smart Sensors: Report N NSEL-040 / B. F. Spencer. – Department of Civil and Environ. Eng. Univ. Illinois at Urbana-Champaign, June 2015.

10. Watanabe E. On longevity and monitoring technologies of bridges: a survey study by the Japanese Society of Steel Construction / E. Watanabe, H. Furuta, T. Yamaguchi, M. Kano // Struct. Infrastruct. Eng. – 2014. – Vol. 10, N 4. – P. 471–491.

References

1. Bryn M. Ya., Tolstov Ye. G., Nikitchin A. A., Reznik B., Yashchenko A. I., Yevstafyev O. V. & Kuchumov V. A. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2009, Is. 2 (19), pp. 120–128.

2. Bryn M. Ya., Khomonenko A. D., Bubnov V. P., Nikitchin A. A., Sergeyev S. A., Novikov P. A. & Titov A. I. *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Kompyuternyye sistemy – Information Security Problems. Computer Systems*, 2014, no. 1, pp. 36–41.

3. Bubnov V. P., Yeremin A. S. & Sergeyev S. A. *Trudy SPIIRAN – Proc. of St Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sci.*, 2015, no. 1, pp. 218–232.

4. Bubnov V. P., Khomonenko A. D. & Sergeyev S. A. *Rekursivny metod generatsii matritsy koefitsientov sistemy odnorodnykh differentsialnykh uravneniy, opisuyayushchikh nestatsionarnuyu sistemu obsluzhivaniya* [Recursive Method for Generation

of Coefficient Matrix for a Homogeneous Differential Equations System Which Describe a Non-Stationary Service System]. *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam (Int. Conf. for Soft Computing and Measurements)*, 2015. Vol. 1, section 1–3. Pp. 164-166.

5. Sergeyev S. A., Bubnov V. P., Bubnov V. V. Program for Imitation Simulation of Non-Stationary Service Systems. Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks. State program registration certificate N 201561735. Moscow, 2015.

6. Sergeyev S. A., Bubnov V. V., Yerechin A. S. Program for Calculation of Probabilities of Condition of Non-Stationary Service Systems. Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks. State program registration certificate N 2014662753. Moscow, 2015.

7. Li A. Q., Ding Y. L., Wang H. & Guo T. Analysis and assessment of bridge health monitoring mass data-

progress in research/development of 'Structural Health Monitoring'. *Sci. China Ser. E: Technol. Sci.*, 2012, Vol. 55, no. 8, pp. 2212-2224.

8. Li S. L., Li H., Liu Y., Lan C., Zhou W. & Ou J. SMC structural health monitoring benchmark problem using monitored data from an actual cable-stayed bridge. *Struct. Control and Health Monit.*, 2014, Vol. 21, no. 2, pp. 156-172.

9. Spencer B. F. Campaign Monitoring of Railroad Bridges in High-Speed Rail Shared Corridors using Wireless Smart Sensors. Report no NSEL-040, Department of Civil and Environ. Eng. Univ. Illinois at Urbana-Champaign, June 2015.

10. Watanabe E., Furuta H., Yamaguchi T. & Kano M. On longevity and monitoring technologies of bridges: a survey study by the Japanese Society of Steel Construction. *Struct. Infrastruct. Eng.*, 2014, Vol. 10, no. 4, pp. 471-491.

СЕРГЕЕВ Сергей Александрович – аспирант, ассистент, serega_svetl@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 628.3

Е. А. Соловьева**ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД И ОБРАБОТКИ ОСАДКОВ
ПРИ ГЛУБОКОМ УДАЛЕНИИ АЗОТА И ФОСФОРА ИЗ СТОЧНЫХ ВОД**

Дата поступления: 20.05.2015

Решение о публикации: 19.02.2016

Цель: Выявить способы повышения эффективности удаления азота и фосфора в технологии биологических процессов денитрификации и дефосфатирования (Денифо), а также реагентного связывания минеральных форм фосфора. **Методы:** Использованы описательные методы, а также методы статистической обработки данных. **Результаты:** Составлен перечень условий, которые обеспечивают максимум эффективности процессов очистки сточных вод и обработки осадков. Рассмотрена работа первичных отстойников, аэротенков по технологии Денифо, вторичных отстойников. Приведены математические зависимости для усредненного расхода сточных вод в сухую погоду при нормальных условиях эксплуатации очистных сооружений. Выявлено, что при совместном обезвоживании ила и осадков (с длительным пребыванием в резервуарах) происходит интенсивное вытеснение фосфора фосфатов в сливные воды, соответственно, повышается содержание фосфора в очищенной воде. Даны рекомендации для изменения режима работы узла по обработке осадков сточных вод. **Практическая значимость:** Материалы статьи позволяют комплексно оценивать степень удаления азота и фосфора из городских сточных вод, в том числе из вторичных загрязнений, поступающих с возвратными стоками от узлов обработки осадков на действующие очистные станции Санкт-Петербурга, а также совершенствовать технологию очистки городских сточных вод.

Активный ил, нитрификация, денитрификация, продолжительность осветления, осадок, ХПК, аммонийный азот, фосфор.

Elena A. Solovieva, Cand. Sci. (Eng.), assistant professor, el-sol@yandex.ru (Petersburg State Transport University) **TECHNOLOGY FOR WASTEWATER TREATMENT AND PRECIPITATION TREATMENT WITH DEEP NITROGEN AND PHOSPHORUS REMOVAL FROM WASTEWATER**

Objective: To identify methods of increasing efficiency of removal of nitrogen and phosphorus in the technology of biological processes of denitrification and phosphate removal (Denipho), as well as reagent fixation of mineral forms of phosphorus. **Methods:** Descriptive methods were used, as were statistical data processing methods. **Results:** A list of conditions that ensure maximum efficiency of processes of wastewater and precipitation treatment. The operation of primary sedimentation tanks, Denipho technology aerotanks, secondary sedimentation tanks is considered. Mathematical dependencies for average wastewater flow in dry weather under normal conditions of treatment facilities' operation are provided. It was established that during joint dehydration of sludge and precipitation (with lengthy storage in tanks), intensive displacement of phosphorus from phosphates into drain water occurs, thus phosphorus content of treated water increases. Recommendations for amending the operating regime of wastewater sludge unit are provided. **Practical importance:** Materials of the paper allow for complex evaluation of the degree of removal of nitrogen and phosphorus from urban wastewater, including from secondary pollution that is carried with return water from precipitation treatment units to the operating water treatment plants of St Petersburg, as well as to improve the technology of treating urban wastewater.

Active sludge, nitrification, denitrification, duration of clarification, sediment, COD, ammonia nitrogen, phosphorus.

Многообразие технологических и конструктивных решений, особенно ярко проявляющееся в зарубежной практике, предоставляет возможность использовать множество вариантов схем в зависимости от конкретных местных условий. В отечественной практике ввиду массового применения типовых проектов меньше приемов реализации технологии такого типа.

При реконструкции имеющихся сооружений проблемы сводятся к устройству анаэробно-аноксидных отсеков в двух-, трех- и четырехкоридорных типовых аэротенках.

Ограничивая задачу реконструкции сооружений и строительства новых очистных станций рамками России и государств СНГ, уменьшив разнообразие возможных вариантов несколькими схемами денитрификации и дефосфатирования (Денифо). При этом составим перечень условий, которые обеспечивают максимум эффективности очистки сточных вод и обработки осадков.

Осветление сточных вод, подбраживание загрязнений и осадков первичных отстойников

Высокий эффект осветления сточных вод в первичных отстойниках означает удаление тонкодисперсной взвеси, приближающейся по свойствам к коллоидной дисперсной фазе, полезной для процессов денитрификации и дефосфатирования, поэтому достижение глубокого осветления, использование предварительной аэрации, коагуляция сточных вод в первичных отстойниках нежелательны, а иногда вредны.

В случае поступления весьма разбавленных стоков первичные отстойники включают в схему циркуляции активного ила: циркулирующий активный ил частично или полностью подают в первичные отстойники, осветленная жидкость направляется в аэротенки, осевший ил и взвешенные вещества также откачиваются в аэротенк, при этом осадочная часть отстойников играет роль анаэробно-

аноксидной зоны, т. е. становится предденитрификатором.

Биоблок выполняется по схеме анаэробно-аноксидно-оксидной обработки сточных вод (АА/О). Ввод реагента в первичные отстойники дестабилизирует коллоидные и часть растворенных загрязнений, вследствие их удаления снижается количество денитрифицированного азота [4].

Другой способ насыщения сточных вод продуктами брожения загрязнений заключается в накоплении и подбраживании осадка прямо в отстойниках. За сутки в отстойниках слой осадка увеличивается на 5–10 см, накопление осадка высотой до 1–1,5 м длится 3–4 недели.

При этом внешние признаки брожения выражаются в виде интенсивного газовыделения, всплывания частиц осадка на поверхность воды, потемнения воды вследствие образования сульфидов железа. Несмотря на кажущийся дискомфорт в облик отстойников наблюдается более глубокая денитрификация в биоблоке (снижение количества азота нитратов на 2–4 мг/л).

Из-за накопления осадка в отстойниках образуется плотный вязкий слой на дне, поэтому приходится еженедельно выгружать этот слой для обезвоживания. Для лучшего контроля за брожением осадка целесообразно один из отстойников перевести в режим работы сбраживателя.

Весь осадок из других отстойников выгружаются ежедневно в сбраживатель, в который подается меньшее количество воды (30–50 % от нормального расхода) с целью вымывания продуктов брожения в биоблок. Количество осадка от первичных отстойников снижается, увеличиваются прирост активного ила и вынос фосфора из системы. Узел обезвоживания осадков необходимо подготовить к такому режиму работы.

На очистных сооружениях также эксплуатируются вертикальные отстойники диаметром 9, 12 и 15 м с центральным расположением скребка, радиальные – диаметром от 18 до 54 м (рис. 1).

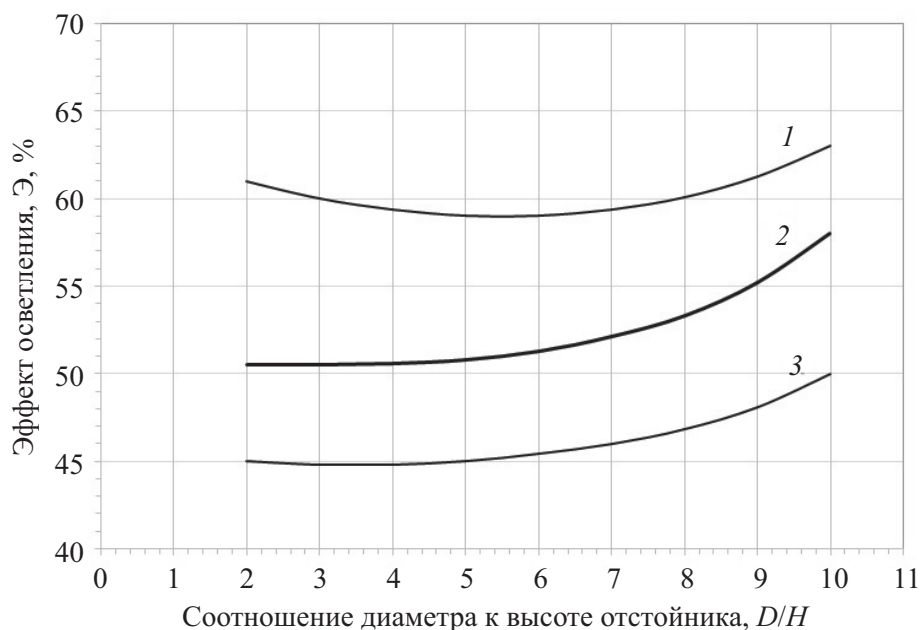


Рис. 1. Эффект осветления сточных вод в вертикальных и радиальных отстойниках
 1 – продолжительность осветления 4 ч, средний расход; 2 – продолжительность осветления 3 ч, средний расход; 3 – продолжительность осветления 4 ч, среднечасовой расход в сутки максимального водоотведения

Для этой группы вертикальных и радиальных отстойников составлена обобщенная формула, которая опирается на результаты эксплуатации отстойников на очистных сооружениях:

$$\lg \left(\frac{C_{en}}{C_{ex}} \right) = 2,5 \cdot t_{cp}^{0,59} \cdot C_{en}^{0,03} \times \left(\frac{H_{set}}{q_{вод}} \right)^{0,25} \left(\frac{D}{H} \right)^{0,18} s^{0,88} 10^{-3}, \quad (1)$$

где C_{en} и C_{ex} – концентрация взвешенных веществ во входящей воде и выходящей из отстойника, мг/л; s – зольность осадка, доли единицы; H_{set} – глубина проточной части в отстойнике, м; t_{cp} – продолжительность отстаивания, с; $L_{вод}$ – длина водосборных лотков, м; $q_{вод} = q/L_{вод}$, м³/ч на 1 пог. м длины водосборных лотков; $\frac{D}{H}$ отображает влияние соотношения диаметра отстойника и высоты проточной части применительно к вертикальным

и радиальным отстойникам диаметром от 6 до 54 м.

Далее определяют состав осветленной воды по убыли концентрации загрязнений с осадком (по его беззольной части). Таким образом, в цели и задачи осветления сточных вод включаются процессы подготовки воды для денитрификации и дефосфатирования, что существенно меняет регламент работы этого узла.

Технологические схемы устройства и режимы биоблока

Эффективное безреагентное удаление фосфора, а также азота достигается в схемах очистки, включающих предварительную денитрификацию циркулирующего активного ила и маневренную секцию аноксидно-оксидной обработки иловой смеси (секцию с мешалками и аэраторами).

Схема изображена на рис. 2 в двух вариантах: с денитрификатором ила в голове биоблока и внутри аноксидной зоны.

гулирование потоков q_1 и q_2 , R_{i_1} и R_{i_2} , в конечном итоге остается схема АА/О с фиксированными объемами отсеков Ана и Ано (рис. 3).

Добавка реагентов для снижения концентрации фосфора до 0,5 мг/л несколько меняет ситуацию. Отпадает необходимость тщательной подготовки циркулирующего ила перед анаэробной зоной, концентрация фосфора в очищенной воде регулируется путем изменения дозы реагента.

В схеме АА/О (рис. 3) реагент может вводиться перед вторичными отстойниками либо в циркулирующий активный ил.

При подаче коагулянта перед вторичными отстойниками для соблюдения требуемого качества очищенной воды необходимо установить переменную дозу реагента в соответствии с гидрографом и полютографом поступления массы воды и загрязнений; учесть изменение рН и щелочности воды; отрегулировать процессы образования FePO_4 и $\text{Fe}(\text{OH})_3$ во времени и в объеме зоны хлопьеобразования во вторичных отстойниках.

При подаче коагулянта в циркулирующий активный ил доза реагента устанавливается постоянной (либо пропорциональной расходу ила при регулировании рециркуляции), и все колебания параметров должны компенсироваться за счет аккумулирующей емкости активного ила [5]. Разумеется, при этом может происходить некоторый перерасход реагента вследствие передозировки для погашения естественных флуктуаций процесса биологической очистки. Доза реагента по Fe^{+3} 1,5–2,0 г/м³ при подаче в ил, 3,0–4,0 г/м³ – при подаче перед вторичными отстойниками [5].

Вторичные отстойники

Роль вторичных отстойников значительно усиливается в связи с ограничениями по выносу фосфора с активным илом. Например, при повышенном содержании фосфора в иле порядка 3 % (традиционный уровень в технологии Денифо) и выносе ила 12–15 мг/л

будет наблюдаться повышение концентрации общего фосфора на 0,36–0,45 мг/л, что существенно снизит общую эффективность очистки сточных вод. Следовательно, необходимо максимально осветлять очищенную воду во вторичных отстойниках.

Способы кардинального снижения количества взвеси в очищенной воде связаны с новыми процессами – коагуляции и флокуляции очищенной воды, ультрафильтрации с использованием бактерицидных мембран или простой фильтрации на зернистых минеральных и пластмассовых фильтрах.

Простое отстаивание иловой смеси позволяет снизить концентрацию взвешенных веществ до 7–8 мг/л, и этот уровень возможно считать предельным. Нагрузка на 1 м² площади дна отстойника снижается до 0,8–1,0 м³/м²·ч [2].

Выносу частиц активного ила способствует неудачная конструкция илососов и отстойников в целом. В типовых радиальных отстойниках из-за малых размеров впускной камеры создаются мощные потоки иловой смеси, вследствие чего формирующиеся хлопья ила относят к периферии. Одинаковые размеры илососов и одна сборная труба не способствуют равномерному отводу ила.

Целесообразно увеличить впускную камеру, установив продолжительность пребывания в ней иловой смеси до 25–30 мин, заменить илососы на скребки и организовать отвод циркулирующего ила из центрального приемка (кроме отстойников диаметром 54 м). Рекомендуются изменения учитывать возможность ввода реагентов перед вторичными отстойниками, когда впускное устройство становится камерой хлопьеобразования.

Среди различных способов интенсификации осветления наиболее просты коагуляция иловой смеси минеральными реагентами, совмещенная с удалением фосфора, добавка флокулянтов либо использование смеси минеральных и органических полиэлектролитов (композитных смесей из флокулянтов с минеральными коагулянтами). Ввод реагентов

в циркулирующий ил улучшает его способность к осаждению.

Обработка осадков

Стабилизация осадков в аэробных или анаэробных условиях продуцирует появление вторичных загрязнений в виде аммонийного азота, нитратов и ортофосфатов, включение таких процессов в схему обработки осадков нежелательно. Распадающееся органическое вещество осадков необходимо для денитрификации и дефосфатирования. Для этого рекомендуется обезвоживание сырых осадков с их последующей стабилизацией и обеззараживанием путем компостирования или ликвидации сжиганием.

В основном подготовка осадков к обезвоживанию заключается в раздельной обработке осадка первичных отстойников и избыточного активного ила. Смешивание осадка и ила вызывает активное вытеснение фосфатов из тела клеток бактерий, иногда в огромных количествах (250–280 мг/л по фосфору).

Технология уплотнения осадка и ила применяется для сокращения времени уплотнения до 8–10 ч при добавке 1–1,2 кг флокулянта на 1 т сухих веществ [3].

Отдельное уплотнение осадка первичных отстойников полезно для снижения водоотдающих свойств при его подбраживании. В уплотнителях необходимо предусматривать стержневые мешалки для отделения газов и разрушения слоистой структуры осадков.

Раздельно уплотненные осадки обезвоживаются на центрифугах (центрипрессах) либо на ленточных фильтр-прессах. В первом случае доза флокулянта составляет 4–5 кг/т для осадка и 5–6 кг/т для избыточного ила [1]. На ленточные фильтр-прессы осадки подаются через вихревые камеры флокуляции, в которые вводятся флокулянты дозой 3–4 кг/т [3].

Увеличение производительности узла обезвоживания достигается при установке барабанных, ленточных или тарельчатых сгустителей, на которые можно подавать смесь осадка

и ила, сгущать ее до влажности 93–94 % при дозировании 1,8–2,2 кг/т флокулянта [2].

Обезвоживание осадков может сопровождаться большим выносом фосфатов с фугатом или фильтратом. Целесообразно удалять фосфаты введением коагулянтов на основе железа Fe^{+3} . Коагулянт дозируют непосредственно в поток фугата (фильтрата), который далее направляется в голову очистных сооружений.

Сжигание кека, как это принято на очистных станциях Санкт-Петербурга, выдвигает ряд ограничений, в том числе достижение влажности кека не более 75 % и зольности не выше 40 %.

Заключение

Основным результатом данной статьи является раскрытие особенностей функционирования очистной станции как единой системы, ориентированной на удаление из городских сточных вод и возвратных потоков азота и фосфора, а также выбор рациональных, эффективных и надежных комплексных технологических схем биологической и химико-биологической (реагентной и безреагентной) обработки сточных вод и осадков.

Библиографический список

1. Водоснабжение и водоотведение в Санкт-Петербурге / под общ. ред. Ф. В. Кармазина. – СПб. : Новый журнал, 2008. – 462 с.
2. Иванов Г. Г. Оценка эффективности работы крупноразмерных вторичных отстойников / Г. Г. Иванов, Ю. Ф. Эль, М. Р. Телеснин // Водоснабжение и санитарная техника. – 1992. – № 3. – С. 5–6.
3. Отведение и очистка сточных вод Санкт-Петербурга / под общ. ред. Ф. В. Кармазина. – СПб. : Новый журнал, 2002. – 683 с.
4. Сойфер В. Н. Молекулы живых клеток / В. Н. Сойфер. – М. : Знание, 1975. – 208 с.
5. Соловьева Е. А. Удаление азота и фосфора из городских сточных вод. Технологии удаления азота

и фосфора в комплексе по очистке сточных вод и обработке осадка / Е. А. Соловьева. – Саарбрюккен : LAP LAMBERT Acad. Publ., 2011. – 292 с.

References

1. Vodosnabzheniye i vodootvedeniye v Sankt-Peterburge [Water and Sanitation in St Petersburg], ed. F.V. Karmazinov. St. Petersburg, Novyy zhurnal, 2008. 462 p.
2. Ivanov G.G., El Yu.F. & Telesnin M.R. *Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika – Water Supply and Sanitary Equipment*, 1992, no. 3, pp. 5–6.
3. Otvedeniye i ochistka stochnykh vod Sankt-Peterburga [Disposal and Treatment of Sewage in St Petersburg], ed. F.V. Karmazinov. St. Petersburg, Novyy zhurnal, 2002. 683 p.
4. Soyfer V.N. *Molekuly zhivyykh kletok [Living Cell Molecules]*. Moscow, Znaniye, 1975. 208 p.
5. Solovieva E.A. *Udalenie azota i fosfora iz gorodskikh stochnykh vod. Tekhnologii udaleniya azota i fosfora v komplekse po ochistke stochnykh vod i obrabotke osadka [Removal of Nitrogen and Phosphorus from Urban Wastewater. Technologies for Removal of Nitrogen and Phosphorus in Sewage and Sludge Treatment]*. Saarbrücken, LAP LAMBERT Acad. Publ., 2011. 292 p.

СОЛОВЬЕВА Елена Александровна – канд. техн. наук, доцент, el-sol@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).