



АВТОМАТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

AUTOMATION ON TRANSPORT

№ 2 • Том 7

Июнь, 2021

June, 2021



Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

УЧРЕДИТЕЛЬ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС) Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

ИЗДАТЕЛЬ

Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом Т-ПРЕССА» по договору № ЭОА 21990 от 01.03.2021

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Вал. В. Сапожников, доктор техн. наук, профессор, академик Академии транспорта РФ и Международной академии наук высшей школы, заслуженный деятель науки РФ

СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ СРЕДСТВА МАССОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

ПИ № ФС77-61375 от 10.04.2015, выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий 18 декабря 2017 года

ISSN 2412-9186

Индекс Роспечати 80525

АДРЕС УЧРЕДИТЕЛЯ

190031, РФ, Санкт-Петербург, Московский пр., 9, кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

АДРЕС ИЗДАТЕЛЯ

190031, РФ, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, д. 117, лит. А, помещение 33Н, офис 351 +7(812) 457-8579, +7(921) 099-94-77 at.pgups@gmail.com; ait.automatika@yandex.ru

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Перевод: *А. Н. Крышня*
Литературный редактор и корректор: *Е. Г. Локтионова*

Верстка: *А. А. Стуканова*

Электронное сопровождение: *А. С. Иванов*

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021

FOUNDER

Federal Railway Transport Agency
Federal State Budget
Educational Institution for Higher Education «Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University» (PSTU)
«Automation and Remote Control on Railways» department

PUBLISHER

Limited Liability Company “T-PRESSA Publishing House”, under contract N ЭОА21990 dated March 01, 2021

EDITOR-IN-CHIEF

Valeriy V. Sapozhnikov,
D. Sc., Professor, Member of Academy of Transport of Russia and International Higher Education Academy of Sciences, Honored Science Worker of Russia

MASS MEDIA REGISTRATION

CERTIFICATE NUMBER

PI № FS77-61375 dd. 10.04.2015 issued by the Federal service for the monitoring of communications, information technologies and mass communications

The Journal is included in the Bulletin of leading peer-reviewed scientific journals and publications (18 December, 2017)

ISSN 2412-9186

Rospechat Index 80525

FOUNDER'S ADDRESS

190031, Russia, St. Petersburg, Moskovskiy ave., 9, «Automation and Remote control on Railways» department

PUBLISHER'S ADDRESS

190031, Russia, St. Petersburg, Fontanka River emb., 117-A, prem. 33N, of. 351 +7(812) 457-8579, +7(921) 099-94-77 at.pgups@gmail.com; ait.automatika@yandex.ru

JOURNAL STAFF

English translation: *A. N. Kryshnia*
Editing and proofreading: *Eugenia G. Loktionova*

Layout: *Anna A. Stukanova*

Electronic maintenancy *Aleksei S. Ivanov*

© PSTU, 2021

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Валерий Сапожников

д-р техн. наук, профессор, ПГУПС,
главный редактор журнала
«Автоматика на транспорте»,
Санкт-Петербург, Россия

Константин Бочков

д-р техн. наук, профессор,
Белорусский государственный
университет транспорта,
Гомель, Белоруссия

Сергей Власенко

канд. техн. наук, доцент, «Сименс»,
Брауншвейг, Германия

Александр Дундуа

д-р наук, профессор,
Грузинский технический университет,
Тбилиси, Грузия

Марек Мезитис

д-р наук, доцент,
Рижский технический университет,
Рига, Латвия

Йохен Тринкауф

д-р наук, профессор,
Технический университет Дрездена,
Дрезден, Германия

Раймунд Убар

д-р техн. наук, академик
Эстонской академии наук,
Таллинский технический университет,
Таллин, Эстония

Владимир Хаханов

д-р техн. наук, профессор,
Харьковский национальный университет
радиоэлектроники,
Харьков, Украина

Фуниан Ху

д-р наук, профессор,
Школа электротехники педагогического
университета Цзянсу,
Сюйчжоу, Китай

Христо Христов

д-р техн. наук, профессор,
Технический университет,
София, Болгария

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Никитин Александр Борисович

д-р техн. наук, профессор,
заместитель главного редактора журнала
«Автоматика на транспорте»,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Кушпиль Игорь Васильевич

канд. техн. наук,
научный редактор журнала
«Автоматика на транспорте»,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Баранов Леонид Аврамович

д-р техн. наук, профессор,
РУТ, Москва

Бестемьянов Петр Филимонович

д-р техн. наук, профессор,
РУТ, Москва

Бушуев Сергей Валентинович

канд. техн. наук, доцент,
УрГУПС, Екатеринбург

Василенко Михаил Николаевич

д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Долгий Игорь Давидович

д-р техн. наук, профессор,
РГУПС, Ростов-на-Дону

Ефанов Дмитрий Викторович

д-р техн. наук, доцент,
РУТ, Москва

Кокурин Иосиф Михайлович

д-р техн. наук, профессор,
ИПТ РАН, Санкт-Петербург

Марков Дмитрий Спиридонович

канд. техн. наук, доцент,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Наседкин Олег Андреевич

канд. техн. наук, доцент,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Никищенков Сергей Алексеевич

д-р техн. наук, профессор,
СамГУПС, Самара

Пыркин Антон Александрович,

д-р техн. наук, профессор,
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

Розенберг Ефим Наумович

д-р техн. наук, профессор,
НИИАС, Москва

Шаманов Виктор Иннокентьевич

д-р техн. наук, профессор,
РУТ, Москва

Ходаковский Валентин Аветикович

д-р техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург

INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL

Valery Sapozhnikov

D. Sc., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University,
Editor-in-chief of «Automation on Transport»,
St. Petersburg, Russia

Konstantin Bochkov

D. Sc., Professor, Belarusian State
University of Transport,
Gomel, Belarus

Sergey Vlasenko

Ph. D., Associate Professor,
Siemens AG,
Braunschweig, Germany

Alexander Dundua

D. Sc., Professor,
Georgian Technical University,
Tbilisi, Georgia

Marek Meztis

Ph. D., Associate Professor,
Riga Technical University,
Riga, Latvia

Johann Trinckauf

Ph. D., Professor,
Dresden Technical University,
Dresden, Germany

Raimund Ubar

D. Sc., Member of Estonian Academy
of Sciences, Tallinn Technical University,
Tallinn, Estonia

Vladimir Hahanov

D. Sc., Professor,
Kharkov National University of Radio Electronics
Kharkiv, Ukraine

Funian Hu

Ph. D., Professor,
School of Electrical Engineering
of Jiangsu Normal University,
Xuzhou City, China

Khristo Khristov

D. Sc., Professor, Technical University,
Sofia, Bulgaria

EDITORIAL BOARD

Alexander B. Nikitin

D. Sc., Professor, deputy editor-in-chief of
«Automation on Transport», Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg

Igor V. Kushpil

Ph. D., science editor
of «Automation on Transport»,
Emperor Alexander I St. Petersburg State
Transport University, St. Petersburg

Leonid A. Baranov

D. Sc., Professor, Russian University of Transport,
Moscow

Peter F. Bestemiyarov

D. Sc., Professor, Russian University of Transport,
Moscow

Sergey V. Bushuev

Ph. D., Associate Professor, Ural State University
of Railway Transport, Ekaterinburg

Michael N. Vasilenko

D. Sc., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg

Igor D. Dolgiy

D. Sc., Professor, Rostov State Transport University,
Rostov-on-Don

Dmitry V. Efanov

D. Sc., Associate Professor,
Russian University of Transport, Moscow

Iosif M. Kokurin

D. Sc., Professor, Institute of Transport Problems
of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg

Dmitry S. Markov

Ph. D., Associate professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg

Oleg A. Nasedkin

Ph. D., Associate Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg

Sergey A. Nikischenkov

D. Sc., Professor, Samara State
Transport University, Samara

Anton A. Pyrkin,

D. Sc., Professor, IFMO University,
St. Petersburg

Efim N. Rozenberg

D. Sc., Professor, Scientific Research Institute
of Automation and Communication, Moscow

Victor I. Shamanov

D. Sc., Professor, Russian University of Transport,
Moscow

Valentin A. Khodakovsky

D. Sc., Professor, Emperor Alexander I
St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

В. В. Батраев

Методы приема и синхронизации сигналов автоматической локомотивной сигнализации 175

К. Н. Савинов, М. Г. Яшин, В. В. Трубицин

Базовые принципы восстановления интервального регулирования движения поездов с применением технологии радиочастотной идентификации 189

СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

В. И. Грек, В. И. Сафонов

Одно критическое замечание к испытаниям подшипниковых узлов скоростного подвижного железнодорожного состава 202

МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА В ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

А. А. Грачев, Г. И. Никитин, Д. Г. Плотников, А. В. Баните, Д. Е. Бортяков, А. С. Габриель

Автоматизация расчета локальных напряжений в элементах коробчатого сечения пролетных строений с ездовыми балками по данным непрерывного мониторинга 216

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

В. А. Барусов, Вл. П. Бубнов, Ш. Х. Султонов, Д. В. Бараусов

Алгоритмы управляющей программы системы автоматической очистки стрелочных переводов на базе датчика определения льда или снега на контролируемой поверхности 231

К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин

Комплексный синергетико-индикаторный подход к управлению процессами перевозок на интенсивных и малодеятельных линиях 252

В. Н. Мячин, К. С. Боровикова, Д. П. Кривцов

Особенности классификации улично-дорожной сети при построении графа дорог в транспортной модели 268

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ СИСТЕМЫ

Д. В. Ефанов, Г. В. Осадчий, М. В. Зуева

Особенности обнаружения ошибок кодами с суммированием единичных информационных разрядов в кольце вычетов по заданному модулю в схемах встроенного контроля, синтезированных на основе метода логического дополнения 284

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

А. Е. Водясов, Д. М. Кирюхин, В. Г. Сидоренко

Опыт подготовки кадров для обеспечения компьютерной безопасности транспортной отрасли 315

CONTENTS

TRANSPORT CONTROL SYSTEMS

V. V. Batraev

Methods of reception and synchronization of signals
of automatic cab signalling. 175

K. N. Savinov, M. G. Yashin, V. V. Trubitsin

Basic principles of recovery of interval regulation of train traffic
using radio frequency identification technology 189

STANDARDIZATION AND CERTIFICATION

V. I. Grek, V. I. Safonov

One issue in reference to the tests of axle-box bearings for high-speed
rolling stock 202

MONITORING METHODS IN TRANSPORT

A. A. Grachev, G. I. Nikitin, D. G. Plotnikov, A. V. Banite, D. E. Bortiaikov, A. S. Gabriel

Automation of local voltage calculation in box-sectional elements of span
structures with running beams according to continuous monitoring data. 216

OPERATION OF TRANSPORT SYSTEMS

V. A. Barausov, V. P. Bubnov, Sh. Kh. Sultonov, D. V. Barausov

Algorithms of the control program of automatic cleaning systems
of the turnouts based on the sensor for determining ice or snow
on the controlled surface. 231

K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin

An integrated synergetic-indicator approach to the management
of transportation processes on busy and low-density lines 252

V. N. Myachin, K. S. Borovikova, D. P. Krivtsov

Features of the classification of the street-road net-work when constructing
the road graph in the transport model. 268

TECHNICAL DIAGNOSTICS AND CONTROLLABLE SYSTEMS

D. V. Efanov, G. V. Osadchiy, M. V. Zueva

The characteristics of error detection by codes with the summation
of single information bits in the ring of residues, according to a given
modulus are analyzed, which are manifested in the synthesis
of built-in control circuits using the Boolean complement method. 284

BRIEF REPORTS

A. E. Vodyasov, D. M. Kiryukhin, G. V. Sidorenko

Experience in training personnel to ensure the computer security
of the transport industry 315

УДК 656.2.072/073

В. В. Батраев

*Отдел информационного и цифрового развития
Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института
информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»)*

МЕТОДЫ ПРИЕМА И СИНХРОНИЗАЦИИ СИГНАЛОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ

В статье рассмотрены проблемы существующих методов приема кодов АЛС на железнодорожном транспорте, предложен оригинальный способ приема и обработки данных.

Необходимость решения проблем обусловлена требованием качественного улучшения надежности приема кодов, а как следствие и пропускной способности существующих линий. В первую очередь это относится к существенному повышению качества приема и обработки информационных потоков из рельсовых линий. Сегодня сложно представить организацию движения подвижного состава без опоры на системы автоблокировки со вторичным уплотнением тональных рельсовых цепей сигналами частотной модуляции или автоматическую локомотивную сигнализацию без использования многозначной автоматической локомотивной сигнализации с фазоразностной модуляцией. С учетом объективного факта помехоэмиссии от работы энергоемкого железнодорожного оборудования и современных локомотивов вопросы надежности и помехоустойчивости приема дискретной информации (в т. ч. сигналов традиционной автоматической локомотивной сигнализации) становятся все более актуальными. Анализ причин снижения надежности и помехоустойчивости систем железнодорожной автоматики и телемеханики (а следовательно, безопасности движения) также выходит на передний план.

Безопасность движения, перевозочный процесс, информационные системы, бортовые и напольные устройства безопасности, микропроцессорные устройства, управление рисками

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-175-188

Введение

Традиционные рельсовые каналы передачи сигналов автоматической локомотивной сигнализации, которые эксплуатируются уже более 70 лет, занимают диапазон частот до 100 Гц. Каждый из них используется для передачи трех кодов АЛСН методом амплитудной манипуляции на несущих частотах 25, 50 или 75 Гц в зависимости от рода тяги. Последующие информационные каналы размещаются между гармониками промышленной сети выше по частоте и имеют присвоенные значения частот, численно равные:

$$f_n = 50n + 25, \quad (1)$$

где $n = 2, 3 \dots N$ — номер гармоники промышленной сети 50 Гц.

Опыт применения на Октябрьской железной дороге многочастотной АЛСЧ с передачей 10 команд по числу сочетаний двух из пяти непрерывных тональных частот в диапазоне 125–425 Гц не решил проблему увеличения значности и помехоустойчивости АЛС. Переход к угловым методам модуляции во многом изменил ситуацию. Сейчас в полосе канала с присвоенной частотой 175 Гц передается до 256 кодовых комбинаций АЛС-ЕН с помощью двукратной фазоразностной манипуляции (QPSK — Quadrature Phase Shift Keying) со скоростью около 10,9 Бод. Остальные частотные каналы пока используются для нужд контроля состояния рельсовых линий в системах автоблокировки различного поколения. В ЦАБ-АЛСО (ТРЦ-3) — пять каналов с амплитудной манипуляцией на частотах 420, 480, 580, 720 и 780 Гц. В системе АБТЦ-МШ — 10 каналов диапазона 425–875 Гц, но с возможностью параллельной передачи на поезд дополнительной информации методом частотной манипуляции (FSK — Frequency Shift Keying) без разрыва фазы сигнала. Таким образом, повышение помехоустойчивости приема сигналов по рельсовым каналам остается актуальной задачей. В этой связи следует признать, что технические решения, ранее реализованные при создании действующей каналообразующей аппаратуры АЛС-ЕН, требуют обстоятельного анализа и коррекции с учетом перспективы дальнейшего развития и совершенствования подобных низкоскоростных железнодорожных систем передачи информации на движущийся поезд.

1. Особенности условий работы рельсовых каналов связи на примере передачи сигналов АЛС-ЕН

Расчетная ширина полосы рельсовых каналов ограничена интервалом следования гармоник сети, она уменьшается по мере увеличения номера гармоники и в пределе составляет

$$\Delta f_n = |50 - \delta(1 + 2n)| \cdot K_{\text{ПР}}^{-1}, \quad (2)$$

где δ — нестабильность частоты сети электроснабжения, Гц; $K_{\text{ПР}}$ — коэффициент прямоугольности избирательного тракта.

В общем случае реальная рабочая ширина полосы будет несколько уже [EN 50160:2010]. Это связано с необходимостью обеспечить дополнительный запас селекции от воздействия гармоник сети, располагаемых непосредственно на границах рабочей полосы. Еще одна причина — технические трудности при реализации стабильных амплитудно-частотных (АЧХ) и фазово-частотных (ФЧХ) характеристик избирательных систем станционных передающих и главным образом локомотивных приемных устройств, особенно при коэффициенте

тах прямоугольности $K_{\text{ПР}} \leq 2$. Следует учитывать и меры по исключению комбинационных частот и интергармоник, которые могут возникнуть при одновременной работе нескольких каналов передачи и нелинейных преобразований тягового тока [ГОСТ 32144–2013] [1].

Для рационального использования рабочей полосы границы частотной характеристики приемо-передающего тракта должны располагаться симметрично относительно несущей частоты сигнала, которая при расчете и реализации избирательной системы должна соответствовать среднегеометрической величине произведения крайних значений частот канала или соседних гармоник [2]. Это позволяет передать и принять без искажения обе боковые частоты манипуляции и минимизировать паразитные переходные процессы, возникающие из-за отличия резонанса избирательной системы и несущей частоты сигнала. Схема построения и параметры элементов L , C , r избирательной системы определяют ее коэффициент затухания $a = r/2L$, длительность процессов установления выходного сигнала и собственную резонансную частоту, в общем случае отличающуюся от расчетной величины [1]:

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{(LC)^{-1} - a^2} = \omega_0 \sqrt{1 - (2Q)^{-2}}. \quad (3)$$

В качестве примера в таблице приведены расчетные значения рабочей полосы и средней частоты некоторых рельсовых каналов связи из ряда (1), селективные свойства которых на приеме могут быть реализованы, по меньшей мере, эллиптическими системами Золотарёва-Кауэра не ниже пятого порядка с необходимым подавлением ближайших гармоник сети на 50–60 дБ [2–7].

Таблица. Расчетные значения рабочей полосы и средней частоты рельсовых каналов связи

| Номер канала по гармонике сети, Гц | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Частота канала присвоенная, Гц | 175 | 275 | 375 | 475 | 575 | 675 | 775 | 875 |
| Частота канала средняя f_0 , Гц | 173,2 | 273,8 | 374,1 | 474,3 | 574,4 | 674,5 | 774,6 | 874,6 |
| Полоса канала расчетная Δf_n , Гц | 23,6 | 22,8 | 22,0 | 21,2 | 20,4 | 19,6 | 18,8 | 18,0 |

Сужение полосы ставит эти каналы в неравные условия по уровню потерь сигнала до 2–3 дБ, и в случае построения универсальной многочастотной аппаратуры локомотивной сигнализации канал с меньшим номером всегда будет иметь худшее отношение сигнал/помеха на приеме по сравнению с последующим, который будет определять предельную скорость передачи в системе.

Расширение полосы по сравнению с данными таблицы может быть достигнуто за счет уменьшения коэффициента прямоугольности, усложнения схемы фильтра на приемной стороне и снижения требований к избирательности на 15–20 дБ. Но это возможно лишь для каналов с номерами более 9–11, для которых уровень ближайших гармоник сети снижается с 25–30 % до 3–5 % от величины тягового тока [4, 7–9].

Дополнительным фактором снижения отношения сигнал/помеха будет наличие многочисленных помех, генерируемых энергооборудованием самого локомотива непосредственно на частотах рабочей полосы [ГОСТ Р 55364–2012, ГОСТ 33436.3-2–2015] и действующих одновременно с гармониками сети. Исследования [4] показывают, что при реальных случаях отклонения коэффициента асимметрии рельсовых линий до 12–20 % уровни суммарных помех могут практически перекрывать пороговые характеристики полезных сигналов в каналах, в том числе для АЛС-ЕН, нормированная полоса приемного тракта которого почти в 1,5 раза шире полосы, занимаемой боковыми частотами сигнала QPSK [ГОСТ Р 55364–2012, ГОСТ 33436.3-2–2015] [10, 11].

При данных показателях затруднительно обеспечить отношение сигнал/помеха выше 7–9 дБ, что объективно ограничивает возможность длительного непрерывного режима приема сигналов АЛС-ЕН даже при идеальной синхронизации [12, 13]. Заметим, что качество работы реальной системы тактовой синхронизация определяется статистикой потока символов логических единиц «1» и нулей «0» в принятом сообщении и в случае ее нестабильности ведет к нарушению условий приема.

2. Процессы установления информационных параметров сигнала с фазовой манипуляцией при передаче по рельсовому каналу

Выполним оценку процессов установления информационных параметров сигнала в узкополосном рельсовом канале при передаче АЛС-ЕН, воспользовавшись выражением (6.56) [14], которое описывает реакцию упрощенной резонансной системы типа одиночного контура на воздействие входного радиоимпульса прямоугольной формы. С учетом введенных обозначений, получим

$$u_{\text{вых}}(t) = A_0 \sqrt{1 - 2e^{-at} \cdot \cos \omega t + e^{-2at}} \cos(\omega t + \xi(t) - \varphi + \psi), \quad (4)$$

где $\varphi = \arctg(\Delta\omega / a)$ — фазовый сдвиг напряжения из-за частотной расстройки; $\xi(t) = -\arctg((\exp(at) - 1) \cdot \operatorname{tg} \omega t)$ — процесс компенсации фазового сдвига при установлении напряжения на выходе контура; ψ — фаза напряжения радиоимпульса на момент включения.

Можно видеть, что при отсутствии начальной расстройки ($\Delta\omega = 0$) амплитуда и фаза выходного колебания резонансной системы будут устанавливаться в соответствии с выражением

$$A_1(t) = A_0 \cdot (1 - e^{-at}) \cdot \cos(\omega_{рез}t + \psi), \quad (5)$$

причем амплитуда не зависит от фазы напряжения входного радиоимпульса, а по истечению времени переходного процесса $t \geq t_{ПЕР}$ будет численно равна A_0 . При выключении возбуждающего колебания амплитуда выходного напряжения будет снижаться до нуля от достигнутого ранее установившегося значения, сохраняя неизменной фазу собственных свободных колебаний по закону

$$A_2(t) = A_0 \cdot e^{-at} \cdot \cos(\omega_{св}t + \psi). \quad (6)$$

Из этого следует, что уже при добротности $Q \geq 10$ коэффициент затухания контура в рассматриваемом диапазоне частот будет меньше единицы и частота свободных колебаний будет близка к расчетной величине

$$\omega_{св} = \omega_{рез} = \omega_0 \sqrt{1 - a^2 / \omega_0^2} \approx \omega_0. \quad (7)$$

Согласно принципу суперпозиции, сигнал на выходе резонансной системы представим [14–16] суммой двух независимых процессов: затухающих колебаний с амплитудой $A_2(t)$, которая устанавливается в системе после прекращения действия возбуждающего сигнала, и нарастающего колебания $A_1(t)$, обусловленного включением нового сигнала с фазой, смещенной на заданный угол. Данное условие при установке фазы скачком представим в следующем виде:

$$u_{вых}(t) = A_2(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0 - \psi) + A_1(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \psi), \quad (8)$$

где φ_0 — текущая фаза сигнала на момент переключения информационного параметра.

Исследуем (8), полагая отсутствие переходных процессов в резонансной системе до момента скачкообразного изменения фазы входного сигнала на угол $\theta = 2\psi$, а также равенство амплитуд огибающих до и после завершения этих процессов [15, 16].

Учитывая известные тригонометрические соотношения, найдем напряжение на выходе контура при условии отсутствия начальной расстройки:

$$(A_1(t) - A_2(t)) \cdot \sin \psi \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = A(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \theta(t)), \quad (9)$$

где

$$A(t) = \sqrt{(A_1(t) + A_2(t))^2 \cos^2 \psi + (A_1(t) - A_2(t))^2 \sin^2 \psi}, \quad (10)$$

$$\theta(t) = \operatorname{arctg}\left(\frac{A_1(t) - A_2(t)}{A_1(t) + A_2(t)} \cdot \operatorname{tg}\psi\right). \quad (11)$$

Выражения (10) и (11) описывают характер модуля огибающей и медленно меняющейся фазы выходного процесса, которые после подстановки (5) и (6) примут вид:

$$A(t) = A_0 \sqrt{1 - 4 \cdot e^{-at} \cdot (1 - e^{-at}) \sin^2 \psi}, \quad (12)$$

$$\theta(t) = \operatorname{arctg}((1 - 2 \cdot e^{-at}) \cdot \operatorname{tg}\psi), \quad (13)$$

а производные этих выражений получим в следующей записи [17]:

$$\frac{dA(t)}{dt} = \frac{2 \cdot (\alpha \cdot e^{-at} - 2 \cdot \alpha \cdot e^{-2at}) \cdot \sin^2 \psi}{\sqrt{1 - 4 \cdot e^{-at} \cdot (1 - e^{-at}) \sin^2 \psi}}, \quad (14)$$

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{\alpha \cdot \sin 2\psi \cdot e^{-at}}{1 - 4 \cdot e^{-at} \cdot (1 - e^{-at}) \sin^2 \psi}. \quad (15)$$

Графики зависимостей (12), (13) приведены на рис. 1 и 2.

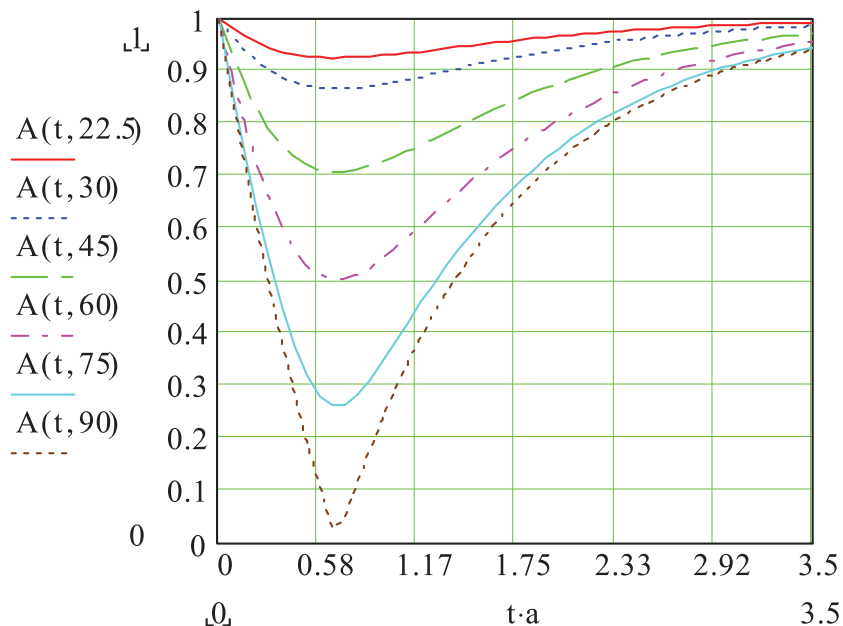


Рис. 1. Изменение амплитуды огибающей результирующего колебания при скачке фазы входного сигнала на угол $Q = 2\psi$

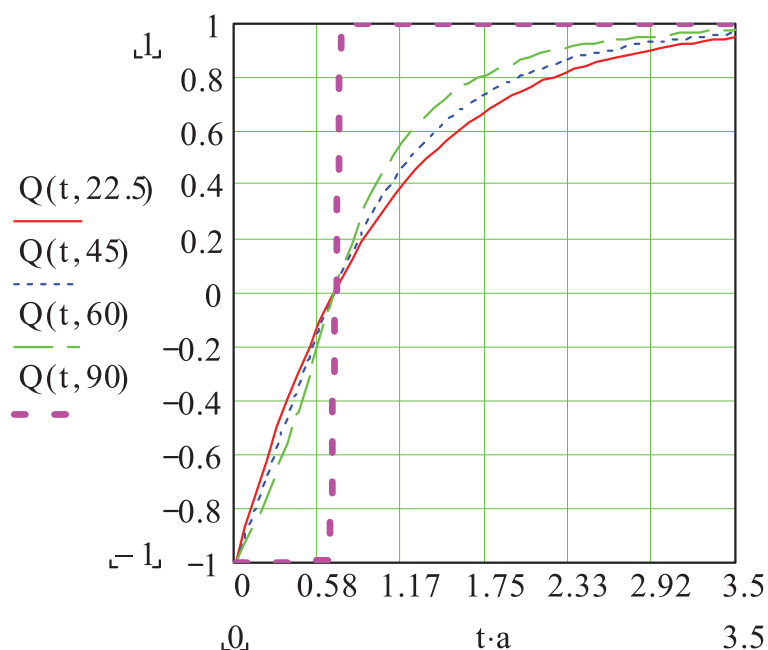


Рис. 2. Процесс установки фазы результирующего колебания при скачке фазы входного сигнала на угол $Q = 2\psi$

3. Математическое моделирование в среде Matlab

Проведем моделирование в среде Simulink (Matlab) на базе реальных сигналов записанных блоком БРС-АЛСН на электропоезде «Сапсан» (ЭВС1-9, № 766, поездка 8 марта 2019 года, время 15:14), где наблюдался сбой приема сигналов АЛС-ЕН. Фрагмент потерянной посылки представлен на рис. 3 и 4.

- В верхнем окне показан исходный сигнал с локомотивных катушек, отфильтрованный полосным фильтром на 175 Гц.
- Во втором окне отображается фаза сигнала.
- В третьем — продифференцированный сигнал.
- В четвертом — продифференцированный сигнал с детектором амплитуды, для отображения синхроимпульсов момента выбега частоты.

Проблема надежного приема сигналов АЛС-ЕН существующим алгоритмом обработки заключается в потере синхронизации во время приема кодов обрабатывающим процессором.

После определения величины угла фазы текущего передаваемого сигнала управляющий контроллер осуществляет поиск значения после 16 периодов несущей частоты. Таким образом, при воздействии помехи в момент выборки или при некорректном определении предыдущего значения весь блок данных может быть потерян. Однако, рассмотрев выбег частоты при скачке фазы входного сигнала (рис. 4), можно сделать следующий вывод: применение диффе-

ренциатора позволяет определять момент перескока фазы без учета контроля амплитуды сигнала.

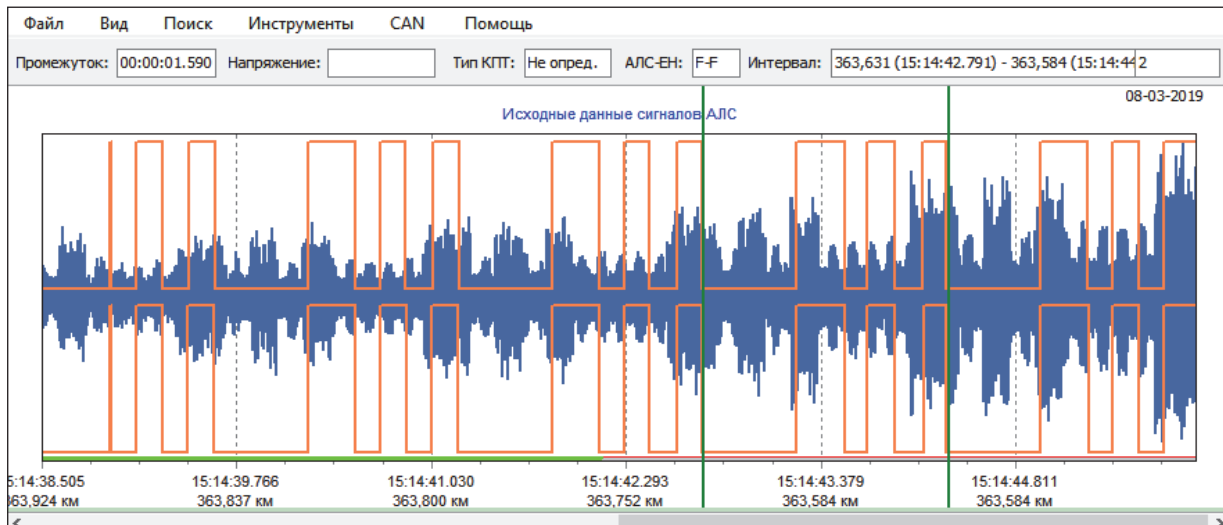


Рис. 3. Зарегистрированный сбой приема АЛС-ЕН

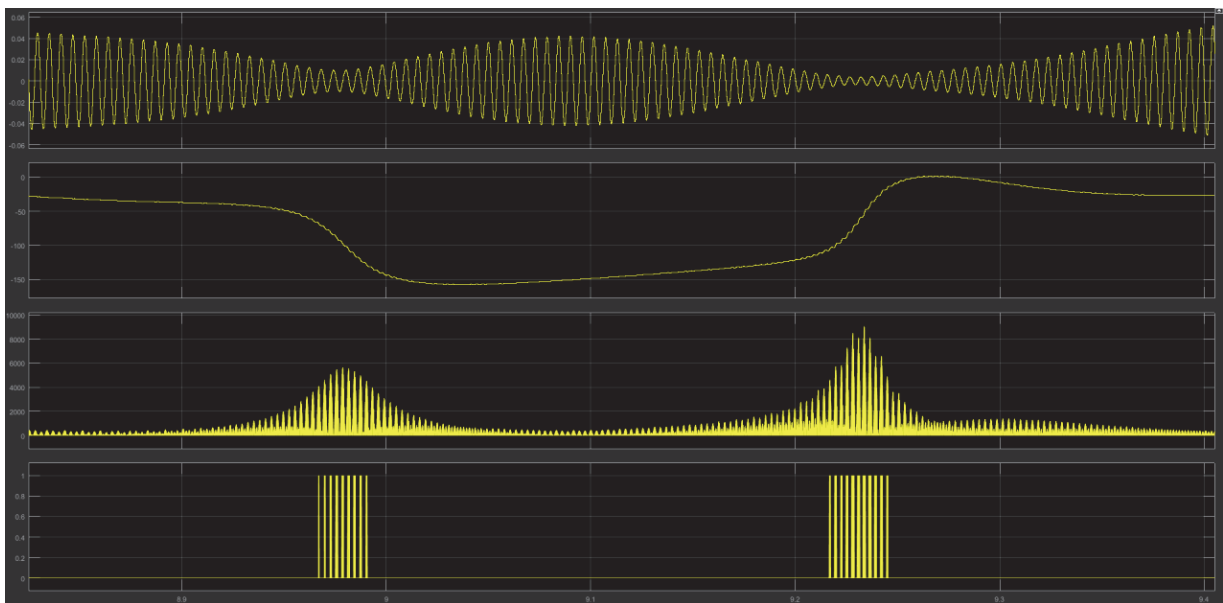


Рис. 4. Переходный процесс сбойного сигнала АЛС-ЕН в среде Matlab с применением методов синхронизации

Заключение

По результатам проведенного анализа видно, что при любом скачке фазы на выходе будет отмечаться снижение амплитуды выходного сигнала и при углах менее 180° оба процесса, начинаясь одновременно, в основном завершаются к безразмерному времени $at \approx 3$. Практическую оценку времени установления

информационных параметров на выходе контура получим на основании (3) в виде

$$T_{\text{УСТ}} = 0,95 / \Delta f_p, \quad (16)$$

где Δf_p — реальная рабочая полоса пропускания канала на уровне 0,707 Гц.

Приравняв числитель производной (14) к нулю, найдем момент времени, когда огибающая амплитуды сигнала после фазового скачка достигнет своего минимума:

$$T_A = a^{-1} \cdot \ln 2 = 0,22 / \Delta f_p, \quad (17)$$

при этом текущее значение амплитуды в зависимости от величины угла может быть получено подстановкой (17) в (12):

$$A(T_A) = A_0 \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \psi}. \quad (18)$$

Процесс установления новой фазы при скачках для всех углов от 0 до 120 включительно имеет приблизительно одинаковую длительность фронта на интервале {0,05–0,95}, но при этом явно несимметричный характер набега фазы относительно отсчетов от среднего нулевого значения. Это предполагает актуальность дополнительных исследований влияния аппаратных и системных погрешностей на момент отсчета фазы при существующем методе однократной пробы, особенно в случае чередующихся символов при увеличении кратности сдвига фаз сигналов. Для углов близких к 180° симметрия процесса установки фазы обеспечивается уже по истечении (17), но сопровождается выраженной амплитудной модуляцией до 100%, что так же остро ставит вопрос об оптимизации динамического диапазона приемо-передающих трактов аппаратуры, условий работы схемы ограничителя сигнала и системы тактовой синхронизации.

Рассмотрение производной (15) и графика на рис. 5 показывает, что знак выбега частоты относительно несущей тождественно совпадает со знаком отклонения фазы и устанавливается сразу после скачка. Момент времени, соответствующий максимуму выбега частоты, флюктуирует по (19) от нуля до значения (17) и для приведенной полосы контура составляет около

$$\Delta t = 0,346a^{-1} = 0,11 / \Delta f_p. \quad (19)$$

При этом величина выбега может превышать выделенную полосу, поражая рабочие сигналы соседних каналов, особенно при скачках на угол ± 180 , что требует помимо избирательности приемных фильтров нормировать и селективность выходных каскадов передающего устройства:

$$T_f = (2a)^{-1} \cdot \ln(4 \sin^2 \psi). \quad (20)$$

При проведении измерений в канале следует учитывать, что наличие регулярного выбега будет влиять на среднее значение частоты в тракте. При передаче последовательностей с преобладающими односторонними скачками меньше 180° это будет отмечено в виде расстройки соответствующего знака с величиной пропорциональной частоте манипуляции:

$$\Delta\omega_v = V \cdot 2\psi, \quad (21)$$

где V — скорость передачи, Бод.

При скачках на 180° направление последующего вращения вектора амплитуды несущей частоты однозначно не определяется и знак выражения (21) может меняться произвольно. Этим, в частности, объясняется отказ от применения когерентного метода приема сигналов из-за неустраняемого эффекта «обратной работы».

Если длительность импульсов существенно меньше длительности переходного процесса, вызванного скачком фазы, импульсы на выходе имеют форму, подобную треугольной (на примере 2τ), а их амплитуды изменяются в зависимости от передаваемых комбинаций «0» и «1», как и время сдвига передаваемой последовательности, определяемое как время достижения огибающей своего

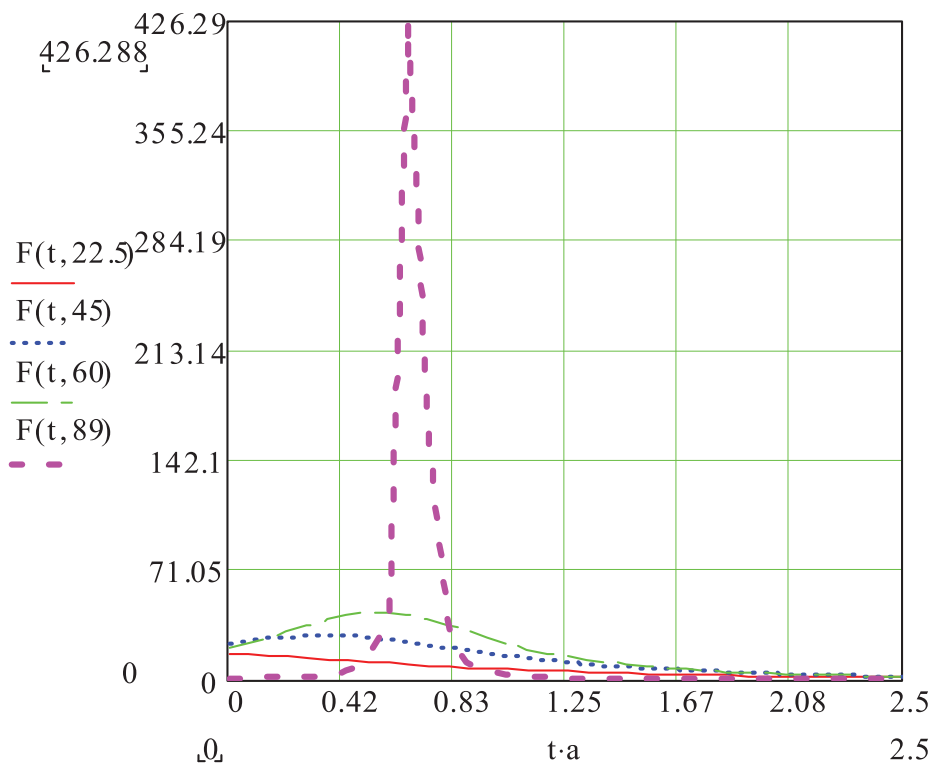


Рис. 5. Выбег частоты при скачке фазы входного сигнала на угол $Q = 2\psi$

минимального значения. Для комбинаций из двух и более «1» время сдвига передаваемой последовательности постоянно. Для комбинаций с различным чередованием «0» и «1» время сдвига нестабильно [13], что приводит к нестабильности символьной частоты определяемой по огибающей. Увеличение числа комбинаций из «0», следующих друг за другом, делает выделение символьной частоты затруднительным.

На основе вышеизложенного формируется оригинальный метод приема кодов сигналов АЛС-ЕН способом «накопления», когда приемник осуществляет накопление сигнала за определенный период времени, затем по паттерну огибающей выделяет в принятом коде необходимый сигнал, а по синхросигналу, формируемому перескоком фазы, приемник может достоверно оценить изменение сигнала и сформировать «точку выборки» текущего цифрового кода в зависимости от качества фидера, что позволит улучшить характеристики приема кодов и как следствие сократить количество сбоев.

Библиографический список

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники в трех частях / Л. А. Бессонов. – 3-е изд. – М.: Высшая школа, 1961. – 792 с.
2. Saal R. Handbook of Filter Design. – W. Germany, Backnang: AEG-Telefunken, 1979. – Pp. 11–23.
3. Rice S. O. Noise in FM receivers. In Rosenblatt, M. (ed.). Time series analysis. – New York: Wiley, 1963. – Pp. 395–422.
4. Шаманов В. И. Помехи на аппаратуру рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации. Средства защиты: учеб. пособие. – М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2019. – 303 с.
5. Shannon C. E. Communication in the presence of noise // Proc. Institute of Radio Engineers. – 1949. – Vol. 37. – No 1. – Pp. 10–21.
6. Shannon C. E. A mathematical theory of communication // Bell System Technical Journal. – 1948. – Vol. 27. – Pp. 379–423, 623–656.
7. Залесова О. В. Экспериментальное исследование гармонического состава тяговых токов // Труды Кольского научного центра РАН. – 2017. – Т. 8. – № 1–14. – С. 52–56.
8. Крюков А. В., Черепанов А. В., Шафиков А. Р. (ИрГУПС). Моделирование несинусоидальных режимов в системах электроснабжения железных дорог при движении локомотивов с асинхронными тяговыми двигателями // Современные технологии, системный анализ, моделирование. – 2018. – № 4. – С. 99–108.
9. Залесова О. В., Якубович М. В. Моделирование влияния железной дороги на линии электропередачи с учетом гармоник сети // Труды Кольского научного центра РАН. – 2010. – № 1. – С. 102–108.
10. Lee E. A., Messerschmitt D. G. Digital Communication. – 2nd ed. – Boston: Kluwer Acad. Press, 1994.
11. Lee J. S., Miller L. E. CDMA Systems Engineering Handbook. – B.; L.: Artech House, 1998. – P. 1258.
12. Розенберг Е. Н., Батраев В. П. Влияние синхронизации на помехоустойчивость приема данных по узкополосному каналу связи // Труды ВНИИАС. – М.: Бизнес Проект, 2005. – Вып. 2. – С. 121–128.

13. Lerner I. M. The Analysis of the Transient Process Caused by a Jump in the Amplitude and Phase of Radio Pulse at the Input of Narrowband Linear System / I. M. Lerner, G. I. Il'in // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2012. – Vol. 57. – No. 2. – Pp. 174–188.
14. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Советское радио, 1977. – 607 с.
15. Евтянов С. И. Переходные процессы в приемо-усилительных схемах. – М.: Связьиздат, 1948. – 211 с.
16. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – 4-е изд. – М.: Высшая школа, 2003. – 462 с.
17. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. Госиздат технико-теоретической литературы, 1956. – 783 с.
18. Sapozhnikov Val. Optimum Sum Codes, that Effectively Detect the Errors of Low Multiplicities / Val. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov, D. Efanov, V. Dmitriev, M. Cherepanova // Radio-Electronics & Informatics. – 2015. – No 1. – Pp. 17–22.
19. Rozenberg E. N., Batraev V. Intelligent onboard train protection system for the northern territories. Lecture Notes in Civil Engineering. – 2020. – Т. 49. – Pp. 243–248.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии
профессором В. И. Шамановым*

Поступила в редакцию 27.11.2020, принята к публикации 25.12.2020

БАТРАЕВ Владимир Владимирович — начальник отдела информационного и цифрового развития научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»)
exartus@mail.ru

© Батраев В. В., 2021

V.V. Batraev

*Department of Information and Digital Development,
Research and Design Institute of informatization, automation and communication in railway
transport (JSC "NIIAS")*

METHODS OF RECEPTION AND SYNCHRONIZATION OF SIGNALS OF AUTOMATIC CAB SIGNALLING

The article discusses the problems of existing methods of receiving automatic cab signalling on railway transport, an original method of receiving and processing data is proposed.

The need to solve the problems is due to the requirement of a qualitative improvement in the reliability of receiving codes, and as a consequence, the capacity of existing lines. First of all, this refers to a significant increase in the quality of reception and processing of information flows from rail lines. Today it is difficult to imagine the organization of the movement of rolling stock without relying on automatic block systems with secondary sealing of tonal track circuits by frequency

modulation signals or automatic cab signaling without the use of multivalued automatic cab signaling with phase-difference modulation. Taking into account the objective fact of noise emission from the operation of energy-intensive railway equipment and modern locomotives, the issues of reliability and noise immunity of receiving discrete information (including signals of traditional automatic cab signaling) are becoming more and more urgent. Analysis of the reasons for the decrease in the reliability and noise immunity of railway automation and telemechanics systems, and, consequently, traffic safety also comes to the fore.

Traffic safety, transportation process, information systems, on-board and floor safety devices, microprocessor devices, risk management

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-175-188

References

1. Bessonov L.A. (1961) *Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki v trekh chastyakh*. Izd. 3. [*Theoretical foundations of electrical engineering in three parts*]. 3rd ed. Moscow, Vysshaya shkola [Higher school] Publ., 792 p. (In Russian)
2. Saal R. (1979) Handbook of Filter Design. Germany W. Backnang: AEG-Telefunken, pp. 11–23.
3. Rice S. O. Noise in FM receivers. Rosenblatt, M. (ed.). *Time series analysis*. New York, Wiley, 1963, pp. 395–422.
4. Shamanov V.I. (2019) *Pomekhi na apparaturu rel'sovykh tsepey i avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii. Sredstva zashchity: uchebnoye posobiye* [*Interference on the equipment of track circuits and automatic locomotive signaling. Means of protection: a tutorial*]. M., FGBU DPO «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte» [“Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport”] Publ., 303 p. (In Russian)
5. Shannon C.E. (1949) Communication in the presence of noise. *Proc. Institute of Radio Engineers*, vol. 37, no 1, pp. 10–21.
6. Shannon C.E. (1948) A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379–423, 623–656.
7. Zalesova O.V. (2017) Eksperimental'noye issledovaniye garmonicheskogo sostava tyagovykh tokov [Experimental study of the harmonic composition of traction currents]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [*Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*], vol. 8, no. 1–14, pp. 52–56. (In Russian)
8. Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Shafikov A.R. (2018) (IrGuPS [Irkutsk State Transport University]) Modelirovaniye nesinusoidal'nykh rezhimov v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznikh dorog pri dvizhenii lokomotivov s asinkhronnymi tyagovymi dvigatelyami [Modeling of non-sinusoidal modes in power supply systems of railways during the movement of locomotives with asynchronous traction motors]. *Sovremennyye tekhnologii, sistemnyy analiz, modelirovaniye* [*Modern technologies, systems analysis, modeling*], no. 4, pp. 99–108. (In Russian)
9. Zalesova O.V., Yakubovich M.V. (2010) Modelirovaniye vliyaniya zheleznoy dorogi na linii elektroperedachi s uchetom garmonik seti [Modeling the influence of the railway on power lines taking into account the harmonics of the network]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [*Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*], no. 1, pp. 102–108. (In Russian)
10. Lee E.A., Messerschmitt D.G. (1994) *Digital Communication*. 2nd ed. Boston, Kluwer Acad. Press.

11. Lee J. S., Miller L. E. (1998) *CDMA Systems Engineering Handbook*. B.; L.: Artech House, pp. 1258.
12. Rosenberg E. N., Batraev V. P. (2005) Vliyaniye sinkhronizatsii na pomexoustoychivost' priyema dannykh po uzkopolosnomu kanalu svyazi [Influence of synchronization on noise immunity of data reception over a narrow-band communication channel]. *Trudy VNIIAS [Proceedings of Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication in Railway Transport]*, Moscow, Biznes Proyekt [Business Project] Publ., iss. 2, pp. 121–128. (In Russian)
13. Lerner I. M., Il'in G. I. (2012) The Analysis of the Transient Process Caused by a Jump in the Amplitude and Phase of Radio Pulse at the Input of Narrowband Linear System. *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 57, no. 2, pp. 174–188.
14. Gonorovskiy I. S. (1977) *Radiotekhnicheskiye tsepi i signaly [Radiotechnical circuits and signals]*. Moscow, Sovetskoye radio [Soviet radio] Publ., 607 p. (In Russian)
15. Evtyanov S. I. (1948) *Perekhodnyye protsessy v priyemo-usilitel'nykh skhemakh [Transient Processes in Receiving and Amplifying Circuits]*. Moscow, Svyaz' izdat Publ., 211 p. (In Russian)
16. Baskakov S. I. (2003) *Radiotekhnicheskiye tsepi i signaly. Izd. 4 [Radiotechnical circuits and signals. 4th ed.]*. Moscow, Vysshaya shkola [Higher school] Publ., 462 p. (In Russian)
17. Vygodsky M. Ya. (1956) *Spravochnik po vysshey matematike [Handbook of Higher Mathematics]*. Gosizdat tekhniko-teoreticheskoy literatury [State Publishing House of Technical and Theoretical Literature] Publ., 783 p. (In Russian)
18. Sapozhnikov Val., Sapozhnikov Vl., Efanov D., Dmitriev V., Cherepanova M. (2015) Optimum Sum Codes, that Effectively Detect the Errors of Low Multiplicities. *RadioElectronics & Informatics*, no. 1, pp. 17–22.
19. Rozenberg E. N., Batraev V. (2020) Intelligent onboard train protection system for the northern territories. *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 49, pp. 243–248.

УДК 656.25

Савинов К. Н., канд. воен. наук

Яшин М. Г., канд. техн. наук

*Кафедра восстановления устройств автоматики, телемеханики
и связи на железных дорогах,*

Военный институт (железнодорожных войск и военных сообщений), Санкт-Петербург

Трубицин В. В.

*Военная академия материально-технического обеспечения
им. ген. А. В. Хрулева, Санкт-Петербург*

БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

В статье представлены базовые принципы функционирования предлагаемой к внедрению системы интервального регулирования движения поездов, являющиеся основой дальнейшего, более детального проектирования. Система базируется на применении радиочастотных идентификаторов (RFID-меток) для определения координат местоположения подвижного состава и предполагает работу по отличным от существующих в настоящее время принципам. Так, принцип перекрытия проходных светофоров позволяет осуществлять движение поездов нестандартных формирований (бронепоездов, составов, имеющих платформы прикрытия, и т. д.). Рассмотрен особый подход к организации защитных участков за хвостом движущегося поезда.

Предлагаемая технология представляет собой специальную систему, направленную на решение определенного круга задач военного времени, поэтому в ней применяется двужначная сигнализация (красный огонь — запрещающий, зеленый — разрешающий). Указанная особенность обусловлена необходимостью обеспечения максимальной простоты этого технического средства, возможностью оперативного развертывания и краткосрочного восстановления.

Базовые принципы в статье являются не полным описанием реализующихся в системе зависимостей и алгоритмов, а лишь начальным этапом дальнейшего создания и разработки принципиальных технических решений.

Интервальное регулирование движения поездов, автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте, радиочастотная идентификация, безопасность движения поездов, железнодорожный транспорт

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-189-201

Введение

Государственная безопасность Российской Федерации, как и любого государства, требует высокой мобильности вооруженных сил. Наиболее приспособленный и перспективный, безусловно, железнодорожный транспорт, который обеспечивает значительную часть перевозок в условиях мирного и военного времени. Силами железнодорожного транспорта выполняется перемещение

войск, подвоз техники, вооружения и прочего материально-технического обеспечения. Железные дороги перевозят около 80 % от общего числа материально-технического обеспечения [1, 2].

Важную роль в процессе организации железнодорожных перевозок играют устройства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) — именно они обеспечивают необходимую пропускную способность, скорость и безопасность движения [3, 4]. Задачи восстановления устройств СЦБ и систем интервального регулирования в том числе во многих случаях должны решаться силами Железнодорожных войск. На современном этапе железнодорожная отрасль стремительно развивается, происходит значительное усиление алгоритмов обеспечения безопасности, повышается сложность электрических схем, возрастает количество микропроцессорных систем. Требуется разработка принципиально новых систем интервального регулирования движения поездов (ИРДП), способных в кратчайшие сроки восстанавливать движение на перегонах.

Актуальность разработки новых систем обусловлена отсутствием необходимых технических решений, позволяющих восстанавливать системы интервального регулирования [5], поскольку сейчас Железнодорожные войска занимаются в основном восстановлением верхнего строения пути и наведением наплавных мостовых переходов через водные преграды.

Существующая нормативная база также требует существенных доработок: основная ее часть разрабатывалась еще во второй половине XX века [6, 7]. В документах описываются и регламентируются устаревшие способы восстановления движения, неприменимые в настоящее время либо не способные обеспечить необходимую в современных реалиях пропускную способность (телефонная (телеграфная) связь, электрожелезная система и релейная полуавтоматическая блокировка).

Предмет исследования статьи — наиболее актуальный для Железнодорожных войск вопрос о разработке способа оперативного восстановления систем интервального регулирования движения поездов с применением технологии радиочастотной идентификации (RFID-меток).

1. Особенности технических средств автоматизации движения поездов в военное время

Наиболее значимый этап внедрения любой новой системы ИРДП — разработка ключевых принципов и алгоритмов ее функционирования. Спецификой предлагаемой к внедрению технологии являются особенности ее применения. Система основана на принципе автоблокировки (АБ) и предназначена для краткосрочного восстановления движения поездов на участках, подвергшихся воздействию разрушающих факторов (нападение противника, воздействие природных, техногенных катастроф и т. д.). Рассматриваемая система должна учитывать все особенности организации движения в таких нестандартных условиях

с сохранением при этом всех базовых принципов обеспечения безопасности движения поездов (БДП), присущих классическим системам железнодорожной автоматики и телемеханики.

Поскольку в РФ 85,5 тыс. км железных дорог, из которых электрифицировано 43,7 тыс. км, в основе грузовых и пассажирских перевозок подвижной состав, не использующий двигатель внутреннего сгорания. Однако в военное время, а также при воздействии природных и техногенных факторов, такой подход ставит под угрозу бесперебойность организации перевозочного процесса, поскольку вывод из строя тяговых подстанций, контактной подвески и прочих систем электроснабжения неминуемо приведет к прекращению движения на всем участке. Поэтому в условиях военного времени главным видом тяговых единиц выступают тепловозы, маневровые локомотивы и дизель-поезда.

Еще одной важной особенностью считается применение в военное время поездов нестандартных формирований и бронепоездов. В таком случае движение может происходить как стандартным образом, так и «вагонами вперед», ведь перед локомотивом, как правило, цепляют «платформы прикрытия», предназначенные для защиты состава от подрыва и схода с рельс. Существующие системы ИРДП не учитывают эту особенность. В них при занятии соответствующей рельсовой цепи перекрытие сигнала на красный происходит через шесть секунд (чтобы не допустить ложное включение красного огня при кратковременном наложении шунта). Движение поезда, имеющего в своем составе вагоны, расположенные перед локомотивом, вызовет перекрытие сигнала на красный прямо перед кабиной машиниста, что противоречит базовым принципам организации безопасности движения на железнодорожном транспорте (в случае действительного появления на светофоре запрещающего показания оно не будет воспринято).

Для исключения этого фактора в разрабатываемой системе предлагается заимствовать принцип реализации маневровых маршрутов станционных систем электрической централизации. При следовании состава по маневровому маршруту перекрытия светофора с занятием первой рельсовой цепи маршрута не происходит [8]. Светофор перекрывается на запрещающий сигнал только после освобождения предмаршрутного участка (либо после освобождения первой секции реализуемого маршрута).

Предлагаемая к внедрению система не предполагает использования рельсовых цепей для определения местоположения подвижного состава. Для этих целей в начале и конце состава устанавливаются идентификаторы RFID (Radio frequency identification), сигнал с которых считывают специальные приемники, расположенные у проходных светофоров. На основании собранной информации делается вывод о состоянии блок-участков (свободен/занят) и о целостности подвижного состава.

Более подробно подход изложен в [9]. Область применения RFID для организации движения довольно широка и описана в различных источниках [10,

11, 12]. Например, в [10] предлагается использовать RFID при организации высокоскоростного движения, удлинении участков приближения и организации точек контроля приближения подвижного состава к станции, а также для своевременного приготовления маршрутов. В [11] даны алгоритмы и методы повышения точности позиционирования RFID-устройств на линиях метрополитена и метод контроля высокочастотного тракта системы бесконтактной привязки пути. В [12] освещены вопросы назначения и структура системы RFID-технологии на метрополитене, обращается внимание на решение задачи контроля ридер-антенного тракта. Авторы упомянутых работ рассматривают применение RFID-технологии на метрополитене и при организации высокоскоростного движения.

Однако возможности использования технологии в области обеспечения безопасности движения поездов весьма широки. В настоящей статье предлагается ее применение для решения задач восстановления движения поездов, прерванного как по причинам катаклизмов природного характера, так и из-за боевых действий или террористических актов.

2. Принципы организации движения

Для восстановления движения на железнодорожных линиях в условиях военного времени предлагается использовать двужначную светофорную сигнализацию: зеленый огонь — разрешающий, красный — запрещающий. Выбор для системы низкой значности обусловлен необходимостью ее быстрого развертывания и низкими скоростями движения воинских эшелонов. Использование большего числа сигнальных показаний значительно усложнит принципиальные электрические схемы и логику работы системы, а в организации минимальных межпоездных интервалов нет необходимости.

На основании особенностей организации движения в военное время и специфики самой технологии предлагается следующая организация взаимодействия RFID-меток с приемниками (рис. 1).

Разрабатываемая система предполагает использование мобильных сигнальных точек (МСТ), представляющих собой мачтовый светофор, устанавливаемый в грунт посредством винтового фундамента [13]. Такой фундамент повышает оперативность развертывания: отпадает необходимость возведения бетонного основания, характерного для стандартных железнодорожных светофоров. К винтовому основанию мачта крепится с помощью болтовых стяжек.

Для повышения живучести сигнальной части мобильных средств восстановления вывод световой индикации производится с применением светодиодных оптических систем.

На мачте такой сигнальной точки устанавливается считыватель радиочастотной идентификации, фиксирующий прохождение и воспринимающий информацию от RFID-датчиков, установленных на подвижном составе. В самом

1. Вариант перекрытия сигнала по первой RFID-метке



2. Вариант перекрытия сигнала по второй RFID-метке



Рис. 1. Принцип перекрытия сигнала

простом варианте системы предлагается размещать радиочастотные датчики в голове и хвосте подвижного поезда.

Как видно из рис. 1, перекрытие сигнала не происходит с проследованием первого радиочастотного идентификатора (принцип реализации маневрового маршрута), тем самым исключается переход светофора на запрещающее показание перед кабиной машиниста и неправильное восприятие сигнального показания. Одно из необходимых условий ограждения блок-участка — проследование двух идентификаторов. Таким образом обеспечивается проследование кабины машиниста за перекрываемый сигнал при любых скоростях движения, неправильное восприятие сигнала исключается.

Особенно важным вопросом является алгоритм функционирования системы при нарушении целостности состава. В существующих ныне перегонных системах автоматики и телемеханики он проработан довольно хорошо: проверяется логика занятия и освобождения рельсовых цепей, исключается кратковременное наложение (потеря) шунта, организуются защитные участки [14].

Однако в системе ИРДП необходимо разработать совершенно новые принципы контроля целостности подвижного состава, поскольку кардинально меняется способ определения местоположения подвижных единиц. В отличие от наиболее распространенных систем АБ, обеспечивающих непрерывный контроль местоположения поезда посредством рельсовых цепей, предлагаемая к внедрению система реализует эти мероприятия точно, посредством установленных на мобильных сигнальных точках RFID-считывателей.

Подход, предусматривающий контроль продолжительности времени между фиксацией первого и второго датчиков, неприменим, т. к. данный метод не предполагает возможность остановки поезда на перегоне либо его следование со скоростью ниже установленной. Вывод о целостности состава должен основываться исключительно на парном взаимодействии RFID-меток со считывателями на мобильных сигнальных точках [6]. Вывод о наличии отцепившихся вагонов нужно производить на основании количества проследованных мобильных сигнальных точек только первым идентификатором. Например, делать вывод о нарушении целостности состава в случае прохождения первой метки через два светофора с разрешающими сигнальными показаниями (однако здесь возникают дополнительные ограничения по максимальной длине состава. Возможно применение и других моделей организации рассматриваемой функции, предполагающих разное количество проследуемых только первой меткой светофоров АБ, на основании чего будет делаться вывод о наличии отцепившихся вагонов.

На рис. 2 и 3 представлена ситуация, при которой происходит нарушение целостности состава и принцип обнаружения этого события. Согласно базовому принципу, предполагающему перекрытие проходного светофора по второй RFID-метке, мобильная сигнальная точка 7 сохраняет разрешающее показание до момента фиксации на светофоре 5 первого идентификатора. После чего система делает вывод о наличии отцепившихся вагонов (т. к. фиксируется проследование нескольких подряд расположенных МСТ только первым идентификатором), проходные светофоры переходят на запрещающее сигнальное показание, осуществляется остановка поезда.

Следующий важный вопрос касается необходимости организации защитных участков (ЗУ) за хвостом движущегося поезда [15]. Рис. 4 показывает два варианта разграничения попутно следующих поездов — с применением ЗУ и без.

Основное назначение данного дополнительного блок-участка в современных системах АБ — ограждение хвоста идущего впереди состава при проследовании машинистом второго поезда запрещающего сигнального показания [16]. Проезд первого по ходу светофора с красным сигнальным показанием вызывает автостопное торможение состава, тем самым не нарушается безопасность движения [17].

Система ИРДП с использованием технологии радиочастотной идентификации не предполагает дублирование показаний напольных светофоров сиг-

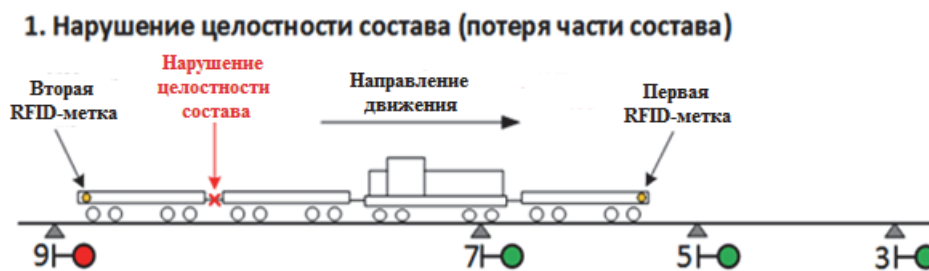


Рис. 2. Нарушение целостности состава

2. Проследование следующих сигнальных точек только первой RFID-меткой



3. Перекрытие сигналов, ограничение БУ, остановка поезда

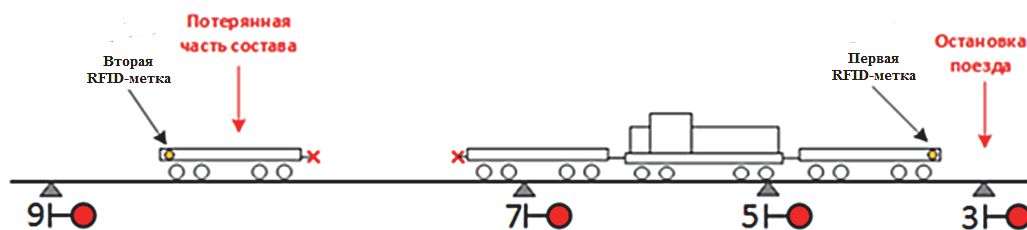


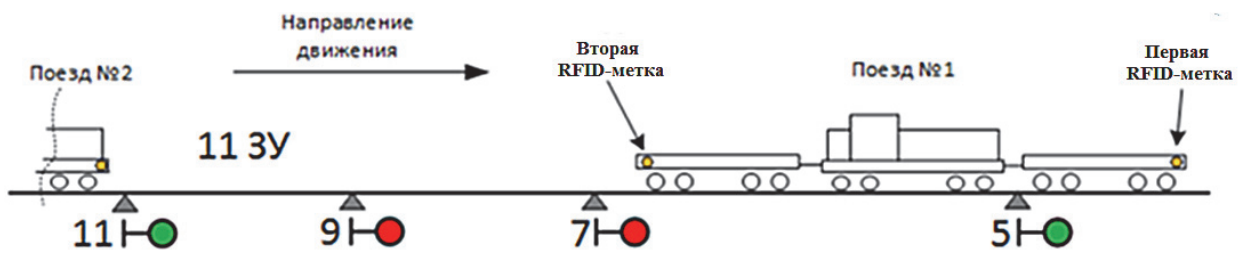
Рис. 3. Принцип контроля целостности состава

налами АЛС (поскольку не используются рельсовые цепи). Помимо задачи дополнительного разграничения попутно следующих поездов дополнительным блок-участком, необходимо решать вопрос соблюдения условий БДП при перегорании (неисправности) лампы красного огня светофора. На рис. 5 представлена ситуация перегорания красного огня на мобильной сигнальной точке 7.

При системе АБ, не имеющей дублирования показаний напольных светофоров показаниями АЛС и не предполагающей наличие ЗУ, запрещающий огонь должен переноситься на предыдущую сигнальную точку 9. Однако в ситуации, когда попутный локомотив уже проследовал напольный светофор 9, такой отказ становится опасным. Нарушаются условия обеспечения безопасности движения. Организация защитных участков исключает влияние данного фактора.

Важной задачей является и обеспечение достоверности считывания меток, их гарантированного крепления и непрерывного контроля. Некоторые вопросы

1. Вариант АБ с защитными участками



2. Вариант АБ без защитных участков

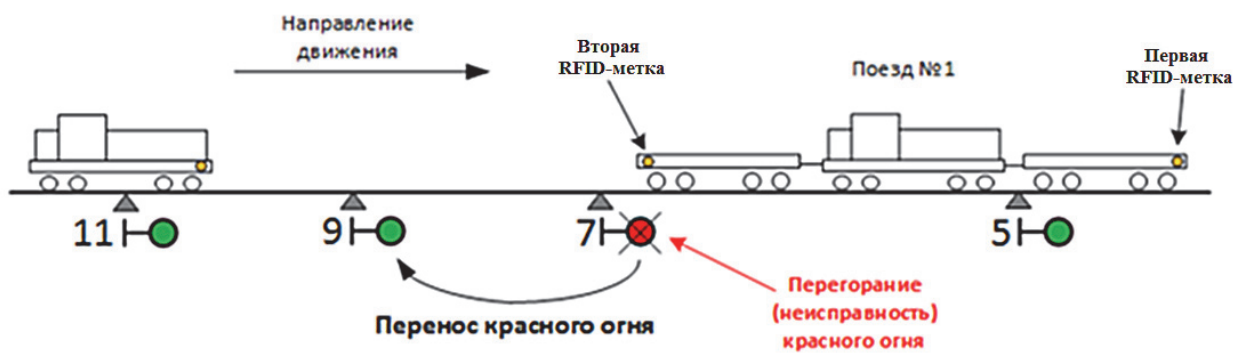


Рис. 4. Принцип организации защитных участков

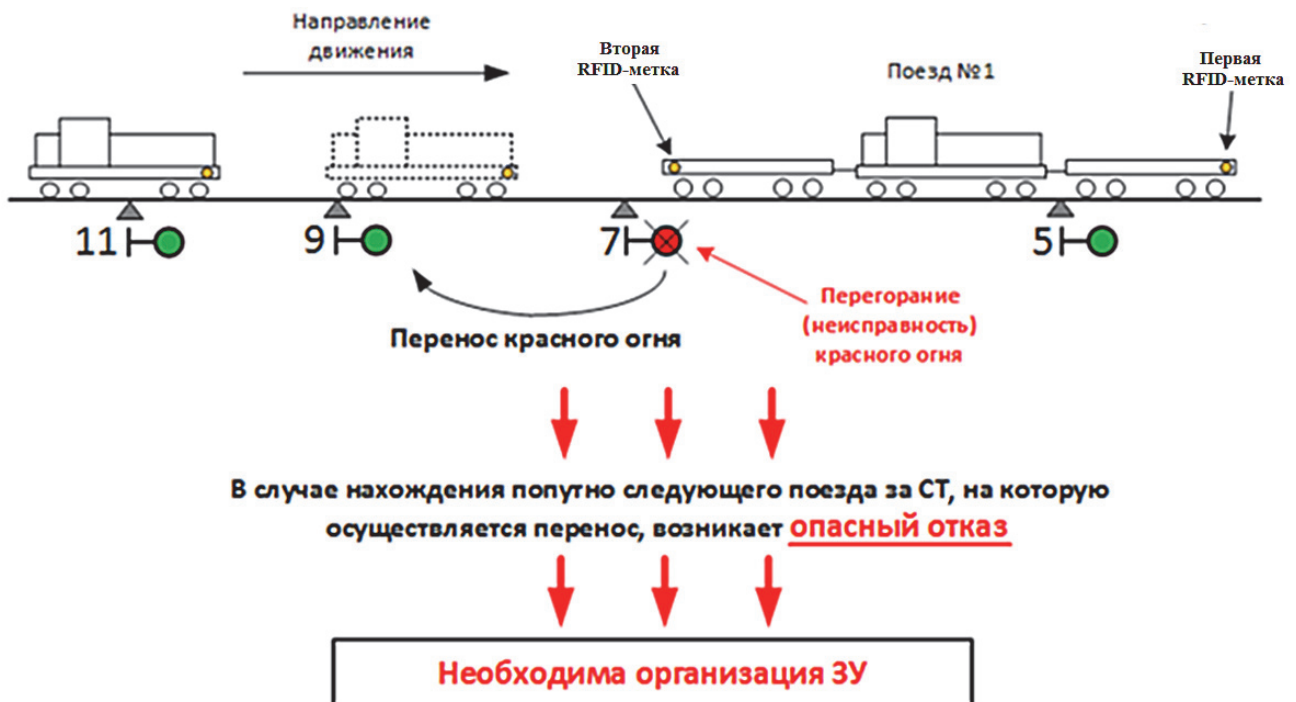


Рис. 5. Ситуация перегорания красного огня на МСТ 7

совершенствования диагностирования радиочастотного тракта и самих меток рассмотрены в [11, 12]. Кроме того, при разработке устройств и систем на микроэлектронной элементной базе следует придерживаться принципов самопроверяемости, самотестируемости и самоконтроля, развитых в [18–20].

Заключение

Таким образом, к обсуждению предлагаются базовые методы обеспечения безопасности и функционирования предлагаемой к внедрению координатной системы интервального регулирования с использованием RFID-идентификации, основная цель которой — оперативное краткосрочное восстановление разрушенных перегонных систем СЦБ.

Разработанные базовые принципы могут стать основой для написания алгоритмов работы, проектирования принципиальных и монтажных схем, принятия конкретных технических решений, а также первым шагом в создании новой системы ИРДП.

Ключевые преимущества технологии — простота, возможность быстрого развертывания и восстановления. Отсутствие сложных технических решений, легкость монтажа и использования — всё это позволит Железнодорожным войскам применять систему исключительно своими силами. Научная новизна проведенного исследования заключается прежде всего в передаче некоторых функций (в т. ч. значности сигнализации) маневровых станционных маршрутов системе интервального регулирования для учета особенностей формирования поездов в условиях военного времени.

Предлагаемая система — первый шаг к созданию ранее отсутствовавшего в Вооруженных Силах РФ технического средства восстановления прерванного движения поездов, предназначенного к использованию Железнодорожными войсками в качестве способа восстановления. Она может стать технической основой для дальнейшего развития этого класса систем, позволит оценить целесообразность тех или иных принципов и технологий на практике, будет важным этапом развития Железнодорожных войск.

Библиография

1. Акулиничев В. М., Правдин Н. В., Болотный В. Я., Савченко И. Е. Железнодорожные станции и узлы: учебник для вузов железнодорожного транспорта. Под ред. В. М. Акулиничева. — М.: Транспорт, 1992. — 480 с.
2. Отчет по научно-исследовательской работе «Организация восстановления регулирования движения поездов на железных дорогах в военное время на основе радиотелемеханического сигнала». — СПб.: ВТИ (ЖДВ и ВОСО), 2009. — 129 с.
3. Theeg G., Vlasenko S. Railway Signalling & Interlocking: 3rd edition. — Germany: Leverkusen PMC Media House GmbH, 2020.
4. Hall C. Modern Signalling: 5th edition. — UK, Shepperton: Ian Allan Ltd, 2016.

5. Ломов В. А. Методы повышения эффективности восстановления железнодорожных устройств сигнализации, централизации и блокировки: дис. канд. техн. наук. – Л.: ВАГТ, 1987. – 171 с.
6. Руководство по подготовке и организации восстановления устройств СЦБ и связи на железных дорогах СССР. – М.: МПС СССР, 1973. – 78 с.
7. Руководство для железнодорожных войск. Восстановление устройств связи и СЦБ. (ВСС-65). – М.: Воениздат. 1965. – 143 с.
8. Кононов В. А., Лыков А. А., Никитин А. Б. Основы проектирования электрической централизации промежуточных станций / Под ред. А. Б. Никитина. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. – 348 с.
9. Система и способ интервального регулирования движения поездов на перегоне с использованием мобильных сигнальных точек и радиочастотной идентификации. Описание изобретения к патенту МПК В61L3/24.
10. Никитин А. Б., Манаков А. Д., Болтаев С. Т. Модернизация перегонных систем для организации высокоскоростного движения на основе RFID-технологии // Бюллетень результатов научных исследований. – 2018. – № 1. – С. 132–142.
11. Костроминов А. М., Тюляндин О. Н. Динамическая диагностика средств радиочастотной идентификации системы бесконтактной привязки пути метрополитена // Автоматика на транспорте. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 467–477. DOI: 10.20295/2412-9186-2019-4-467-477.
12. Костроминов А. М., Крючкова Т. В., Рахманин С. А., Тюляндин О. Н., Стрекаловский Е. А. Контроль RFID-средств в системе бесконтактной привязки к пути подвижного состава метрополитена // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2. – № 3. – С. 348–363.
13. Мобильная сигнальная точка: (RU 198136, опублик. 10.01.2020).
14. Эксплуатационные основы автоматики и телемеханики: учебник для вузов ж.-д. транспорта / Вл. В. Сапожников, И. М. Кокурин, В. А. Кононов, А. А. Лыков, А. Б. Никитин; под ред. Проф. Вл. В. Сапожникова. – М.: Маршрут, 2006. – 247 с.
15. Свод правил СП 235.1326000.2015. Железнодорожная автоматика и телемеханика. Правила проектирования (утверждены приказом Минтранса России № 286 от 21 декабря 2010 г.)
16. Новиков М. А. и др. Проектирование автоматической блокировки на железных дорогах. – М.: Транспорт, 1979.
17. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации (утв. приказом Минтранса России № 286 от 21 декабря 2010 г., с внесением изменений утвержденным приказом Минтранса России № 162 от 4 июня 2012 г.).
18. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Христов Х. А., Гавзов Д. В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики. Под ред. Вл. В. Сапожникова. – М.: Транспорт, 1995. – 272 с.
19. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. – Т. 1: Классические коды Бергера и их модификации. – М.: Наука, 2020. – 383 с.
20. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. – Т. 2: Взвешенные коды с суммированием. – М.: Наука, 2021.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии
профессором А. Б. Никитиным
Поступила в редакцию 28.11.2020, принята к публикации 15.12.2020*

САВИНОВ Константин Николаевич — кандидат военных наук, доцент, начальник кафедры восстановления устройств автоматики, телемеханики и связи на железных дорогах Военного института (железнодорожных войск и военных сообщений)
savin-off@yandex.ru

ЯШИН Михаил Геннадьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры восстановления устройств автоматики, телемеханики и связи на железных дорогах Военного института (железнодорожных войск и военных сообщений)
maikl771@bk.ru
TrES-4b@yandex.ru

ТРУБИЦИН Владимир Владимирович — адъюнкт Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А. В. Хрулева (Санкт-Петербург)
vvt.87@yandex.ru

© Савинов К. Н., Яшин М. Г., Трубицин В. В., 2021

Savinov K. N., PhD in Military sciences
Yashin M. G., PhD in Engineering

Department of Restoration of Automation, Telemechanics and Communication Devices on Railways, Military Institute (Railway Troops and Military Communications), St. Petersburg

Trubitsin V. V.

Military Academy of Logistics named after General A. V. Khrulev, St. Petersburg

BASIC PRINCIPLES OF RECOVERY OF INTERVAL REGULATION OF TRAIN TRAFFIC USING RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION TECHNOLOGY

The article presents the basic principles of functioning of the interval regulation system of train traffic proposed for implementation, which are the basis for further, more detailed design. The system is based on the use of radio frequency identifiers (RFID-tags) to determine the coordinates of the location of the rolling stock and assumes work on principles different from those currently existing. So, the principle of overlapping traffic lights allows the movement of trains of non-standard formations (armored trains, trains with cover platforms, etc.). A special approach to the organization of protective sections behind the tail of a moving train is considered.

The proposed technology is a special system aimed at solving a certain range of wartime tasks, therefore, it uses a two-digit signaling (prohibiting movement red signal, permitting movement green signal). This feature is due to the need to ensure the maximum simplicity of this technical tool, the possibility of rapid deployment and short-term recovery.

The basic principles described in the article are not a complete description of the dependencies and algorithms implemented in the system, but only the initial stage of further development of fundamental technical solutions.

Interval control of train traffic, automation and telemechanics in railway transport, radio frequency identification, train traffic safety, railway transport

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-189-201

References

1. Akulinichev V. M., Pravdin N. V., Bolotny V. Y., Savchenko I. E. (1992) Zheleznodorozhnyye stantsii i uzly. Uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta. Pod redaktsiyey. V. M. Akulinicheva [*Railway stations and junctions. Textbook for universities of railway transport*. Ed. by V. M. Akulinichev]. Moscow, Transport Publ., p. 480. (In Russian)
2. *Otchet po nauchno-issledovatel'skoy rabote «Organizatsiya vosstanovleniya regulirovaniya dvizheniya poyezdov na zheleznykh dorogakh v voyennoye vremya na osnove radiotelemekhanicheskogo signala»*. [Report on research work “Organization of restoration of train traffic regulation on railways in wartime based on R-C signal”]. Saint Petersburg, Military Institute of Railway Troops and Military Communications, 2009, p. 129. (In Russian)
3. Theeg G., Vlasenko S. (2020) *Railway Signalling & Interlocking*. 3rd ed. Germany, Leverkusen PMC Media House GmbH Publ.
4. Hall C. (2016) *Modern Signalling*: 5th ed. UK, Shepperton, Ian Allan Ltd. Publ, 144 p.
5. Lomov V. A. (1987) Metody povysheniya effektivnosti vosstanovleniya zheleznodorozhnykh ustroystv signalizatsii, tsentralizatsii i blokirovki (dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk) [*Methods of increasing the efficiency of restoration of railway signaling devices, centralization and blocking (dissertation of the candidate of technical science)*]. Leningrad, The Military Logistics Academy Publ., 171 p. (In Russian)
6. *Rukovodstvo po podgotovke i organizatsii vosstanovleniya ustroystv STSB i svyazi na zheleznykh dorogakh SSSR* [*Guidelines for the preparation and organization of the restoration of signaling and communication devices on the railways of the USSR*]. Moscow, Ministry of Railways of the USSR Publ., 1973, 78 p. (In Russian)
7. *Rukovodstvo dlya zheleznodorozhnykh voysk. Vosstanovleniye ustroystv svyazi i STSB. (BCC-65)* [*A guide for railroad troops. Restoration of communication devices and signaling systems. (BCC-65)*]. Moscow, Military Publishing Publ., 1965, 143 p. (In Russian)
8. Kononov V. A., Lykov A. A., Nikitin A. B. (2013) *Osnovy proyektirovaniya elektricheskoy tsentralizatsii promezhutochnykh stantsiy* [*Fundamentals of designing electrical interlocking of intermediate stations*]. Ed. by A. B. Nikitin, 2nd ed. Moscow, Federal State Budgetary Educational Institution of Further Professional Education “Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport” Publ., 348 p. (In Russian)
9. *Sistema i sposob interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poyezdov na peregone s ispol'zovaniyem mobil'nykh signal'nykh toчек i radiochastotnoy identifikatsii. Opisaniye izobreteniya k patentu MPK B61L3/24* [*System and method for interval regulation of train traffic on the stretch using mobile signal points and radio frequency identification. Description of the invention to the patent IPC B61L3/24*]. (In Russian)
10. Nikitin A. B., Manakov A. D., Boltayev S. T. (2018) Modernizatsiya peregonnykh sistem dlya organizatsii vysokoskorostnogo dvizheniya na osnove RFID-tekhnologii [*Wayside systems modernization of for organizing high-speed traffic based on RFID technology*]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [*Research results bulletin*], no. 1, pp. 132–142. (In Russian)
11. Kostrominov A. M., Tyulyandin O. N. (2019) Dinamicheskaya diagnostika sredstv radiochastotnoy identifikatsii sistemy beskontaktnoy privyazki puti metropolitena [*Dynamic di-*

- agnostics of radio-frequency identification means of the contactless subway track binding system]. *Avtomatika na transporte [Transport Automation]*, vol. 5, no. 4, pp. 467–477. DOI: 10.20295/2412-9186-2019-4-467-477. (In Russian)
12. Kostrominov A. M., Kryuchkova T. V., Rakhmanin S. A., Tyulyandin O. N., Strekalovsky E. A. (2016) Kontrol' RFID-sredstv v sisteme beskontaktnoy privyazki k puti podvizhnogo sostava metropolitena [RFID control in the system of track contactless binding of the metro rolling stock]. *Avtomatika na transporte [Transport Automation]*, vol. 2, no. 3, pp. 348–363. (In Russian)
 13. *Mobil'naya signal'naya tochka [Mobile signal point]* (RU 198136, publ. 01/10/2020). (In Russian)
 14. Sapozhnikov V. I., Kokurin I. M., Kononov V. A., Lykov A. A., Nikitin A. B. (2006) Eksploatatsionnyye osnovy avtomatiki i telemekhaniki: Uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta pod redaktsiyey Sapozhnikova V. I. [Operational basics of automation and telemechanics: Textbook for universities of railway transport]. Ed. by V. I. Sapozhnikov. Moscow, Marshrut Publ., 247 p. (In Russian)
 15. *Svod pravil SP 235.1326000.2015. Zheleznodorozhnaya avtomatika i telemekhanika. Pravila proyektirovaniya (utverzhdeny prikazom Mintransa Rossii № 286 ot 21 dekabrya 2010 g.) [Code of rules SP 235.1326000.2015. Railway automatics and telemechanics. Design rules (approved by order of the Ministry of Transport of Russia No. 286 of December 21, 2010)].* (In Russian)
 16. Novikov M. A., Petrov A. F., Stepanov N. M. (1979) *Proyektirovaniye avtomaticheskoy blokirovki na zheleznykh dorogakh [Design of automatic blocking on railways]*. Moscow, Transport Publ., 328 p. (In Russian)
 17. *Pravila tekhnicheskoy eksploatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii (utv. prikazom Mintransa Rossii № 286 ot 21 dekabrya 2010 g., s vneseniyem izmeneniy utverzhdenykh prikazom Mintransa Rossii № 162 ot 4 iyunya 2012 g.) [Rules for the technical operation of the railways of the Russian Federation (approved by order of the Ministry of Transport of Russia No. 286 dated December 21, 2010, with amendments approved by the order of the Ministry of Transport of Russia No. 162 dated June 4, 2012)].*
 18. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Khristov Kh. A., Gavzov D. V. (1995) *Metody postroyeniya bezopasnykh mikroelektronnykh sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki [Methods of safe microelectronic systems constructing of railway automation]*. Moscow, Transport Publ., 272 p. (In Russian)
 19. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V. (2020) *Kody s summirovaniyem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. Tom 1: Klassicheskiye kody Bergera i ikh modifikatsii. [Summed codes for technical diagnostic systems. Vol. 1: Classic Berger codes and their modifications]*. Moscow, Nauka Publ., 383 p. (In Russian)
 20. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V. (2021) *Kody s summirovaniyem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. Tom 2: Vzveshennyye kody s summirovaniyem [Summed codes for technical diagnostic systems. Vol. 2: Weighted codes with summation]*. Moscow, Nauka Publ., 455 p. (In Russian)

УДК 629.4.01

В. И. Грек, канд. техн. наук

В. И. Сафонов, докт. техн. наук

Федеральное бюджетное учреждение «Регистр сертификации на федеральном железнодорожном транспорте»

ОДНО КРИТИЧЕСКОЕ ЗАМЕЧАНИЕ К ИСПЫТАНИЯМ БУКСОВЫХ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ СКОРОСТНОГО И ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОДВИЖНОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО СОСТАВА

Выпуск в обращение железнодорожного подвижного состава и его комплектующих на территории Таможенного союза допускается только после подтверждения соответствия требованиям безопасности, установленных техническими регламентами ТР ТС 001/2011 и ТР ТС 002/2011. Когда речь идет о таких важных комплектующих изделиях, как буксовые подшипниковые узлы, применяется поддерживающий стандарт ГОСТ 32769–2014 (или ГОСТ 18572–2014). В стандарте для определения сертификационного показателя при проведении натуральных стендовых испытаний подшипниковых узлов изменяется длительность единичных пробегов. Авторы на примере экспериментальных поездок высокоскоростного поезда показывают: за время, отведенное на единичный пробег (по стандарту), подшипниковые узлы не выходят на максимальные значения сертификационных показателей, что может привести к недостоверной оценке соответствия подшипниковых узлов требованиям безопасности. Для более достоверной оценки максимального превышения температуры подшипниковых узлов скоростного и высокоскоростного подвижного состава и приближения условий стендовых испытаний подшипниковых узлов к натурным условиям их эксплуатации предлагается рассмотреть возможность оставить в поддерживающем стандарте длительность единичных пробегов при проведении стендовых испытаний неизменной, т. е. не зависящей от конструкционной скорости подвижного состава.

Буксовый узел, железнодорожный подвижной состав, безопасность железнодорожного транспорта, конический подшипниковый узел, натурные стендовые испытания, суммарный условный пробег, критерий отказа, единичный пробег, сертификационный показатель, зона нагружения

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-202-215

Введение

Буксовые подшипниковые узлы — важнейшие элементы ходовых частей железнодорожного подвижного состава, от надежности которых во многом зависит безопасность железнодорожного транспорта.

Безопасность железнодорожного транспорта (в т. ч. и буксовых подшипниковых узлов железнодорожного подвижного состава) — это такое его состояние,

при котором отсутствует недопустимый риск, связанный с причинением вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, а также окружающей среде, жизни и здоровью животных и растений. Требования безопасности к скоростному подвижному железнодорожному составу определяются техническими регламентами Таможенного союза ТР ТС 001/2011 «О безопасности железнодорожного подвижного состава» [1] и ТР ТС 002/2011 «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» [2].

Указанные регламенты могут быть распространены на скоростной и высокоскоростной железнодорожный подвижной состав и его составные части, выпускаемые в обращение для использования на железнодорожных путях шириной колеи 1520 мм на территории Таможенного союза со скоростями движения свыше 160 км/ч. Авторы статьи рассматривают подвижной состав с конструктивными скоростями свыше 160 км/ч, ведь именно эта скорость является граничной в стандартах ГОСТ 32769–2014 «Подшипники качения. Узлы подшипниковые конические букс железнодорожного подвижного состава. Технические условия» [3] и ГОСТ 18572–2014 «Подшипники качения. Подшипники буксовые роликовые цилиндрические железнодорожного подвижного состава. Технические условия» [4].

Подшипники качения для букс железнодорожного подвижного состава (согласно приложению № 8 «Перечень отдельных положений технического регламента ТС о безопасности железнодорожного подвижного состава, применяемых при обязательном подтверждении соответствия составных частей железнодорожного подвижного состава») должны соответствовать требованиям технических регламентов, определенных следующими пунктами статьи 4.

Пункт 4: железнодорожный подвижной состав и его составные части по техническому состоянию должны обеспечивать безопасное движение поездов с наибольшими скоростями в пределах допустимых значений.

Пункт 5 б: выполнение условий эксплуатации с учетом внешних климатических и механических воздействий.

Пункт 5 р: прочность при допустимых режимах нагружения и воздействиях.

Пункт 5 с: отсутствие пластических деформаций при приложении продольных и вертикальных расчетных динамических нагрузок.

Пункт 5 т: сопротивление усталости при малоцикловых и многоцикловых режимах нагружения.

Для подтверждения соответствия требованиям пунктов 4, 5 б, 5 р, 5 с и 5 т технических регламентов к буксовым подшипниковым узлам скоростного (высокоскоростного) железнодорожного подвижного состава назначаются стендовые натурные испытания буксовых подшипниковых узлов по ГОСТ 32769–2014 «Подшипники качения. Узлы подшипниковые конические букс железнодорожного подвижного состава. Технические условия», пункты 8.2.8

«Требования к нагреву конических подшипниковых узлов в условиях стендовых натуральных испытаний — по таблице А.2 (приложение А)» и 8.2.9 «Отсутствие отказов в условиях стендовых натуральных испытаний». Либо по ГОСТ 18572–2014 «Подшипники качения. Подшипники буксовые роликовые цилиндрические железнодорожного подвижного состава. Технические условия», пункты 8.2.11 «Требования к нагреву подшипников в условиях стендовых натуральных испытаний» и 8.2.12 «Отсутствие отказов в условиях стендовых натуральных испытаний» (в зависимости от конструкции испытуемого подшипника).

В ходе натуральных стендовых испытаний определение сертификационных показателей проводится в условиях максимально приближенных к условиям эксплуатации подшипников. В работах [5–16] испытатели приводят примеры максимального приближения условий стендовых испытаний к натурным. В работе [17] дан пример эволюции технических требований к колесным парам подвижного железнодорожного состава (в которые и входят буксовые подшипниковые узлы) в нормативных документах в зависимости от этапов развития подвижного состава и учета его эксплуатации на федеральном железнодорожном транспорте.

Авторы данной статьи для повышения достоверности оценок сертификационных показателей подшипниковых узлов при проведении стендовых испытаний по методам вышеприведенных стандартов предлагают рассмотреть их изменение в зависимости от длительности задаваемых единичных пробегов подшипниковых узлов. По результатам анализа экспериментальных поездок высокоскоростного электропоезда «Сапсан» можно проследить, как сертификационные показатели выходят на критические значения за пределами временных интервалов, определенных методами проведения испытаний по указанным стандартам. Для более достоверной оценки максимального превышения температуры подшипниковых узлов скоростного и высокоскоростного подвижного состава и приближения условий стендовых испытаний подшипниковых узлов к натурным условиям их эксплуатации предлагается оценить такую возможность: оставить в поддерживающих стандартах длительность единичных пробегов при проведении стендовых испытаний неизменной, т. е. не зависящей от конструкционной скорости подвижного состава.

1. Подтверждение соответствия буксовых подшипниковых узлов

Требования пунктов 8.2.8 и 8.2.9 ГОСТ 32769–2014 можно считать выполненными, если в ходе натуральных стендовых испытаний буксовых подшипниковых узлов подтверждено (в соответствии с пунктом А.13 указанного стандарта) соответствие сертификационных показателей (табл. А.2 приложения А ГОСТ 32769–2014) требуемым значениям. В статье предлагается остановиться на методе испытаний, изложенном в ГОСТ 32769–2014, т. к. опыт применения буксовых роликовых цилиндрических подшипников для скоростного и высокоскорост-

ного железнодорожного подвижного состава авторам неизвестен. За время, когда узлы прошли назначенный суммарный условный пробег, сертификационные показатели не должны превысить следующие значения.

1. Максимальное превышение температуры в зоне нагружения относительно температуры окружающей среды в течение первых 20 единичных пробегов — не более 80 °С.

2. Максимальное превышение температуры в зоне нагружения относительно температуры окружающей среды в течение каждого единичного пробега, исключая первые 20 единичных пробегов, — не более 70 °С. Допускается свыше 70 °С и до 80 °С, но не более 1 % единичных пробегов.

3. Максимальная разность температур двух буксовых узлов, измеренная одновременно в зонах нагружения в течение каждого единичного пробега в момент достижения максимальной температуры наиболее нагретого узла, — не более 20 °С. Допускается свыше 20 °С и до 25 °С, но не более 2 % единичных пробегов.

4. Максимальная разность температур для каждого буксового узла, измеренная в зоне нагружения между двумя последовательными единичными пробегами, — не более 20 °С. Допускается свыше 20 °С и до 25 °С, но не более 2 % единичных пробегов.

Для двух последних сертификационных показателей замеры проводятся за исключением первых 20 единичных пробегов.

Рассмотрим расчет продолжительности единичного пробега и продолжительности проведения натуральных испытаний конических подшипниковых узлов для высокоскоростного электропоезда «Сапсан».

Детальное описание одного единичного пробега испытаний приведено на рис. 1 (соответствует приложению А рис. А.2. ГОСТ 32769–2014). На графике время разгона соответствует t_3 , время вращения оси станда с постоянной скоростью t_4 , время замедления соответствует времени разгона t_3 , время остановки станда t_5 .

Проведем по данным таблицы А.1 приложения А ГОСТ 32769–2014 расчет продолжительности единичного пробега t_2 :

$$t_2 = 2t_3 + t_4 + t_5.$$

В этом случае расчет будем вести при $t_3 = 10$ мин, $t_4 = 90$ мин и $t_5 = 10$ мин. Продолжительность единичного пробега будет равна 120 мин. При этом значения t_3 и t_4 должны быть в допуске ± 1 мин.

Проведем расчет эквивалентного расстояния, проходимого высокоскоростным электропоездом с испытуемым подшипниковым узлом за один единичный пробег при конструкционной скорости 250 км/ч:

во время разгона будет пройдено 22,9 км;

при номинальной скорости вращения оси станда будет пройдено 412,5 км;

при замедлении — 22,9 км;

итого за один единичный пробег будет пройдено 458,3 км.

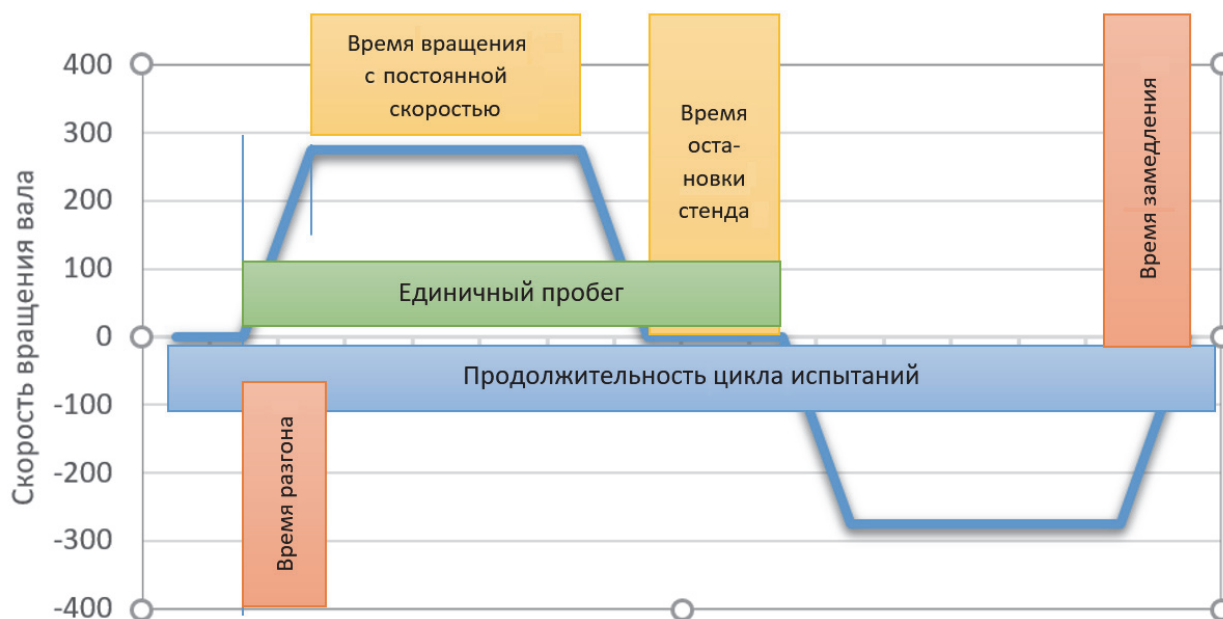


Рис. 1. Временная диаграмма цикла испытаний

(Примечание: скорость вращения вала принимает отрицательные значения во время реверсного движения. Вал стенда вращается вначале в одном направлении, затем в обратном. Этого требует стандарт к испытательному стенду.)

Суммарный условный пробег назначается в зависимости от конструкционной скорости подвижного состава. Если скорость подвижного состава выше 160 км/ч и до 250 км/ч, то суммарный условный пробег в соответствии с пунктом А.11 приложения А ГОСТ 32769–2014 назначается 600 000 км.

Итак, ГОСТ 32769–2014 на натуральных стендовых испытаниях подшипниковых узлов при конструкционных скоростях подвижного состава выше 160 км/ч увеличивает условный пробег подшипниковых узлов с 400 000 км до 600 000 км и одновременно снижает продолжительность единичного пробега с 4 до 2 ч. Увеличение условного пробега логично, но относительно снижения продолжительности единичного пробега у авторов этой статьи возникает вопрос: зачем оно нужно? Почему в таблице А.1 приложения А ГОСТ 32769–2014 значение t_4 уменьшается с 220 до 90 мин? Видимо, разработчики стандартов преследовали цель гармонизации требований и методов проведения испытаний с европейским стандартом EN 12082:2017 (Railway applications — Axleboxes — Performance testing) [18].

2. Результаты экспериментальных поездок высокоскоростных электропоездов

Посмотрим, какова длительность таких условно единичных пробегов высокоскоростных (или скоростных) поездов или локомотивов при их движении по инфраструктуре железных дорог.

1. Высокоскоростной электропоезд «Сапсан» (рис. 2) на маршруте Санкт-Петербург — Москва: от 3 ч 35 мин до 4 ч.

2. Высокоскоростной электропоезд «Сапсан» на маршруте Москва — Нижний Новгород: 3 ч 51 мин.

3. Скоростной поезд «Стриж» (рис. 3) на маршруте Москва — Нижний Новгород: 3 ч 35 мин.

4. Скоростной электропоезд «Аллегро» (рис. 4) на маршруте Санкт-Петербург — Хельсинки: от 3 ч 35 мин до 4 ч.



Рис. 2. Высокоскоростной электропоезд «Сапсан»



Рис. 3. Скоростной поезд «Стриж»

5. Электровоз ЭП-20 «Олимп» (рис. 5) на маршруте Санкт-Петербург — Москва: от 3 ч 45 мин до 4 ч.

Проследим, как изменяется температура подшипниковых узлов двух вагонов высокоскоростного электропоезда «Сапсан» в ходе 4-часовой испытательной поездки на участке Октябрьской железной дороги от Санкт-Петербурга до Москвы.

На рис. 6 и 7 показаны диаграммы изменения температуры подшипниковых узлов под вагонами высокоскоростного электропоезда «Сапсан» и скорости электропоезда в зависимости от времени поездки.



Рис. 4. Скоростной электропоезд «Аллегро»



Рис. 5. Электровоз ЭП-20 «Олимп»

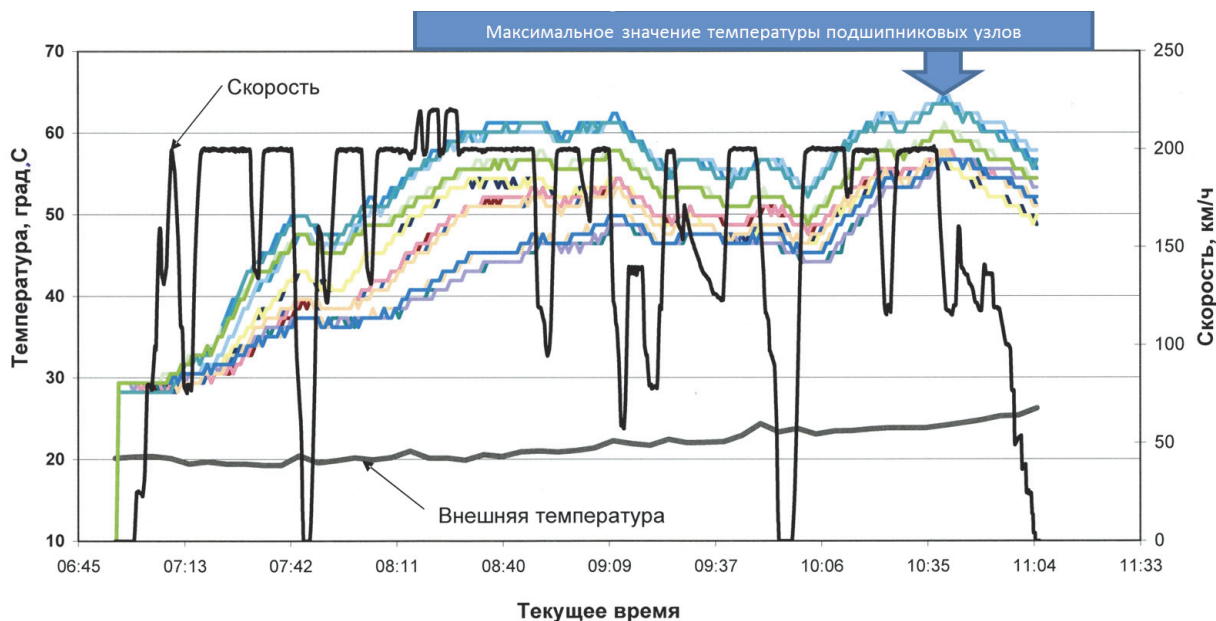


Рис. 6. Диаграмма изменения температуры подшипниковых узлов под вагоном высокоскоростного электропоезда «Сапсан» при первой экспериментальной поездке

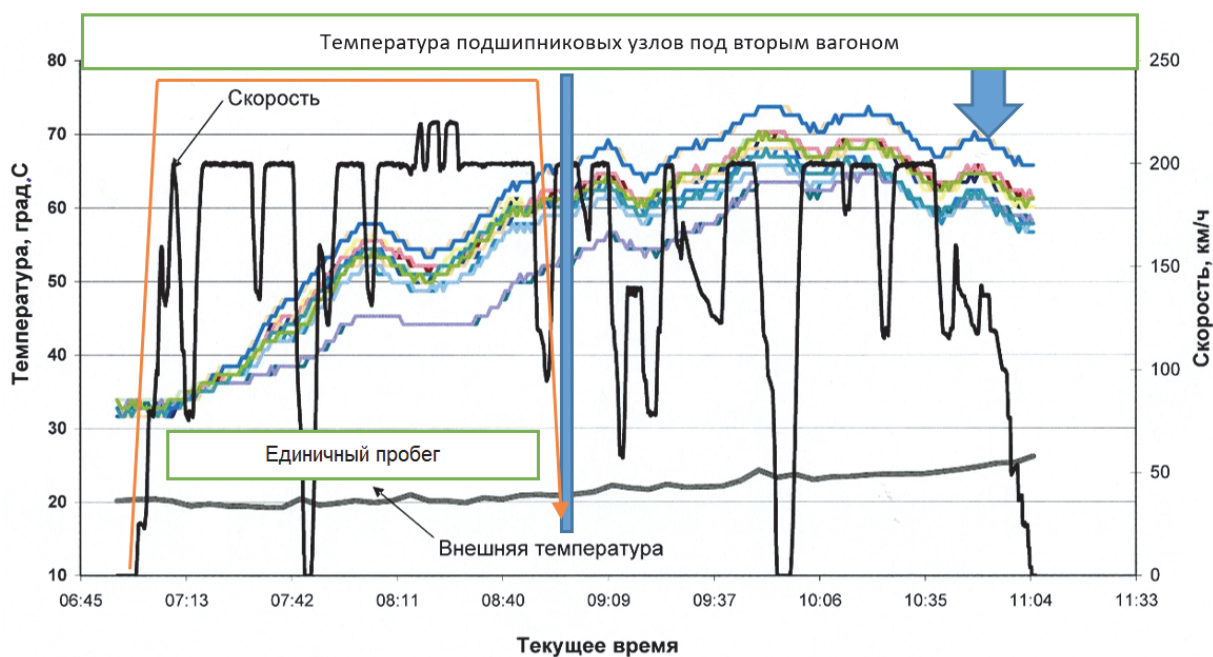


Рис. 7. Диаграмма изменения температуры подшипниковых узлов под вторым вагоном высокоскоростного электропоезда «Сапсан»

Начало поездки — 7:04 (Санкт-Петербург). Остановки в 7:46 (Чудово) и в 9:56 (Тверь) на 1 или 2 мин. Прибытие в Москву в 11:04. Длительность поездки 4 ч. Максимальная скорость при движении поезда была на участке в районе Мстинского моста — 230 км/ч.

На рисунках показан график изменения температуры окружающей среды, то есть температуры охлаждающего воздуха. Температура охлаждающего воздуха плавно изменяется в ходе поездки от 20 до 28 °С.

Сравним эти условия поездки с рекомендуемыми значениями при проведении стендовых натуральных испытаний. Температура охлаждающего воздуха меняется от 20 до 28 °С, ГОСТ 32769–2014 рекомендует поддерживать температуру в диапазоне от 15 до 25 °С.

Максимальная температура подшипниковых узлов достигла 70 °С под первым вагоном через 3 ч после начала поездки и далее начала снижаться. Максимальное превышение температуры в зоне нагружения подшипниковых узлов под другим вагоном относительно температуры окружающей среды составило 47 °С. Под вторым вагоном превышение температуры составило 51 °С тоже примерно через 3 ч после начала пробега.

Таким образом, за время единичного пробега (2 ч) подшипниковые узлы на стенде не успевают разогреться до максимальных значений. При этом и оценка возможного превышения температуры не является достоверной.

Рассмотрим сравнительную диаграмму (прогноз) изменения температуры подшипниковых узлов при испытаниях по циклу для скоростного подвижного состава и по циклу испытаний для скоростей до 160 км/ч (рис. 8).

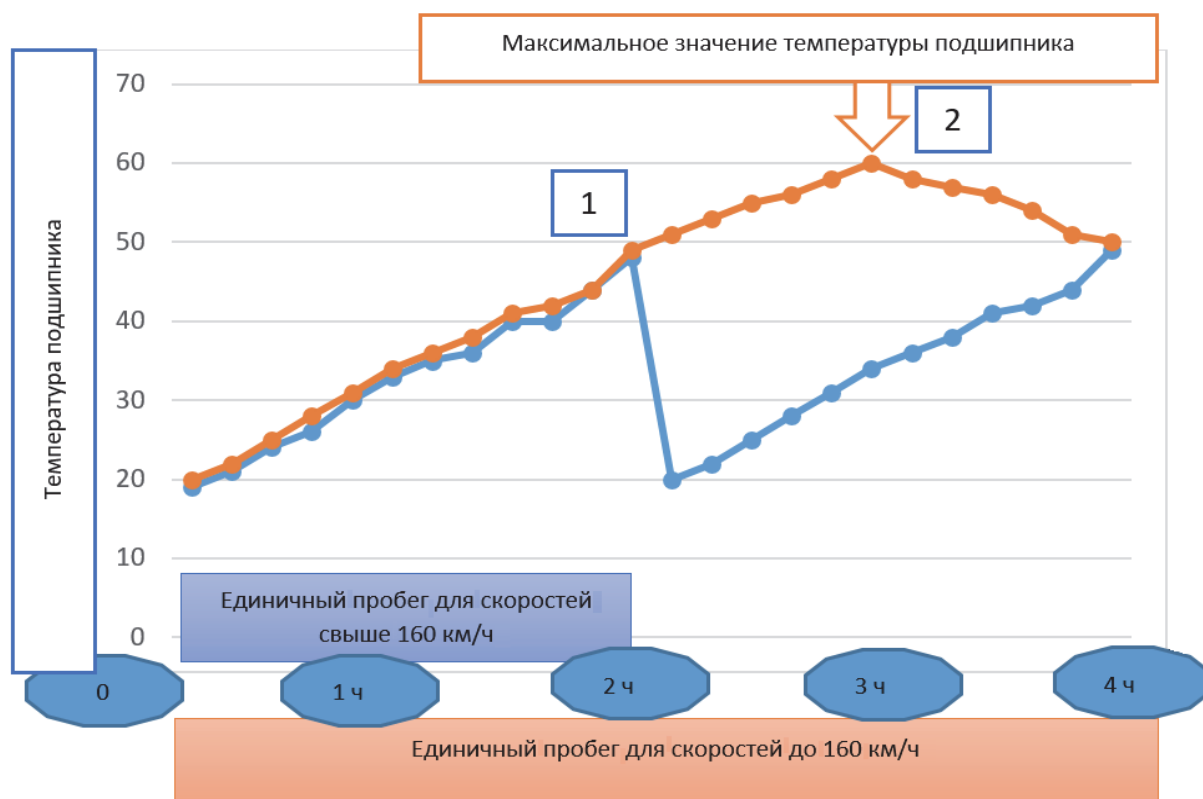


Рис. 8. Сравнительная диаграмма изменения температуры подшипниковых узлов при испытаниях по циклу для скоростного подвижного состава и по циклу испытаний для скоростей до 160 км/ч

После разгона подшипников до расчетных скоростей их температура имеет тенденцию расти до максимального значения (точка 2 на диаграмме), а затем, снижаясь, выходит на некоторое установившееся значение. Время единичного пробега, рассчитанного по методу стандартов [3, 4], обрывает процесс разогрева подшипников. Таким образом, критическая точка 2 остается за пределами оценки значений сертификационных показателей.

Заключение

Комплекс сертификационных испытаний должен обеспечить выполнение требований безопасности при допуске на инфраструктуру российских железных дорог железнодорожного транспорта, в т. ч. букс железнодорожного подвижного состава. При реализации комплекса испытаний должен отсутствовать недопустимый риск, связанный с причинением вреда жизни и здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, а также окружающей среде, жизни и здоровью животных и растений.

С целью снижения таких рисков авторы статьи обращают внимание на необходимость эволюции требований и методов проведения испытаний применительно к отечественным условиям эксплуатации скоростного и высокоскоростного подвижного состава. Следует максимально приблизить условия сертификационных стендовых испытаний буксовых подшипниковых узлов к условиям эксплуатации — без увеличения стоимости проведения испытаний. В нормативных документах возможно предусмотреть использование иных испытательных стендов (к примеру, каткового стенда [5, 6]). Интересен и вопрос использования трассировочной нагрузки на подшипниковые узлы, возникающей на участках применения железнодорожного подвижного состава.

В связи с этим авторы предлагают пересмотреть необходимость уменьшения в таблице А.1 приложения А ГОСТ 32769–2014 значения t_4 с 220 до 90 мин. и оставить его равным 220 мин. Это сделает более достоверной оценку максимального превышения температуры подшипниковых узлов и приблизит условия стендовых испытаний к натурным условиям эксплуатации. Если для оценки сертификационных показателей необходимо сохранить число разгонов и торможений за время испытаний, то существует возможность частичного применения уменьшенного значения единичного пробега.

Библиографический список

1. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 001/2011 «О безопасности железнодорожного подвижного состава»: утв. решением Комиссии Таможенного союза 15.07.2011 № 710) // Официальный сайт Евразийской экономической комиссии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.eec.eaunion.org>.

2. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 002/2011 «О безопасности высоко-скоростного железнодорожного транспорта»: утв. решением Комиссии Таможенного союза 15.07.2011 № 710 // Официальный сайт Евразийской экономической комиссии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.eec.eaeunion.org>.
3. ГОСТ 32769–2014 «Подшипники качения. Узлы подшипниковые конические букс железнодорожного подвижного состава. Технические условия». – М.: Стандартинформ, 2015.
4. ГОСТ 18572–2014 «Подшипники качения. Подшипники буксовые роликовые цилиндрические железнодорожного подвижного состава. Технические условия». – М.: Стандартинформ, 2015.
5. Liu D. Fatigue life prediction of the axle box bearings for high-speed trains / Liu D., Li Q., Hu W., Pan W. // DYNA. – 2017. – № 92. – P. 5.
6. Sen Cai. Fatigue life prediction of high-speed railway bearing based on contact stress / Sen Cai, Gang Zhang // 2017 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM). – 2017. – Pp. 650–653.
7. Li Y. Train axle bearing fault detection using a feature selection scheme based multi-scale morphological filter / Li, Y., Liang, X., Lin, J., Chen, Y., Liu, J. // Mech. Syst. Signal. Process. – 2018. – Pp. 101, 435–448.
8. Haidong, S., Hongkai, J., Xingqiu, L., Shuaipeng, W. Intelligent fault diagnosis of rolling bearing using deep wavelet auto-encoder with extreme learning machine. Knowl.-Based Syst. – 2018. – Pp. 140, 1–14.
9. Марков Д. С. Терминологические особенности этапов разработки и доказательства безопасности железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. С. Марков, О. А. Наседкин, Д. А. Васильев, М. А. Бутузов // Автоматика на транспорте. – 2017. – № 3. – С. 368–379.
10. Batista L., Vadri B., Sabourin R., Thomas M. A classifier fusion system for bearing fault diagnosis // Expert Syst. Appl. – 2013. – Pp. 40, 6788–6797.
11. Белишкина Т. А. Особенности подтверждения соответствия требованиям безопасности железнодорожной автоматики в переходный период после принятия технических регламентов таможенного союза / Т. А. Белишкина // Автоматика на транспорте. – 2016. – № 2. – С. 208–227.
12. Машошин О. Ф. Механизм формирования отказов и причины выхода из строя подшипниковых узлов элементов механизации летательных аппаратов / О. Ф. Машошин, В. К. Харина // Научный вестник МГТУ ГА. – 2007. – № 123. – С. 33–40.
13. Харина В. К. Методика проведения испытаний сферических шарикоподшипников 981000 серии / В. К. Харина // Научный вестник МГТУ ГА. – 2011. – № 173. – С. 141–145.
14. Харина В. К. Методика проведения испытаний подшипников 83700 серии / В. К. Харина // Научный вестник МГТУ ГА. – 2013. – № 197. – С. 130–135.
15. Марков Д. С. Понятийный аппарат экспертизы и испытаний железнодорожной автоматики на безопасность / Д. С. Марков, О. А. Наседкин, Д. А. Васильев, М. А. Бутузов // Автоматика на транспорте. – 2018. – № 1. – С. 30–45.
16. Пивоваров А. О. Стендовое испытание конических подшипников для планетарных передач / А. О. Пивоваров, Вл. П. Шевчук // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 6. – С. 34.
17. Грек В. И. Эволюция технических требований на колесные пары для скоростного подвижного состава / В. И. Грек, Г. И. Михайлов, В. И. Драгун // Вестник ВНИИЖТ. – 2017. – Т. 76. – № 1. – С. 51–56.
18. EN 12082:2017. Railway applications – Axleboxes – Performance testing.

Grek Viktor I., PhD in Engineering
Safonov Vladimir I., Dr. Sci. in Engineering

*Federal Budgetary Organization "Register of Certification on the Federal Railway Transport"
(FBO "RC FRT")*

ONE ISSUE IN REFERENCE TO THE TESTS OF AXLE-BOX BEARINGS FOR HIGH-SPEED ROLLING STOCK

The release of rolling stock and its components for free circulation on the territory of the Customs Union shall be allowed only upon conformity confirmation with the requirements of Technical Regulations TP TC 001/2011 and TP TC 002/2011. For conformity assessment of such critical safety related rolling stock component as axle-box bearings the supporting standard GOST 32769–2014 (or GOST 18572–2014) is used. For traditional and high-speed rolling stock the standard foresees changing of the single run duration in the course of full-scale bench tests of axle-box bearings for determination of certification parameter. The example of the test runs of a high-speed train showed that during the time of such single run (in accordance with the standard) the axle-box bearings fail to reach the maximum values of the certification parameters, which can result in unreliable conformity assessment of the axle-box bearings with the safety requirements.

With the purpose to increase the reliability of the assessment of the maximum temperature of the axle-box bearings for traditional and high-speed rolling stock and also to bring the conditions of the bench tests of axle-box bearings to the full-scale operating conditions as possible, we propose to consider in the supporting standard the possibility of upholding the duration of single runs while conducting bench tests unchanged, independent of the design speed of the rolling stock.

Axle-box unit; rolling stock; safety of the railway rolling stock; taper bearing unit; rig performance test; rated cumulative distance; failure criterion; elementary trip; certification indicator; load zone.

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-202-215

References

1. Tekhnicheskiiy reglament TR TS 001/2011 «O bezopasnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava»: utv. resheniem Comissii Tamozhennogo sojusa 15.07.2011 № 710 // Oficialny sait Evrazijskoji Comissii Electronny resurs – Rezhim dostupa: <http://www.eec.eaeunion.org>. [Technical regulation of CU «On safety of the railway rolling stock»].
2. Tekhnicheskiiy reglament TR TS 002/2011 «O bezopasnosti vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta» utv. resheniem Comissii Tamozhennogo sojusa 15.07.2011 № 710 // Oficialny sait Evrazijskoji Comissii Electronny resurs – Rezhim dostupa: <http://www.eec.eaeunion.org>. [Technical regulation of CU «On safety of the railway rolling stock»].
3. GOST 32769–2014. Podshipniki kachenija. Uzly podshipnikovy konicheskikh buks zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Tehnicheskie uslovija [Rolling bearings. The nodes of the conical bearing axle boxes of railway rolling stock. Technical specifications]. – M.: Standartinform, 2015.
4. GOST 18572–2014. Podshipniki kachenija. Podshipniki bucksovyi rolikovy cilindricheskie zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. Tehnicheskie uslovija. [Rolling bearings. Cylindrical roller box bearings of railway rolling stock. Technical specifications]. – M.: Standartinform, 2015.
5. Liu D., Li Q., Hu W., Pan W. Fatigue life prediction of the axle box bearings for high-speed trains // DYNA. – 2017. – № 92 – P. 5.

6. *Sen Cai, Gang Zhang* Fatigue life prediction of high-speed railway bearing based on contact stress // 2017 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM). – 2017. – Pp. 650–653.
7. *Li Y., Liang, X., Lin J., Chen Y., Liu J.* Train axle bearing fault detection using a feature selection scheme based multi-scale morphological filter // Mech. Syst. Signal. Process. – 2018, 101. – Pp. 435–448.
8. *Haidong S., Hongkai J., Xingqiu, L., Shuaipeng, W.* Intelligent fault diagnosis of rolling bearing using deep wavelet auto-encoder with extreme learning machine. Knowl.-Based Syst. – 2018, pp. 140, 1–14.
9. *Markov D. S., Nasedkin O. F., Vasiliev D. A., Butusov M. A.* Terminologicheskie osobenosti etapov rasrabotki i dokasatelstva besopasnosti zhelesnodorozhnoi avtomatiki i telemekhaniki [Terminological features of development stages and proof of safety of railway automation and telemechanics] // Avtomatika na transporte. – 2017. – № 3. – Pp. 368–379.
10. *Batista L., Badri B., Sabourin R., Thomas M.* A classifier fusion system for bearing fault diagnosis. Expert Syst. Appl. 2013, pp. 40, 6788–6797.
11. *Belishkina T. A.* Osobenosti podtverzhdenia sootvetstvia trebovanijam besopasnosti zheleznodorozhnoy avtomatiki v perekhodnyi period posle prinjatia tehniceskikh reglamentov tamozhennogo sojusa [Features of confirming compliance with security requirements railway automation in the transition period after the adoption of technical regulations of the customs union] // Avtomatika na transporte. – 2016. – № 2. – Pp. 208–227.
12. *Mashoshin O. F., Kharina V. K.* Mekhanizm formirovanija otkasov I prichiny vyhoda is stroja podshipnikovyh uslov elementov mekhanisacii letatelnyh apparatov [The mechanism of formation of cracks and the reasons for the failure of the bearing units of the elements of the mechanization of aircraft] // Nauchny vestnik MGTU GA. – 2007. – № 123. – Pp. 33–40.
13. *Kharina V. K.* Metodika provedenija ispytanijs sfericheskikh sharikopodshipnikov 981000 serii [Test procedure for spherical ball bearings 981000 series] // Nauchny vestnik MGTU GA. – 2011. – № 173. – Pp. 141–145.
14. *Kharina V. K.* Metodika provedenija ispytanijs sfericheskikh sharikopodshipnikov 83700 serii [Test procedure for spherical ball bearings 83700 series] // Nauchny vestnik MGTU GA. – 2013. – № 197. – Pp. 130–135.
15. *Markov D. S., Nasedkin O. F., Vasiliev D. A., Butusov M. A.* Ponjatijnyj apparat ekspertisy i ispytanijs zhelesnodorozhnoi avtomatiki na besopasnost [Conceptual framework for the expertise and testing of railway automation for safety] // Avtomatika na transporte. – 2018. – № 1. – Pp. 30–45.
16. *Pivovarov A. O., Shevchuk V. P.* Stendovoe ispytanie konicheskikh podshipnikov dlja planetarnyh peredach [Bench testing of tapered bearings for planetary gears] // Mezhdunarodnyj studencheskij nauchnyj vestnik. – 2015. – № 6. – P. 34.
17. *Grech V. I.* Evolucija tehniceskikh trebovanij na kolesnye pary dlja skorostnogo podvizhnogo sostava [Evolution of technical requirements for wheelsets for high-speed rolling stock] // Vestnik VNIIZHT. – 2017. – V. 76. – № 1 – Pp. 51–56.
18. EN 12082:2017. Railway applications – Axleboxes – Performance testing.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии
доцентом О. А. Наседкиным
Поступила в редакцию 27.11.2020, принята к публикации 25.12.2020*

ГРЕК Виктор Иванович — кандидат технических наук, инженер-испытатель испытательного центра федерального бюджетного учреждения «Регистр сертификации на федеральном железнодорожном транспорте»
vgrek@yandex.ru

САФОНОВ Владимир Иванович — доктор технических наук, инженер-испытатель испытательного центра федерального бюджетного учреждения «Регистр сертификации на федеральном железнодорожном транспорте»
safonov1953@yandex.ru

© Грек В. И., Сафонов В. И., 2021

УДК 624.94.014.2

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ЛОКАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ КОРОбЧАТОГО СЕЧЕНИЯ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ С ЕЗДОВЫМИ БАЛКАМИ ПО ДАННЫМ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА

Грачев А. А., канд. техн. наук
Никитин Г. И.
Плотников Д. Г., канд. техн. наук
Баните А. В.
Бортяков Д. Е., канд. техн. наук
Габриель А. С.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург*

В статье приведена методика автоматизации расчета локальных напряжений от приложения сосредоточенной нагрузки на дополнительных конструктивных элементах коробчатого сечения пролетных строений с ездовыми балками по данным непрерывного мониторинга для оценки текущего технического состояния и последующего прогнозирования состояния конструкции. Обоснована необходимость применения аналитического подхода к оценке напряженно-деформированного состояния конструкции на начальных стадиях проектирования и технической эксплуатации. Показаны недостатки существующего аналитического подхода к оценке напряжений. С учетом имеющихся ресурсов была разработана и осуществлена приемлемая программа исследования, которая позволила бы получить удовлетворительные результаты. В соответствии с программой проведена серия численных экспериментов с использованием программного обеспечения, дающего возможность моделировать сложные конструкции и решать их с применением метода конечных элементов, направленных на получение массива данных, которые позволили бы повысить точность существующего аналитического решения. С помощью применения программного обеспечения, направленного на обработку массивов научных данных, получены математические зависимости искомых параметров от исходных конструктивных данных. Выведены формулы и исходные данные для вычисления поправочных коэффициентов, которые позволяют повысить точность вычисления локальных напряжений сжатия и изгиба. Эти формулы были совмещены с уже имеющимися аналитическими зависимостями в целях получения несложной методики определения фактических локальных напряжений от приложения опосредованной концентрированной нагрузки. В результате научно-исследовательских изысканий предложен новый способ аналитического определения локальных напряжений изгиба и сжатия в ездовых балках на основании анализа существующей методики и серии численных экспериментов.

Система мониторинга, прогнозирование, техническое состояние, металлическая конструкция, ездая балка, локальные напряжения

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-216-230

Введение

Контроль технического состояния конструкций транспортно-технологических машин и оборудования на протяжении всего жизненного цикла позволит разрабатывать и корректировать дорожные карты технического обслуживания и ремонтов этих объектов.

При использовании технологий непрерывного мониторинга технического состояния инженерных конструкций можно получать наборы данных с датчиков (тензометров, инклинометров, акселерометров и т. д.) для разработки прогнозных моделей технического состояния с учетом воздействия на объект как нагрузок нормального рабочего состояния, так и экстремальных воздействий [1, 2].

Обеспечение безопасной эксплуатации сложных технических систем — одна из приоритетных задач современной промышленности и транспорта [3]. Существенным ее аспектом является обеспечение прочности металлических конструкций крупных транспортных и технологических машин и сооружений транспортной инфраструктуры [4, 5]. При существующем уровне развития технологии не представляется возможным обеспечить безусловную надежность конструкции на этапе проектирования. При моделировании несущей способности конструкций нельзя учесть влияние всех внешних воздействий, а также накопленных повреждений, возникающих при длительной эксплуатации. Поэтому для обеспечения безопасности ответственных объектов используются возможности мониторинга технического состояния конструкции [6–9].

Однако, несмотря на полноту получаемых данных, существенной научной проблемой остается прогнозирование остаточного ресурса конструкции объекта мониторинга [1]. На практике чаще всего применяется анализ трендов, по которому возможно оценить скорость приближения контролируемого параметра к критическому значению, заложенному в проекте. Проблема такого подхода — отсутствие возможности учета локальных напряжений, возникающих в элементах конструкции. Пересчет локальных напряжений по данным цифрового двойника весьма трудоемок и не может дать информацию об уровне указанных напряжений в режиме реального времени. Как следствие, возникает необходимость анализа типовых конструктивных решений для разработки приближенных аналитических методик расчета локальных параметров напряженно деформированного состояния для дальнейшего применения при формировании прогнозов технического состояния.

Цель статьи — исследование локальных напряжений в элементах коробчатого сечения пролетного строения при расположении рельса над стенкой. Подобная

конфигурация характерна, например, для ездовых балок, применяемых в металлических конструкциях грузоподъемных кранов мостового типа.

1. Состояние проблемы

К металлическим конструкциям ответственных машин и сооружений предъявляют особые требования, такие как надежность и долговечность. Эти требования относятся и к кранам различного типа, которые широко используются в разнообразных транспортных и технологических процессах. Основная задача при проектировании металлоконструкции ездовых балок связана с обеспечением прочности и долговечности узла, воспринимающего местное давление от ходовых колес тележки. Все повреждения, вызванные давлением ходовых колес тележки, имеют усталостный характер [10, 11], вследствие чего возникают продольные трещины вдоль поясного шва между поясом и стенкой. Это объясняется тем, что в узле, воспринимающем локальные нагрузки от колеса, возникают высокие местные напряжения. Кроме того, число циклов изменения этих напряжений за срок службы балки обычно превышает число циклов работы крана, т. к. один цикл совершается за проход одного колеса, а по балке движется не менее двух колес.

В ездовых балках наиболее нагружен узел соединения пояса со стенкой, расположенный под рельсом, который называют подрельсовым узлом [12]. Он нагружается сжатием от вертикального давления колеса, а также местным изгибом, который возникает в результате смещения рельса относительно оси стенки. Большое давление, малая длина его распределения, специфические условия контакта колеса с рельсом приводят к состоянию с высоким уровнем напряжений.

На сопротивление усталости подрельсового узла определяющее влияние оказывает местный изгиб стенки. Он возникает из своей плоскости в результате действия целого ряда факторов: эксцентриситета рельса относительно оси стенки, поперечного смещения колеса на рельсе, неплоскостности стенки и пояса над стенкой, а также действия горизонтальной нагрузки. Многие из этих факторов имеют случайный характер. Существует ряд методик определения местных изгибных напряжений в стенке, однако большой разброс параметров нагружения подрельсового узла, как и многообразие сочетаний факторов, обуславливающих местный изгиб, существенно снижают достоверность теоретических оценок. В этой ситуации применение метода конечных элементов может повысить надежность расчета только при наличии достаточно достоверных исходных данных. Для этого должна быть обеспечена точная установка рельса относительно стенки, снижены боковые нагрузки на рельс, сведено к минимуму искривление стенки и пр.

Опыт обследования металлических конструкций крана авторами статьи показывает, что ось кранового рельса редко совпадает с осью подкрановой балки

и нагрузка с рельса передается с некоторым эксцентриситетом, который часто превосходит нормируемое смещение (15 мм) и достигает 40–45 мм. Вместе с увеличением эксцентриситета возрастают сжимающие напряжения с одной стороны стенки. Значения указанных напряжений способны достигать предела текучести материала, а с противоположной стороны могут появиться растягивающие напряжения. В рамках решения задачи об определении локального напряженно-деформированного состояния рельс с поясом можно рассматривать как балку, лежащую на сплошном упругом основании. В результате местного давления рельс с поясом работает на изгиб, а часть стенки балки, представляющая собой упругое основание, — на сжатие. Методика определения напряжений в вертикальной стенке балки от местного воздействия скручивающего момента, возникающего как от вертикальной силы P при действии ее с эксцентриситетом e , так и от горизонтальных приложенных к рельсу сил, разрабатывалась А. А. Апалько [13], О. Ф. Иванковым [14], И. М. Одиным [15], И. Е. Спенглером [16], Г. А. Шапиро [17].

Сложность напряженного состояния и многообразие факторов, влияющих на работу стенки, не позволили получить строгого теоретического решения местного изгиба стенки, и все авторы при решении задачи вводили те или иные упрощения.

Неопределенность передачи нагрузки увеличивается в результате случайного расположения пятен контакта. В верхнем поясе в зоне приложения нагрузки возникают локальные напряжения изгиба σ_x'' и σ_z'' [18]. Распределение этих напряжений на кромке пояса соизмеримы с напряжениями от общего изгиба балки и, суммируясь с общими напряжениями, могут привести к раннему развитию пластичности.

2. Методика исследования

Действующие методики расчета с помощью метода конечных элементов проверялись на основе результатов натуральных испытаний статьи [19], выпущенной в журнале «Труды Ленинградского политехнического института» под авторством д. т. н. профессора С. А. Соколова. В статье «Местные напряжения от давления колеса в коробчатой балке в стенке над рельсом» была проверена формула Б. М. Броуде [20] с учетом эксцентриситета. Результаты аналитических формул сопоставили с показаниями тензометров, закрепленных на коробчатых балках. В результате описанного в статье исследования данные, полученные от двух методов исследования, были примерно одинаковыми, что говорило о высокой степени точности предложенных формул.

Для определения локальных напряжений сжатия и изгиба воспользовались формулой Броуде [20], в которую ввели два дополнительных коэффициента: условную ширину пояса и эксцентриситет рельса. Локальные напряжения сжатия определяются следующим образом:

$$\sigma^{\text{сж}} = \frac{P \xi}{\delta_c (\lambda + 2e)}, \quad (1)$$

где P — вертикальная сосредоточенная нагрузка; ξ — коэффициент, учитывающий разгружающее влияние вертикальных ребер жесткости; δ_c — толщина стенки; λ — приведенная длина зоны распределения локального сжатия, e — эксцентриситет.

Приведенную длину зоны распределения локального сжатия можно определить по формуле:

$$\lambda = 3,26 \sqrt[3]{J / \delta_c},$$

где $J = J_p + J_n$ — суммарный момент инерции (J_p — момент инерции рельса; J_n — момент инерции пояса).

Коэффициент ξ зависит от суммарного момента инерции J и расстояния между осями диафрагм балки, l :

$$\xi = \frac{1}{0,95(1 + 23 \frac{J}{l^3 \delta_c})}.$$

Локальные напряжения изгиба могут быть определены по следующей зависимости:

$$\sigma^{\text{изг}} = \frac{3 P e R_l}{\delta_c^3 \Lambda \left(1 + \frac{S_c \delta_n^3}{S_n \delta_c^3} \right)}, \quad (2)$$

где R_l — коэффициент влияния опор; Λ — характеристическое выражение балки на упругом основании; S_c, S_n — гиперболические функции; μ — коэффициент Пуассона; h — высота коробчатой балки; b — внутреннее расстояние от стенки до стенки:

$$\Lambda = 1,66 \sqrt[4]{\frac{S_n J_p e^2 l (1 - \mu^2)}{\delta_n \left(1 + \frac{\delta_c^3}{\delta_n^3} \right)}}.$$

Гиперболические функции S_c, S_n зависят от геометрических параметров балки:

$$S_c = h a c t h^2 a h - c t h a h - a h;$$

$$S_{II} = b a c t h^2 a b - c t h a b - a b;$$

$$a = \pi / l;$$

$$\eta_x = e^{-\frac{x}{l}} \left(\cos \frac{x}{\Lambda} + \sin \frac{x}{\Lambda} \right).$$

Проверка предложенных расчетных формул осуществлялась замером показателей тензометров, установленных на двух коробчатых балках. Геометрические характеристики и расчетная схема исследуемых балок представлена на рис. 1 и в табл. 1. Для оценки качества аналитической методики [10] провели серию численных экспериментов в среде Femap.

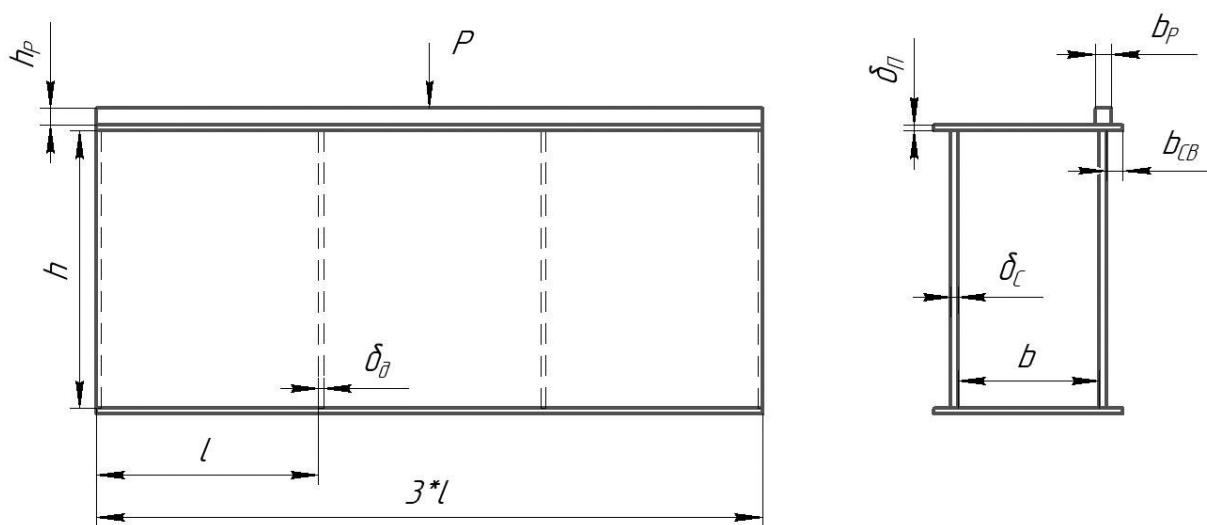


Рис. 1. Расчетная схема коробчатой балки

Таблица 1. Геометрические характеристики коробчатой балки

| № экс-перимента | Индекс модели | Геометрические характеристики модели, мм | | | | | | | | | P | Марка стали |
|-----------------|---------------|--|------------|------------|-----|-----|----------|-----|-------|-------|----|-------------|
| | | δ_n | δ_c | δ_d | l | b | b_{cb} | h | b_p | h_p | | |
| 1 | M1.1 | 10 | 6 | 6 | 400 | 200 | 25 | 404 | 20 | 20 | 2 | Ст3 |
| 2 | M1.2 | 10 | 6 | 6 | 400 | 200 | 25 | 404 | 40 | 40 | 2 | |
| 3 | M2 | 18 | 5 | 4 | 400 | 400 | 50 | 428 | 57 | 40 | 10 | |

3. Анализ полученных результатов и выводы

Расчет был выполнен методом конечных элементов в проектно-вычислительном комплексе Femap with NX Nastran. Комплекс реализует конечно-элементное моделирование статических и динамических расчетных схем, проверку

устойчивости, выбор невыгодных сочетаний усилий, проверку несущей способности стальных конструкций. Расчетная схема в среде Femap with NX Nastran представлена на рис. 2. Геометрические характеристики исследуемых балок представлены в табл. 2. Результаты, полученные при аналитическом и численном моделировании, представлены на рис. 3 и 4.

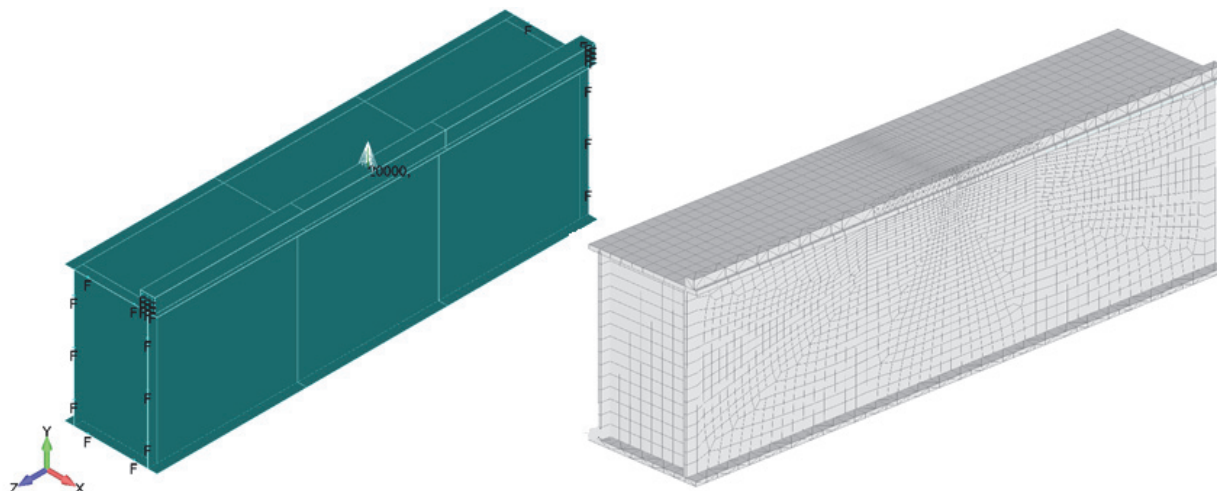


Рис. 2. Расчетная схема и расчетная модель после разбиения на конечные элементы в среде Femap

Таблица 2. Геометрические характеристики исследуемых балок

| № балки | Геометрические характеристики модели, мм | | | | | | P , тс |
|---------|--|------------|------------|-----|-----|----------|----------|
| | δ_n | δ_c | δ_d | l | b | $b_{св}$ | |
| 1 | 12 | 6 | 6 | 400 | 200 | 25 | 2 |
| 2 | 20 | 10 | | | | | |
| 3 | 28 | 14 | | | | | |
| 4 | 36 | 18 | | | | | |
| 5 | 40 | 20 | | | | | |

Сравнение результатов расчета локальных напряжений с применением аналитической методики [20] и с помощью метода конечных элементов показывает значительное расхождение. Аналитический метод расчета демонстрирует результаты, значительно превышающие полученные на основании численного эксперимента.

Однако количества натурных испытаний (3 шт.), приведенных в статье [19], недостаточно, чтобы сделать заключение о некорректности применения методики [20] для оценки локальных напряжений в общем случае. Поэтому было

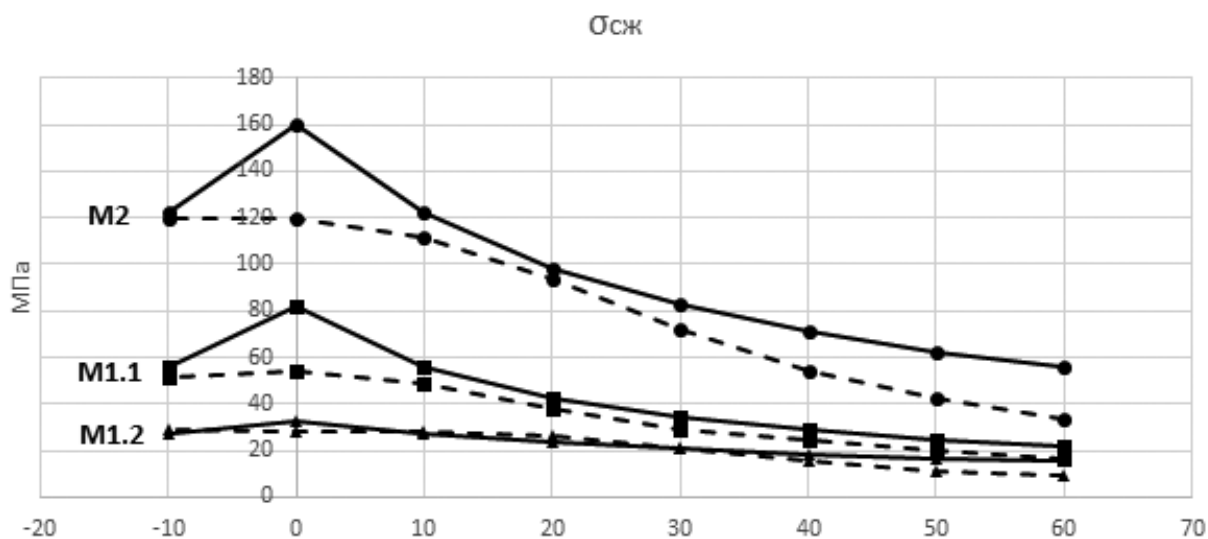


Рис. 3. Сравнение результатов, полученных для сжимающих напряжений $\sigma^{сж}$ (сплошная линия — аналитическое решение, штриховая — численное моделирование)

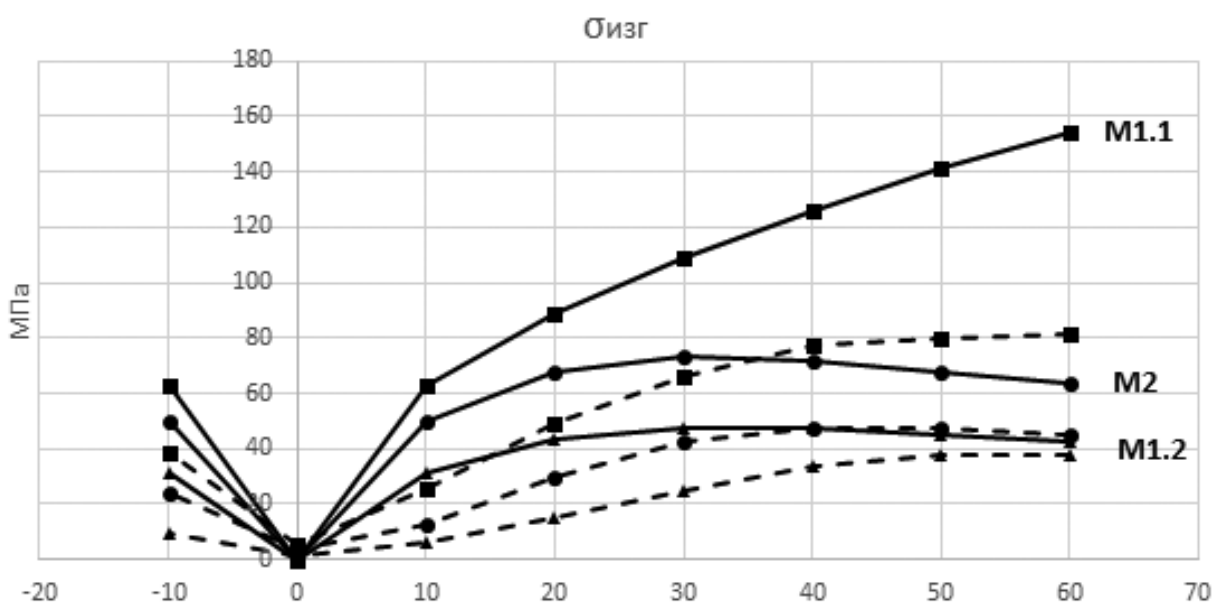


Рис. 4. Сравнение результатов, полученных для изгибных напряжений $\sigma^{изг}$ (сплошная линия — аналитическое решение, штриховая — численное моделирование)

принято решение провести серию численных экспериментов с различными геометрическими характеристиками сечения балки и рельса. Сечение рельса для численного эксперимента было выбрано квадратное, а размеры варьировались от 20×20 мм до 50×60 мм. Всего было выбрано 10 вариантов исполнения рельсов: 20×20 мм; 20×40 мм; 30×20 мм; 30×40 мм; 30×60 мм; 40×40 мм; 40×60 мм; 50×40 мм; 50×50 мм; 50×60 мм. Это исследование позволило получить массив данных, позволяющих оценить целесообразность использования проверяемой методики [20] для расчета напряжений в подрельсовом узле.

Обработка результатов серии численных экспериментов показала, что расчетные значения локальных напряжений, полученные аналитическим методом, превышают значения, полученные путем численного моделирования на всем диапазоне варьируемых параметров. В среднем указанное превышение для 50 проведенных опытов составило 0,8 для изгибающих и сжимающих напряжений. Для наглядности представлены графики, показывающие зависимость напряжений от эксцентриситета для двух вариантов анализа (рис. 5).

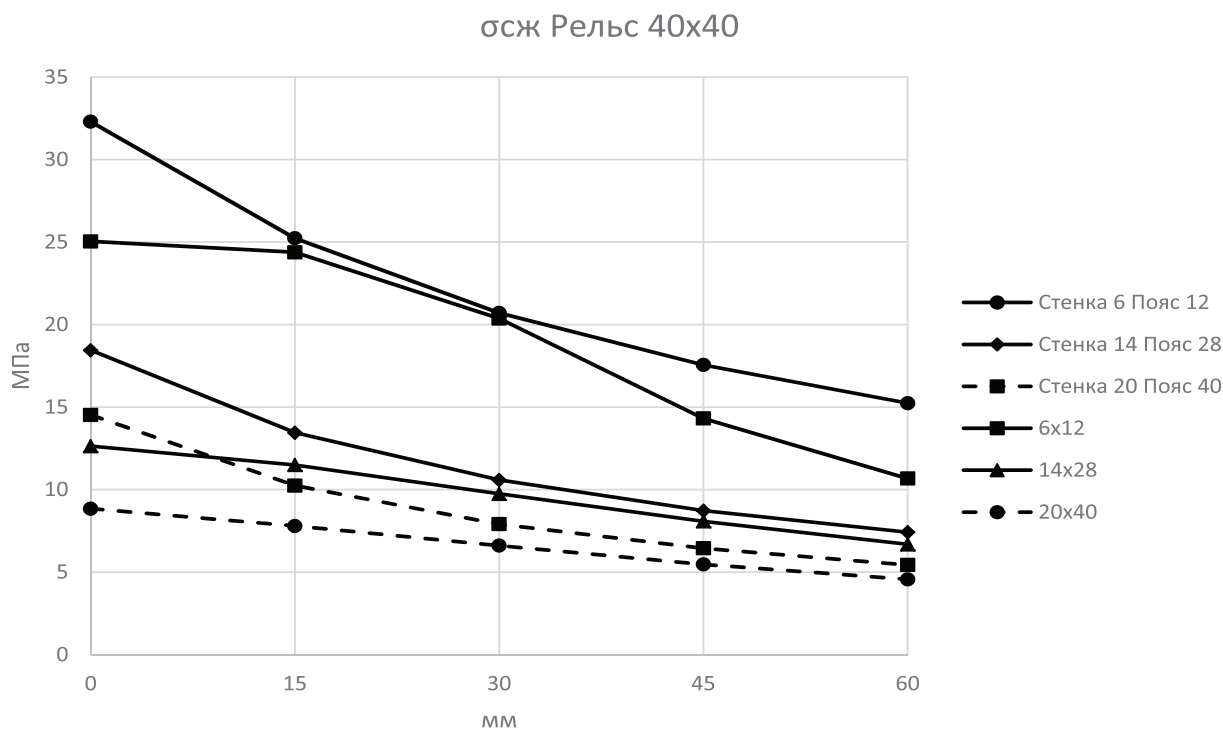


Рис. 5. Зависимость напряжений от эксцентриситета для двух исследований

Можно сделать вывод о том, что предложенные в [19] формулы (1) и (2) для вычисления локальных напряжений нуждаются в корректировке. Авторы предлагают учесть эту корректировку путем введения безразмерных коэффициентов $\psi^{сж}$ и $\psi^{изг}$ для определения локальных напряжений сжатия и изгиба в коробчатой ездовой балке соответственно.

Безразмерный коэффициент для каждого расчета определялся из равенства произведения значений напряжений, полученным по формулам (1) и (2) с данными конечно-элементного анализа.

В результате обработки полного массива результатов удалось выявить закономерность формирования безразмерного коэффициента и определить формулы для его вычисления.

Так, на основании преобразования формулы (1) локальные напряжения сжатия, могут быть вычислены как

$$\sigma^{\text{сж}} = \frac{P \xi}{\delta_c (\lambda + 2e)} \psi^{\text{сж}}(e),$$

где поправочный коэффициент $\psi^{\text{сж}}$ будет функцией эксцентриситета и аппроксимируется выражением:

$$\psi^{\text{сж}}(e) = \begin{cases} k_{\text{сж}} e + b_{\text{сж}}^{\text{ср}}, & 0 < e \leq 30 \\ \chi_{\text{сж}}, & e > 30 \end{cases}.$$

Коэффициент $\psi^{\text{сж}}$ выбирается в зависимости от $j_r b_{\text{сж}}^{\text{ср}}; b_{\text{изг}}^{\text{ср}}$ — смещение относительно оси ОУ, $\chi_{\text{сж}}; \chi_{\text{изг}}$ — величина отсечки, при которой коэффициент меняется в дальнейшем незначительно и выбирается в зависимости от j_r — отношения моментов инерции (момента инерции рельса к поясу); $k_{\text{сж}}; k_{\text{изг}}$ — коэффициенты поправки функции.

Локальные напряжения изгиба вычисляются в соответствии с предложенным подходом и формулой (2):

$$\sigma^{\text{изг}} = \frac{3 P e R_l}{\delta_c^3 \Lambda \left(1 + \frac{S_c \delta_{\text{п}}^3}{S_{\text{п}} \delta_c^3} \right)} \psi^{\text{изг}}(e),$$

где поправочный коэффициент $\psi^{\text{изг}}$ вычисляется аналогично предыдущему случаю:

$$\psi^{\text{изг}}(e) = \begin{cases} k_{\text{изг}} e + b_{\text{изг}}^{\text{ср}}, & 0 < e \leq 30 \\ \chi_{\text{изг}}, & e > 30 \end{cases}.$$

Заключение

В результате работы были определены выражения для вычисления локальных напряжений сжатия и сгиба в ездовых балках коробчатого сечения. В выражения (3) и (4) в качестве расчетного параметра входит величина нагрузки P . Она определяется на основании данных системы непрерывного мониторинга инженерных конструкций либо прямым методом, либо с помощью методики, описанной в статье [3]. Таким образом, в режиме реального времени могут быть получены как значения локальных напряжений в заданном узле, так и их размах. На основании этих данных можно рассчитать долговечность рассматриваемого узла металлоконструкции под воздействием циклических нагрузок и скорректировать дорожную карту технического обслуживания в соответствии с прогнозом долговечности.

Предложенные функциональные зависимости имеют достаточно простой вид и могут быть легко применимы в случаях, когда требуется получить более точный результат, не прибегая к специальным программным пакетам с использованием метода конечных элементов. В то же время существуют ограничения по их применению, вызванные высокой степенью вариативности рассматриваемых элементов конструкций. Чтобы устранить этот недостаток, необходимо спланировать (на основании существующих границ применимости) и провести дополнительные численные эксперименты для определения предельных границ применимости предложенных зависимостей с учетом достаточной достоверности получаемого результата. Если будут получены неудовлетворительные результаты, нужно провести дополнительные исследования, которые бы позволили охватить максимально возможную область имеющихся конструктивных решений по части подобных конструкций, а также предусмотреть дальнейшее развитие современной металлургии и применение новых материалов и технологий.

Однако существующие недостатки не отменяют того, что применение новых, более точных методик повысят надежность оценки состояния и прогнозирования остаточного ресурса сложных объектов промышленного транспорта при совместном использовании систем непрерывного мониторинга.

Библиографический список

1. Осадчий Г. В., Шинкаренко А. В., Плотников Д. Г., Баните А. В. Принципы построения универсальной платформы непрерывного мониторинга технического состояния инфраструктурных объектов // Автоматика на транспорте. – 2020. – Т. 6. – № 4. – С. 484–498.
2. Sokolov S. Analysis of the Fatigue Strength of Welds in Terms of Local Stress. ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38. – No. 3. – Pp. 151–156. – DOI 10.3103/S1068798X18030218.
3. Sokolov S. A., Plotnikov D. G., Grachev A. A., Lebedev V. A. Evaluation of loads applied on engineering structures based on structural health monitoring data // International Review of Mechanical Engineering. – 2020. – No. 14 (2). – Pp. 146–150. DOI: 10.15866/ireme.v14i2.18269.
4. Соколов С. А. Строительная механика и металлические конструкции машин: учебник. – СПб.: Политехника, 2011. – 450 с.
5. Долинский К. Ю., Белый А. А., Осадчий Г. В. Технические решения по мониторингу инженерных конструкций искусственных сооружений // Мир дорог. – 2013. – № 73. – С. 39–41.
6. Belyi A. A., Karapetov E. S., Efimenko Yu. I. Structural Health and Geotechnical Monitoring During Transport Objects Construction and Maintenance (Saint-Petersburg Example) // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 189. – Pp. 145–151. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.024.
7. Ефанов Д. В., Осадчий Г. В., Плотников Д. Г., Шинкаренко А. В. Универсальные системы мониторинга как жизненно важные составляющие высокоимунных транспортных систем // Транспорт Российской Федерации. – 2020. – № 5. – С. 20–26.

8. Ефанов Д. В., Мячин В. Н., Осадчий Г. В., Зуева М. В. Выбор способа фильтрации диагностических данных в системах непрерывного мониторинга объектов транспортной инфраструктуры // Транспорт Российской Федерации. – 2020. – № 2. – С. 35–40.
9. Smarsly K., Hartmann D. Autonomous Monitoring of Masonry Dams Based on Multi-Agent Technology // The 4th Congress on Dams, Struga, Republic of Macedonia, 28–30 September 2017. – Pp. 1–10.
10. Sokolov S., Grachev A. Local criterion for strength of elements of steel-work. Mechanical Engineering Research and Education // International Review of Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 12. – No. 5. – Pp. 448–453.
11. Shlepetinsky A. Yu., Manzhula K. P., Savelyev A. G. Trajectory and growth speed of fatigue cracks due to poor weld fusion in a weld joint // Transport Engineering and Technology. – 2019. – No. S13. – P. 46.
12. Кикин А. И., Сабуров В. Ф. Исследование подкранового пути на низко модульных прокладках // Пром. стр-во. – 1975. – М8.
13. Апалько А. А. Напряженное состояние стенок сварных подкрановых балок под действием местных статических нагрузок: автореф. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. – М., 1960.
14. Иванков О. Ф. Исследование местных напряжений в стенках сварных подкрановых балок различной конструктивной формы при центральном и внецентральном приложении нагрузок: автореф. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1969.
15. Один И. М. К расчету напряжений в стенках подкрановых балок от смещения рельса // Пром. стр-во. – 1962. – № 3.
16. Спенглер И. Е. Экспериментальное исследование работы подкрановых балок // Сб. тр. МИСИ им. В. В. Куйбышева. – М., 1950. – № 7.
17. Шапиро Г. А. Действительная работа стальных конструкций промышленных цехов. – М., 1952.
18. Manzhula K. P., Valiulina A. A. Local Buckling of Curvilinear Plates in Axial Compression // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2021. – Pp. 112–121.
19. Соколов С. А., Юшкевич В. Н., Якубовский Ю. Е. Местные напряжения от давления колеса в крановых коробчатых балках с рельсом над стенкой // Тр. ЛПИ-Л. – 1978. – № 362.
20. Броуде Б. М. Распределение сосредоточенного давления в металлических балках. – М., 1950.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Д. В. Ефановым
Поступила в редакцию 02.03.2021, принята к публикации 19.03.2021*

ГРАЧЕВ Алексей Андреевич — кандидат технических наук, директор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
grachev_aa@spbstu.ru

НИКИТИН Георгий Игоревич — инженер-исследователь СПбПУ, Институт передовых производственных технологий, отдел кросс-отраслевых технологий
dxdedk@gmail.com

ПЛОТНИКОВ Дмитрий Георгиевич — кандидат технических наук, генеральный директор ООО «Робо-ТеК», доцент Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
plotnikov_dg@spbstu.ru

БАНИТЕ Аушра Владовна — ассистент Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
banite_av@spbstu.ru

БОРТЯКОВ Данил Евгеньевич — кандидат технических наук, доцент Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
bortyakov_de@spbstu.ru

ГАБРИЕЛЬ Антон Сергеевич — старший преподаватель Высшей школы автоматизации и робототехники Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
gabriel_as@spbstu.ru

© Грачев А. А., Никитин Г. И., Плотников Д. Г.,
Баните А. В., Бортыakov Д. Е., Габриель А. С., 2021

Grachev A. A., PhD in Engineering
Nikitin G. I.
Plotnikov D. G., PhD in Engineering
Banite A. V., Assistant
Bortiakov D. E., PhD in Engineering
Gabriel A. S.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg

AUTOMATION OF LOCAL VOLTAGE CALCULATION IN BOX-SECTIONAL ELEMENTS OF SPAN STRUCTURES WITH RUNNING BEAMS ACCORDING TO CONTINUOUS MONITORING DATA

The article presents a technique for automating the calculation of local stresses from the application of a concentrated load on additional structural elements of box-section spans with riding beams based on continuous monitoring data to assess the current technical condition and then predict the state of the structure. The necessity of applying an analytical approach to assessing the stress-strain state of a structure at the initial stages of design and technical operation has been substantiated. The drawbacks of the existing analytical approach to stress assessment are shown. Taking into account the available resources, an acceptable research program was developed and implemented, which would lead to satisfactory results. In accordance with the program, a series of numerical experiments

was carried out using software that makes it possible to simulate complex structures and solve them using the finite element method, aimed at obtaining an array of data, the use of which would improve the accuracy of the existing analytical solution. By using software aimed at processing scientific data arrays, mathematical dependences of the required parameters on the initial constructive data were obtained. Formulas and initial data were obtained for calculating correction factors, which improve the accuracy of calculating local compressive and bending stresses. These formulas were combined with the already existing analytical dependencies in order to obtain a simple and easily applicable method for determining the actual local stresses from the application of an indirect concentrated load. As a result of scientific research, a new method for the analytical determination of local bending and compression stresses in riding beams was proposed on the basis of an analysis of the existing methodology and a series of numerical experiments.

Monitoring system, forecasting, technical condition, metal structure, riding beam, local stresses

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-216-230

References

1. Osadchiy G. V., Shinkarenko A. V., Plotnikov D. G., Banite A. V. (2020) Printsipy postroyeniya universal'noy platformy nepreryvnogo monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya infrastrukturykh ob'yektov [Principles of building a universal platform for continuous monitoring of the technical condition of infrastructure facilities]. *Avtomatika na transporte [Transport Automation]*, vol. 6, no. 4, pp. 484–498. (In Russian)
2. Sokolov S. (2018) Analysis of the Fatigue Strength of Welds in Terms of Local Stress. *Russian Engineering Research*, ISSN 1068–798X. vol. 38, no. 3, pp. 151–156. DOI 10.3103/S1068798X18030218.
3. Sokolov S. A., Plotnikov D. G., Grachev A. A., Lebedev V. A. (2020) Evaluation of loads applied on engineering structures based on structural health monitoring data. *International Review of Mechanical Engineering*, no. 14 (2), pp. 146–150. DOI: 10.15866/ireme.v14i2.18269.
4. Sokolov S. A. (2011) *Stroitel'naya mekhanika i metallicheskiye konstruksii mashin: Uchebnik [Building mechanics and metal structures of machines: Textbook]*. Saint Petersburg, Politekhnik Publ., 450 p. (In Russian)
5. Dolinskiy K. Yu., Belyy A. A., Osadchiy G. V. (2013) Tekhnicheskiye resheniya po monitoringu inzhenernykh konstruksiy iskusstvennykh sooruzheniy [Technical solutions for monitoring engineering structures of artificial structures]. *Mir dorog [World of roads]*, no. 73, pp. 39–41. (In Russian)
6. Belyi A. A., Karapetov E. S., Efimenko Yu. I. (2017) Structural Health and Geotechnical Monitoring During Transport Objects Construction and Maintenance (Saint-Petersburg Example). *Procedia Engineering*, vol. 189, pp. 145–151. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.024.
7. Efanov D. V., Osadchiy G. V., Plotnikov D. G., Shinkarenko A. V. (2020) Universal'nyye sistemy monitoringa kak zhizненно vazhnyye sostavlyayushchiye vysokoimunnykh transportnykh sistem [Universal monitoring systems as vital components of high-immune transport systems]. *Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, no. 5, pp. 20–26. (In Russian)
8. Efanov D. V., Myachin V. N., Osadchiy G. V., Zueva M. V. (2020) Vybor sposoba fil'tratsii diagnosticheskikh dannykh v sistemakh nepreryvnogo monitoringa ob'yektov transportnoy infrastruktury [Choosing a method for filtering diagnostic data in continuous monitoring systems of transport infrastructure objects]. *Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, no. 2, pp. 35–40. (In Russian)

9. Smarsly K., Hartmann D. (2017) Autonomous Monitoring of Masonry Dams Based on Multi-Agent Technology. *The 4th Congress on Dams, Struga, Republic of Macedonia*, 28–30 September 2017, pp. 1–10.
10. Sokolov S., Grachev A. (2018) Local criterion for strength of elements of steel-work. *Mechanical Engineering Research and Education. International Review of Mechanical Engineering*, vol. 12, no. 5, pp. 448–453.
11. Shlepetinsky A. Yu., Manzhula K. P., Savelyev A. G. (2019) Trajectory and growth speed of fatigue cracks due to poor weld fusion in a weld joint. *Transport Engineering and Technology*, no. S13, p. 46.
12. Kikin A. I., Saburov V. F. (1975) Issledovaniye podkranovogo puti na nizkomodul'nykh prokladkakh [Investigation of the crane runway on low-modulus gaskets]. *Promyshlennoye stroitel'stvo [Industrial Engineering]*, M 8. (In Russian)
13. Apal'ko A. A. (1960) *Napryazhennoye sostoyaniye stenok svarnykh podkranovykh balok pod deystviyem mestnykh staticheskikh nagruzok*. Avtoref. na soisk. uchen. stepeni kand. tekhn. nauk [The stressed state of the walls of the welded crane girders under the influence of local static loads. Extended abstract of Cand. of tech. sciences dissertation]. Moscow. (In Russian)
14. Ivankov O. F. (1969) *Issledovaniye mestnykh napryazheniy v stenkakh svarnykh podkranovykh balok razlichnoy konstruktivnoy formy pri tsentral'nom i vnetsentral'nom prilozhenii nagruzok*. Avtoref. na soisk. uchen. stepeni kand. tekhn. nauk [Study of local stresses in the walls of welded crane girders of various structural shapes at central and off-center application of loads. Extended abstract of Cand. of tech. sciences dissertation]. Dnepropetrovsk. (In Russian)
15. Odin I. M. (1962) K raschetu napryazheniy v stenkakh podkranovykh balok ot smeshcheniya rel'sa [To the calculation of stresses in the walls of crane girders from the displacement of the rail]. *Promyshlennoye stroitel'stvo [Industrial Engineering]*, no. 3. (In Russian)
16. Spengler I. E. (1950) Eksperimental'noye issledovaniye raboty podkranovykh balok [Experimental study of crane girders]. *Sb. tr./MISI im. V. V. Kuybysheva [Proceedings/Moscow Civil Engineering Institute named after V. V. Kuibyshev]*, no. 7. (In Russian)
17. Shapiro G. A. *Deystvitel'naya rabota stal'nykh konstruktsey promyshlennykh tsekhov* [The actual work of steel structures in industrial workshops]. Moscow, 1952. (In Russian)
18. Local Buckling of Curvilinear Plates in Axial Compression. Manzhula K. P., Valiulina A. A. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2021, pp. 112–121.
19. Sokolov S. A., Yushkevich V. N., Yakubovsky Yu. E. (1978) Mestnyye napryazheniya ot davleniya koleasa v kranovykh korobchatykh balkakh s rel'som nad stenkoy [Local stresses from wheel pressure in crane box girders with a rail above the wall]. *Trudy LPI [Proceedings of the Leningrad Polytechnical institute]*, no. 362. (In Russian)
20. Broude B. M. (1950) *Raspredeleniye sosredotochennogo davleniya v metallicheskiykh balkakh* [Distribution of concentrated pressure in metal beams]. Moscow. (In Russian)

УДК 53.083.5

В. А. Бараусов
Вл. П. Бубнов, докт. техн. наук
Ш. Х. Султонов
Д. В. Бараусов

ООО «КТН»

Кафедра «Информационные и вычислительные системы»,

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ НА БАЗЕ ДАТЧИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЬДА ИЛИ СНЕГА НА КОНТРОЛИРУЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Рассматривается структура автоматической системы очистки стрелочных переводов, анализируются основные достоинства и недостатки датчиков осадков существующих автоматических систем очистки стрелочных переводов. Делается вывод о необходимости разработки перспективной системы на базе датчика определения льда или снега на контролируемой поверхности. Приводится разработанная структурная схема формирования управляющих воздействий системы обнаружения обледенения или снега на контролируемой поверхности. Рассматривается устройство и способ обнаружения обледенения или снега на контролируемой поверхности. Дается алгоритм его технической реализации, а также измерения упреждающего управления процессом электрообогрева контролируемой поверхности стрелочных переводов. Приводятся результаты имитационного моделирования устройства и способа определения льда или снега на контролируемой поверхности в среде Matlab Simulink.

Автоматическая система очистки стрелочных переводов, датчик определения льда или снега, структурная схема управляющего воздействия, способ обнаружения обледенения или снега на контролируемой поверхности, алгоритм управляющей программы, имитационная модель

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-231-251

Введение

Уже несколько десятков лет в России и мире существуют и постоянно совершенствуются автоматические системы очистки стрелочных переводов (АСОСП) зимой [1–4]. Они не требуют использования физического труда и позволяют избежать необоснованных затрат на энергетические ресурсы, а также помогают вывести людей из опасной зоны. Современные системы обогревают не только рамные рельсы, но и шпальные ящики, что исключает появление наледи. Ли-

нейным работникам путевого хозяйства остается осуществлять лишь плановый уход за стрелочными переводами и не тратить лишние силы и время на дополнительное обслуживание стрелок. Годовая экономия за счет снижения трудоемкости очистки стрелочных переводов в холодное время составляет 116,4 тыс. рублей на один стрелочный перевод [5, 6].

Сейчас используются две основные системы автоматической очистки от снега и льда: электрообогрев и пневмообдувка. Электрообогрев в ходу в основном в умеренном климате, например, в центральной и южной частях России, а пневмообдувка — в более холодных, северных областях — на Урале, в Сибири и других регионах с суровыми зимами. Существуют также и комбинированные системы, совмещающие электрообогрев и пневмообдувку [7]. Повышение скорости движения поездов в условиях решения задачи сокращения эксплуатационных расходов выдвигает новые требования к оборудованию железных дорог, в т. ч. и к электрообогреву.

Высокие требования, в свою очередь, вызывают необходимость поиска новых технических решений — таких, например, как выбор энергоэффективных, надежных, экологических систем, отличающихся повышенной точностью измерения физических величин и, как следствие, получения более точной информации для принятия решений в системе управления. Используемые в системе электрообогрева компоненты должны обеспечивать в первую очередь высокую вероятность определения льда или снега на контролируемой поверхности — это главное при обеспечении безопасности движения.

Одновременно с этим необходимо обеспечить оптимальный расход электроэнергии, высокий срок службы и отказоустойчивость, возможность упрощенного монтажа и быструю замену узлов и деталей в процессе эксплуатации, оперативную оценку их состояния.

Цель статьи — представить разработку структурной схемы формирования управляющих воздействий системы обнаружения обледенения или снега на контролируемой поверхности, обсудить алгоритм измерения упреждающего управления процессом электрообогрева контролируемой поверхности стрелочных переводов. Это первая статья в серии дальнейших материалов, посвященных разработке АСОСП на базе инновационного датчика определения льда или снега на контролируемой поверхности.

1. Структура АСОСП

Принципиально АСОСП можно разделить на четыре части, которые могут существовать отдельно друг от друга и решать отдельные задачи.

Первое — собственно оборудование электрообогрева, отвечающее непосредственно за прием и передачу электроэнергии на нагревательные элементы (говоря языком производителя — марка (силового) шкафа, например ШОИТ, ШОИТ-М; ШУЭС, ШУЭС-М. Как правило, оборудование состоит из транс-

форматоров, силовых кабелей и различных электрических цепей, блока управления, автоматических выключателей, защитных устройств.

Второе — программное обеспечение, которое отвечает за обмен информацией между оборудованием (шкафом) и управляющей службой, отвечающей за очистку стрелок (диспетчер по станции и др.). Объем и качество информации зависит от задач, которые ставит перед производителем заказчик. Это может быть информация о количестве потребляемой энергии, параметрах работы оборудования, ошибках и сбоях в работе оборудования. Кроме того, программа может помогать выставить необходимый режим оборудования, запускать его диагностику, а при необходимости (в случае сбоя) перезапускать оборудование в новый режим работы. Одна из основных задач программного обеспечения — интерпретация и распознавание сигналов, поступающих от датчиков различного типа и выработка на их основе управляющих сигналов.

Третье — погодная станция, которую можно назвать основным элементом АСОСП. Ее по праву называют «мозгом системы»: без нее работа АСОСП в автоматическом режиме невозможна. А это, в свою очередь, отражается на достоверности определения снега или льда на контролируемой поверхности, экономии электроэнергии, охране труда, сроке службы оборудования в целом и зачастую становится причиной поломки или отказа оборудования.

Четвертое — арматура АСОСП, то, что непосредственно помогает нагреву рельса. Сюда входят клеммы ящики, нагревательные элементы (ТЭН), защитные экраны, скобы для крепления ТЭНов.

2. Типы датчиков осадков и принципы их работы

Основным элементом любой погодной станции АСОСП является датчик осадков (ДО). В настоящее время на сети дорог АО «РЖД» используются два типа ДО — электротермический и оптический [8].

Электротермический ДО функционирует на принципе электротермического сопротивления. Работает это следующим образом: снег попадает на датчик, под воздействием нагревательного элемента превращается в воду (влагу) и через специальную гигроскопическую мембрану оказывается в междуэлектродных промежутках. Замыкая их, вызывает падение сопротивления электродов, таким образом формируя сигнал. Метод был разработан и запатентован в 1990 году [9].

Этот ДО широко применяется двумя основными производителями АСОСП — ООО «Ладога-Энерго» (производство системы ШУЭС-М) и ООО «КТН» Таганрог (производство СЭИТ-04М). В силу своих физических свойств такой ДО называется датчиком прямого действия.

Основные недостатки:

— короткий срок службы. Из-за постоянной работы во влажной среде срок службы в среднем составляет два месяца;

— большое количество ложных срабатываний. Даже при содействии вспомогательных датчиков (температуры воздуха, рельса, земли) ДО зачастую выдает неверную информацию для принятия решений по функционированию АСОСП;

— неспособность определить наличие льда или заноса стрелки (метель, проходящий поезд) на контролируемой (обогреваемой) поверхности.

По сути, мы имеем дело с датчиком определения влажности, который зависит от дополнительных внешних параметров (данных), позволяющих ему сделать вывод о наличии снега.

Производители пытаются снабдить датчик дополнительными вычислительными данными, но анализ ежегодных текущих ремонтов АСОСП показывает, что пока ситуация работает не в пользу этого ДО.

Оптический ДО обладает рядом преимуществ перед вышеописанным прибором, хотя и является датчиком косвенного действия.

Принцип его работы основан на изменении интенсивности прямого и отраженного луча при наличии осадков в воздухе. В составе оптического ДО — многоканальный инфракрасный датчик, использующий прямые и диффузные отражения от осадков, а также дополнительные датчики. Информация от них преобразуется в сигнал о наличии осадков.

Такой принцип работы позволяет определить и наличие льда на контролируемой (обогреваемой) поверхности, но при условии, что сам ДО располагается в непосредственной близости от стрелки. Рассмотренный принцип, а также сам ДО используется в производстве АСОСП компанией ООО «КТН» Санкт-Петербург» и отражен в патенте (№ 2582627), авторами которого являются В. Ф. Кочубей и В. А. Бараусов [10].

У этого ДО долгий срок службы, хотя прибор и снабжается дополнительными датчиками для большей точности показаний.

Основной недостаток — погрешность показаний. Принцип действия основан на отражении луча с помощью фотоэлемента и дополнительных датчиков. Не исключены ложные срабатывания — их могут вызвать блики от проходящего поезда при повышенной влажности, обледенение рельса даже при плюсовой температуре окружающего воздуха).

Проведенный анализ позволяет сделать некоторые выводы.

Разнообразие наименований («Погодная станция», «Метеостанция», датчик осадков) вводят в заблуждение заказчика относительно функциональных возможностей приобретаемого оборудования. Основная и главная задача ДО — определение наличие снега или льда на контролируемой (обогреваемой) поверхности независимо от погодных условий метели; оттепели; дождя, переходящего в снег (или наоборот); заброса стрелки снегом от проходящего поезда. Поэтому он должен использоваться именно как датчик осадков. И для начала необходимо все схожее по своим свойствам оборудование, применяемое на ОАО «РЖД», привести к единой терминологии.

Разные принципы ДО положительно сказываются на развитии конкуренции. Однако это не должно идти в ущерб качеству поставляемой продукции, потому что даже при гарантийном обслуживании производитель зачастую не способен оперативно решить проблему при выходе датчика из строя. В лучшем случае оборудование переходит в режим ручного управления или постоянной работы, а это значит, что заявленные характеристики и качество уже не соответствуют заявленным требованиям. Следовательно, у заказчика возникают экономические потери прямого и косвенного характера. Вне зависимости от типа и принципа применения ДО необходимо выработать единые требования и стандарты к данному оборудованию, как части АСОСП.

Имеющиеся в распоряжении РЖД способы и датчики определения льда или снега на контролируемой поверхности требуют дальнейшего развития в отношении точности и надежности функционирования.

3. Структурная схема формирования управляющих воздействий системы обнаружения обледенения или снега на контролируемой поверхности

На рис. 1 представлена структурная схема системы стрелочного обогрева на базе датчика обнаружения обледенения или снега на контролируемой поверхности [10, 11]. Устройство содержит датчик, шкаф управления ТЭН и удаленный блок, предназначенный для отображения информации оператору

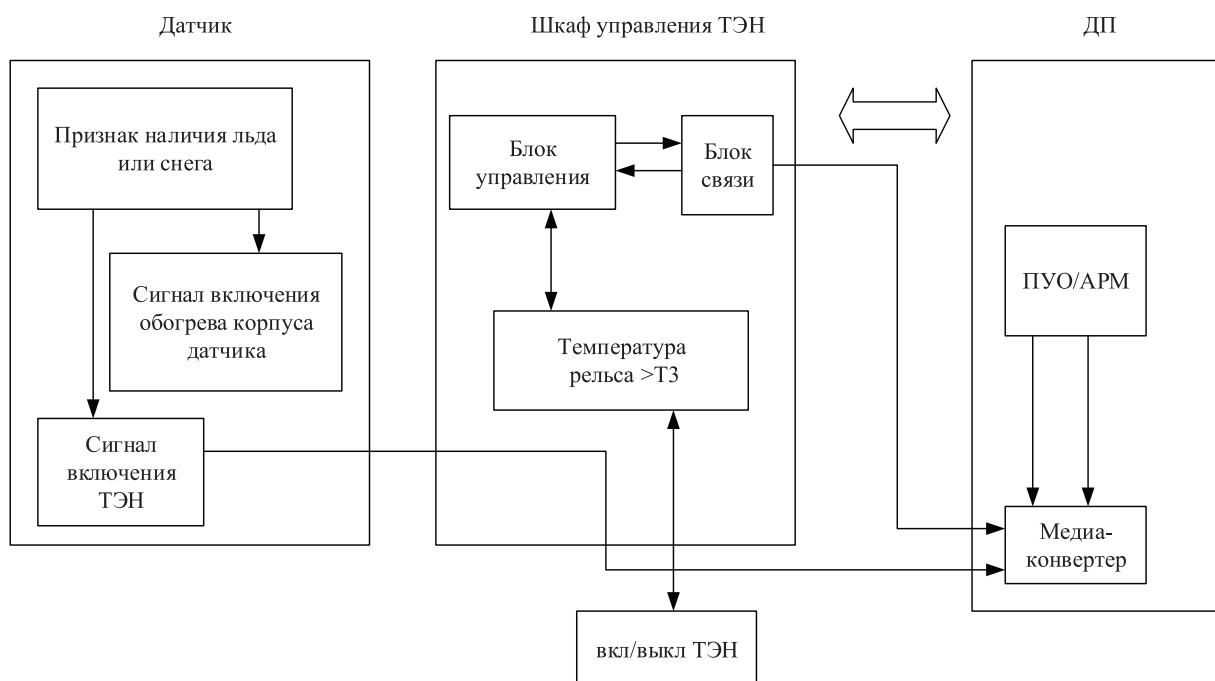


Рис. 1. Структурная схема формирования управляющих воздействий системы обнаружения обледенения или снега на контролируемой поверхности

и возможности «ручного» управления подачей напряжения на обогревающие элементы.

Для обеспечения технического решения указанных требований использовалась структурная схема, приведенная на рис. 2, которая была получена в результате анализа системы электрообогрева стрелочных переводов как объекта управления [11, 12].

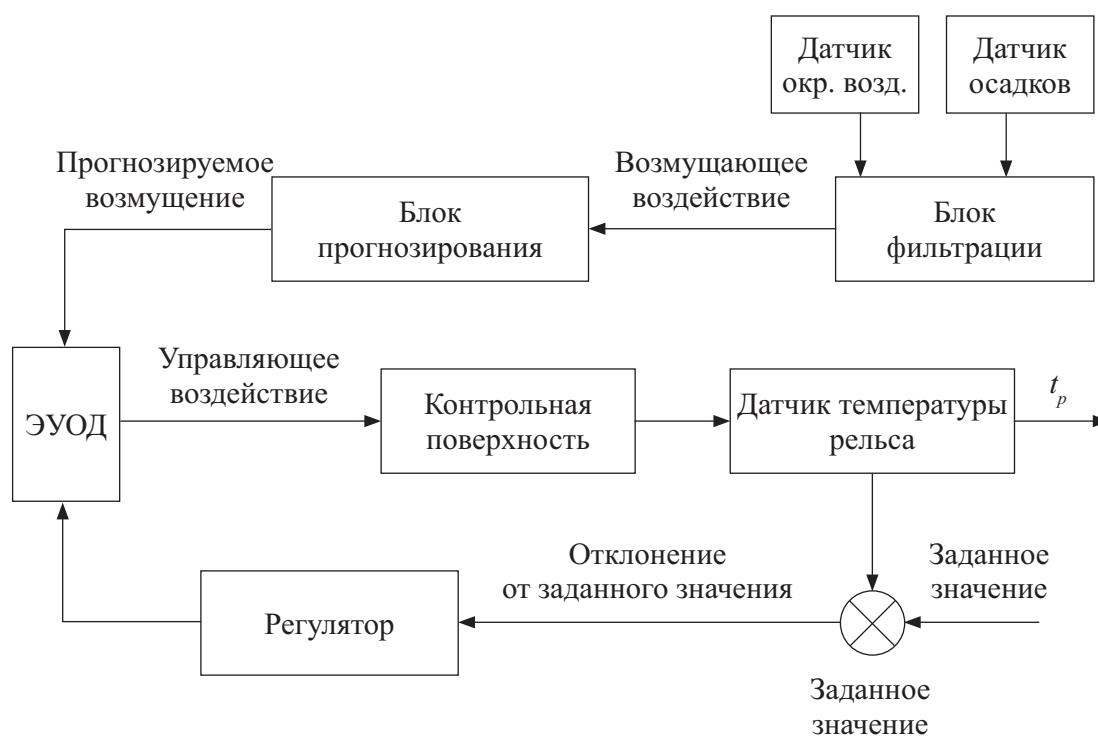


Рис. 2. Структурная схема формирования управляющих воздействий системы обнаружения обледенения или снега на контролируемой поверхности

Значения наружной температуры и осадков с датчиков проходят через блок фильтрации прогнозирования атмосферных условий. Наименьшая температура поступает в блок прогнозирования, где вычисляется прогнозируемое значение температуры на интервале времени прогнозирования (выработка признака наличия осадков). Работа этого разомкнутого контура определяет образование обледенения по прогнозируемому значению наименьшей температуры наружного воздуха.

Замкнутый контур работает следующим образом. Сигнал с датчика температуры контрольной поверхности обогреваемого рельса поступает на сумматор, где температура обогреваемого рельса сравнивается с заданным значением. Рассогласование подается на вход регуляторов и далее на элемент сравнения (ЭУОД), корректируя значение управляющего воздействия на выходе блока прогнозирования для обогреваемого рельса. Таким образом поддерживается необходимая температура нагрева рамных рельсов в зависимости от температуры и влажности окружающей среды.

4. Устройство датчика и способ обнаружения обледенения или снега на контролируемой поверхности

Для рационального функционирования системы упреждающего управления электрообогревом предлагается устройство датчика и способ обнаружения обледенения или снега на контролируемой поверхности [10–16].

На контролируемой поверхности устанавливают датчики с двумя чувствительными элементами, снабженными теплопроводными пластинами с внешними рабочими поверхностями для атмосферного воздействия, и встроенными датчиками температуры пластин и нагревателями на тыльной их поверхности.

Конструкция датчика как основного составного узла для обнаружения осадков в виде льда или снега упрощенно приведена на рис. 3. Датчик (1) с конструктивно одинаковыми изолированными друг от друга зазором или теплоизоляцией чувствительными элементами, в составе каждого присутствуют: теплопроводная пластина (11 и 12) с внешней рабочей поверхностью (13 и 14) для атмосферного воздействия, встроенный датчик температуры T1 и T2 (6 и 7), нагреватель (4 и 5) на тыльной поверхности пластины (15 и 16). Чувствительные элементы горизонтально ориентированы в пространстве и удалены друг от друга на минимальное расстояние (L).

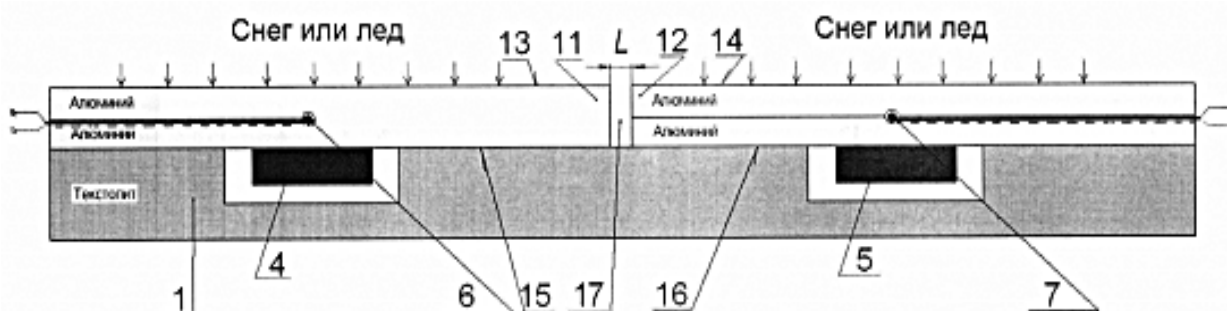


Рис. 3. Упрощенная конструкция датчика

Датчик подключают к аппаратной части с устройствами управления, измерения, обработки информации, индикации и/или регистрации сигналов и передачи данных, входящей наряду с датчиком в состав устройства обнаружения обледенения или снега локально в зоне расположения датчика.

Укрупненная блок-схема устройства для осуществления способа обнаружения обледенения или снега показана на рис. 4. Вид в плане, где позициями обозначены: 1 — датчик; 2 — первый чувствительный элемент датчика; 3 — второй чувствительный элемент датчика; 4 и 5 — электрические нагреватели первого и второго чувствительных элементов соответственно; 6 и 7 — датчики температуры (термодатчики, преимущественно термопары) первого и второго чувствительных элементов соответственно; 10 — аппаратная часть устройства.

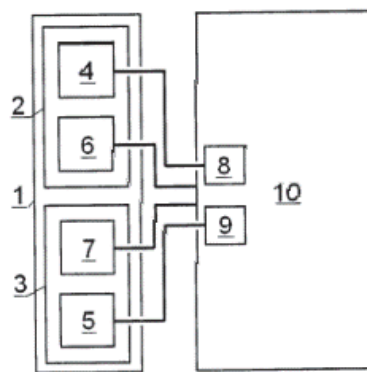


Рис. 4. Увеличенная блок-схема устройства

Устройство определяет начальную температуру T_{10} рабочих поверхностей пластин чувствительных элементов; если $T_{10} \leq 0^\circ\text{C}$, включают нагреватель первого чувствительного элемента. После этого через заданный интервал задержки Δt включают нагреватель второго чувствительного элемента, что определяет асинхронность включения нагревателей.

Отслеживание изменения во времени температуры рабочей поверхности обоих чувствительных элементов определяется по формуле (1) посредством датчика и управления контролем состояния:

$$T_1 = f_1(t), T_2 = f_2(t), \quad (1)$$

где T_1, T_2 — температуры рабочей поверхности пластин элементов; f_1, f_2 — функции, соответствующие эмпирической зависимости (1, 2); t — текущее время с момента включения указанного нагревателя до значения, превышающего температуру фазового превращения воды — 0°C .

Аппаратная часть системы определяет, регистрирует, индицирует и/или передает значения разности, обеспечивая совместно с упомянутой асинхронностью включение нагревателей, аннулирование вкладов полезных сигналов, обусловленных плавлением льда или снега, и обнуление величины двух вкладов вредных сигналов, обусловленных воздействием воздушных потоков согласно формуле (2):

$$\Delta T(t) = T_1(t) - T_2(t). \quad (2)$$

Вывод о наличии либо отсутствии льда или снега, по крайней мере, в зоне расположения датчика, делают по характеру и количественной характеристике — о наличии свидетельствует только практическое обнуление величины (2) $\Delta T(t) = 0$.

В завершение делают заключение о наличии или отсутствии льда или снега на рабочей пластине датчика по установленному критерию, основанному на ис-

пользовании явления временной хотя бы частичной стабилизации температуры рабочих поверхностей T_1 , T_2 на уровне упомянутого фазового перехода.

Для реализации предлагаемого способа обнаружения обледенения или снега необходимо определить структурное построение алгоритмов и разработать имитационную модель информационно-управляющей программы контроля состояния устройства обнаружения обледенения или снега стрелочных переводов, способной выполнять полученные команды управления.

Функции программы контроля:

- определение температуры поверхности;
- определение температуры окружающего воздуха;
- прием и обработка информации о технологических параметрах;
- считывание исходных данных из SD-карты памяти;
- сохранение принятой информации в архиве SD-карты памяти за установленный период времени;
- выполнение оценки безопасности текущего состояния и (при необходимости) выдача управляющих воздействий на исполнительные механизмы для предотвращения выхода параметров, характеризующих работу системы электрообогрева, за границу предупредительных значений;
- оповещение эксплуатационного персонала об обнаружении аварийных событий, выдача рекомендаций и подсказок оператору автоматизированного рабочего места;
- графическое представление хода технологического процесса, принятой и архивной информации в удобной для восприятия форме;
- программа должна быть гибкой и позволять корректировку алгоритмов работы при уточнении информативных функций опасности по результатам эксплуатации.

Основой для разработки алгоритма стала разработанная схема формирования управляющих воздействий системы обнаружения обледенения или снега на контролируемой поверхности (рис. 5) [13–16].

Работа устройства начинается с инициализации микроконтроллера, портов ввода/вывода, настройки обработчика прерываний. Далее проверяется наличие карты памяти, чтобы обеспечить считывание данных для вычисления температуры контролируемой поверхности в системе электрообогрева. Затем происходит ожидание начала измерения — сигнала о том, что можно начать измерение. Он посылается другим устройством (например кнопкой). Проверка наличия карты памяти — попытка получения доступа к файлам на SD-карте через API для MicroSD.

По ответу проверяется наличие файла, в который будут записаны результаты измерений. Если файл отсутствует, его нужно создать. После на датчики подается питание и снимаются показания в течение выбранного пользователем времени. Алгоритм измерения упреждающего управления приведен на рис. 6 [14–16].

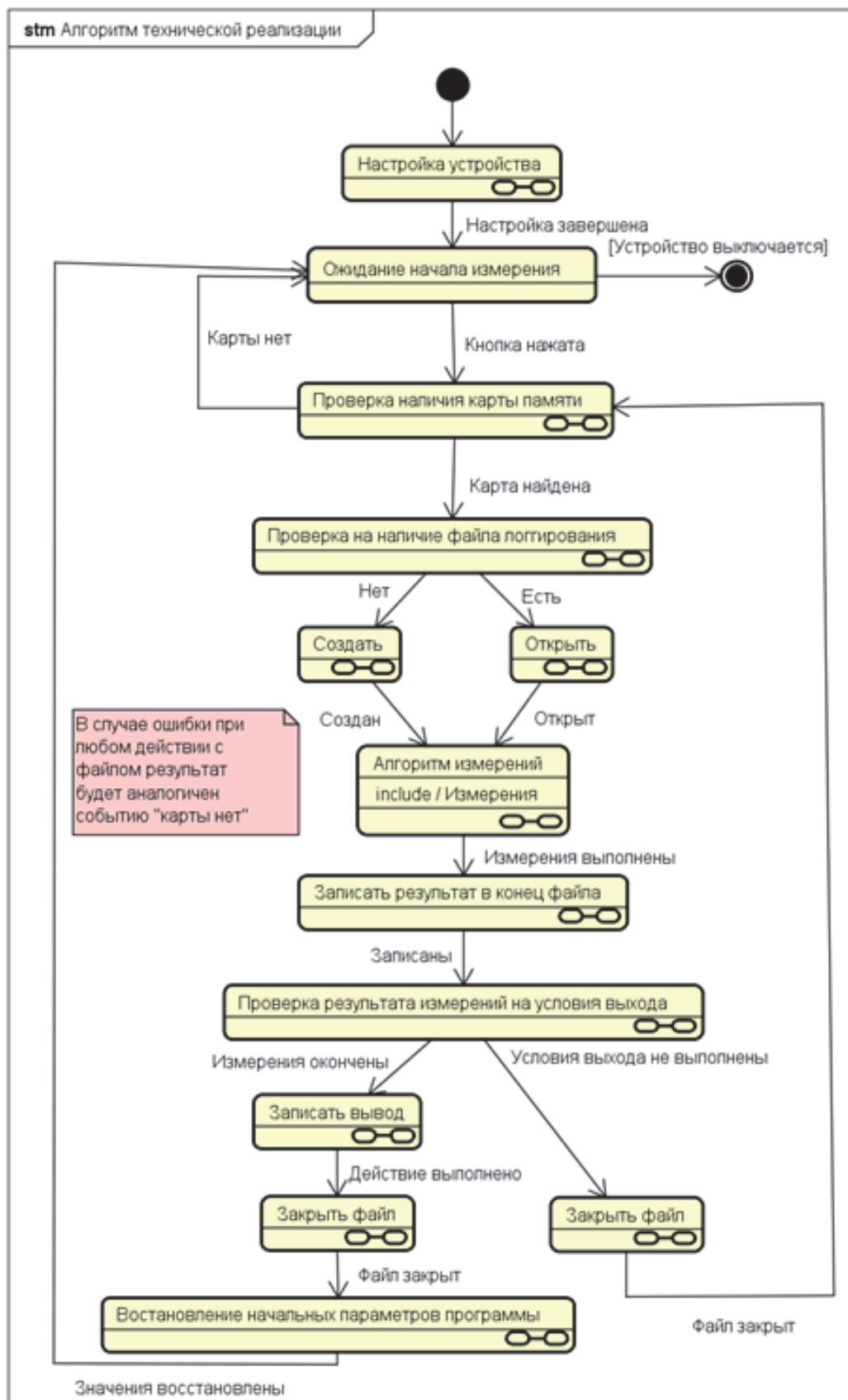


Рис. 5. Алгоритм технической реализации способа обнаружения обледенения или снега на контролируемой поверхности

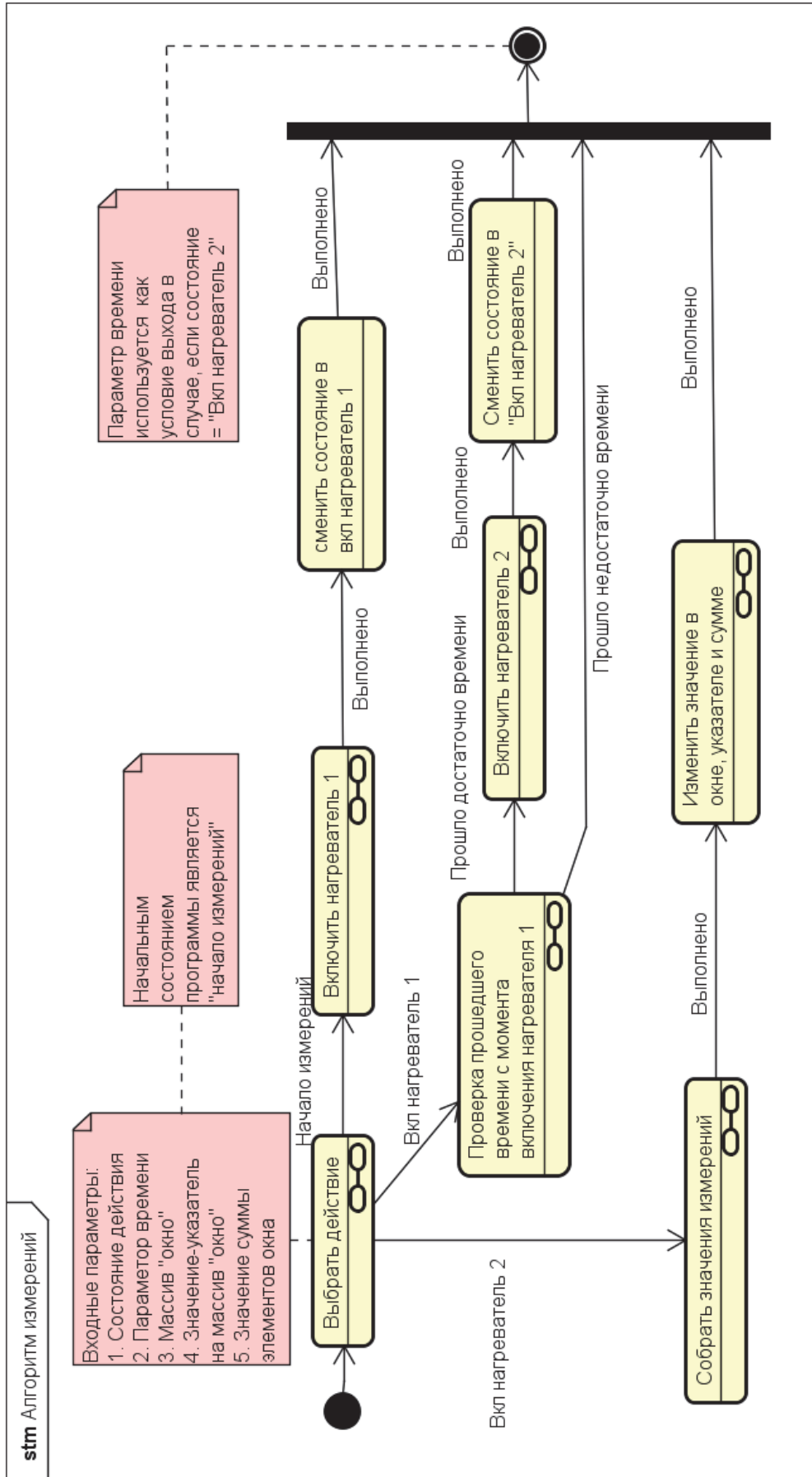


Рис. 6. Алгоритм измерения упреждающего управления процессом электрообогрева контролируемой поверхностью стрелочных переводов

Значение наружной температуры и осадков с датчиков проходит через блок фильтрации прогнозирования атмосферных условий, который выделяет окружающей среды в непосредственной близости от контролируемой поверхности с наименьшей величиной атмосферных условий, наименьшая температура поступает в блок прогнозирования, где вычисляется прогнозное значение температуры на интервале времени прогнозирования (выработка признака наличия осадков).

Устройство измерения работает следующим образом. Сигналы с датчика температуры контрольной поверхности обогреваемого рельса поступают на сумматоры, где сравниваются с заданным значением температуры обогреваемого рельса. Рассогласование подается на вход регуляторов и далее на элемент сравнения (электронное устройство обработки данных (ЭУОД)), корректируя значение управляющего воздействия на выходе блока прогнозирования для обогреваемого рельса. Таким образом поддерживается необходимая температура нагрева рамных рельсов в зависимости от температуры и влажности окружающей среды.

Структурное построение информационно-управляющей системы выполнено с возможностью включения нагревателя второго чувствительного элемента с задержкой времени Δt после включения нагревателя первого чувствительного элемента [13, 15–17].

Данный алгоритм представляет собой команды и алгоритмы управления по парированию возникающих нештатных аварийных ситуаций, приведенные к виду, удобному для разработки программного обеспечения системы обнаружения осадков.

5. Результаты имитационного моделирования

Некоторые результаты исследования определения осадков в виде льда на контролируемой поверхности представлены в [18], где использовался пакет Matlab Simulink.

Чтобы оценить эффективность функционирования алгоритма измерения «заснеженности» на рабочей поверхности, разработана и исследована компьютерная имитационная модель в программе Matlab. Она позволяет произвести анализ протекающих тепловых процессов в системе «объект нагрева».

Для имитационного моделирования широко применяется инструмент визуального моделирования Simulink — модуль расширения математического пакета Matlab. Simulink позволяет имитировать динамические системы и исследовать их работоспособность с помощью графических блоков [19–21].

Анализ системы управления электрообогрева с помощью имитационных моделей позволяет исследовать сложные системы. Исследование не сводится только к построению модели процессов ее функционирования. Важно предложить способы повышения эффективности ее работы.

Расчет и определение основных динамических характеристик процесса электрообогрева производится на базе имитационного моделирования в математическом пакете MATLAB с использованием модуля расширения Simulink [21]. В основу имитационной модели легла структурная схема, приведенная на рис. 2. Обобщенная структура модели системы управления электрообогревом показана на рис. 7.

Структура имитационной модели системы электрообогрева рельса как объекта управления показана на рис. 8 в виде блока control object в соответствии с уравнением (1, 2).

Полученный на реальных экспериментальных данных результат работы модели способа обнаружения осадков для ситуации с наличием осадков показан на рис. 9.

Здесь измеряемые термодатчиками температуры T_1 и T_2 обозначены позициями $u1$ и $u2$ соответственно, их разность $u1'-u2'$ — позицией $Av1$.

Результат работы модели для ситуации с отсутствием осадков показан на рис. 10.

На рис. 9 и 10 по оси абсцисс отложено условное время в дискретных отсчетах, а по оси ординат — температуры в условных единицах, которые могут быть приведены к градусам Цельсия, поскольку получены в результате реального опыта. Для наглядности кривые $u1$ и $u2$ разогрева сдвинуты вниз на значение температуры.

Заключение

Публикации, посвященные исследованию датчиков (сигнализаторов) льда или снега на контролируемой поверхности [19, 22], касаются датчиков, применяемых в авиационной промышленности, судостроении и линиях передачи электроэнергии. Материалов об использовании инновационных датчиков в системах автоматического обогрева стрелочных переводов практически нет. Необходимо создать новые АСОСП на базе более надежных и точных датчиков. Это повысит безопасность движения и уменьшит расход потребной на обогрев электроэнергии. Были проведены исследования и сделаны следующие выводы:

— все схожее по своим свойствам оборудование («погодная станция», «метеостанция» и т. д.), применяемое ОАО «РЖД», следует привести к единой терминологии;

— нужно разработать единые стандарты как к блокам АСОСП, так и ко всей системе в целом;

— требуется осуществить программную реализацию интерфейса датчиков определения льда или снега на контролирующей поверхности и управляющей программы работы всей АСОСП в целом. Настоящее исследование применимо не только в железнодорожной отрасли, но и в электрических сетях, обогреве крыш домов, в авиационной и автомобильной промышленности.

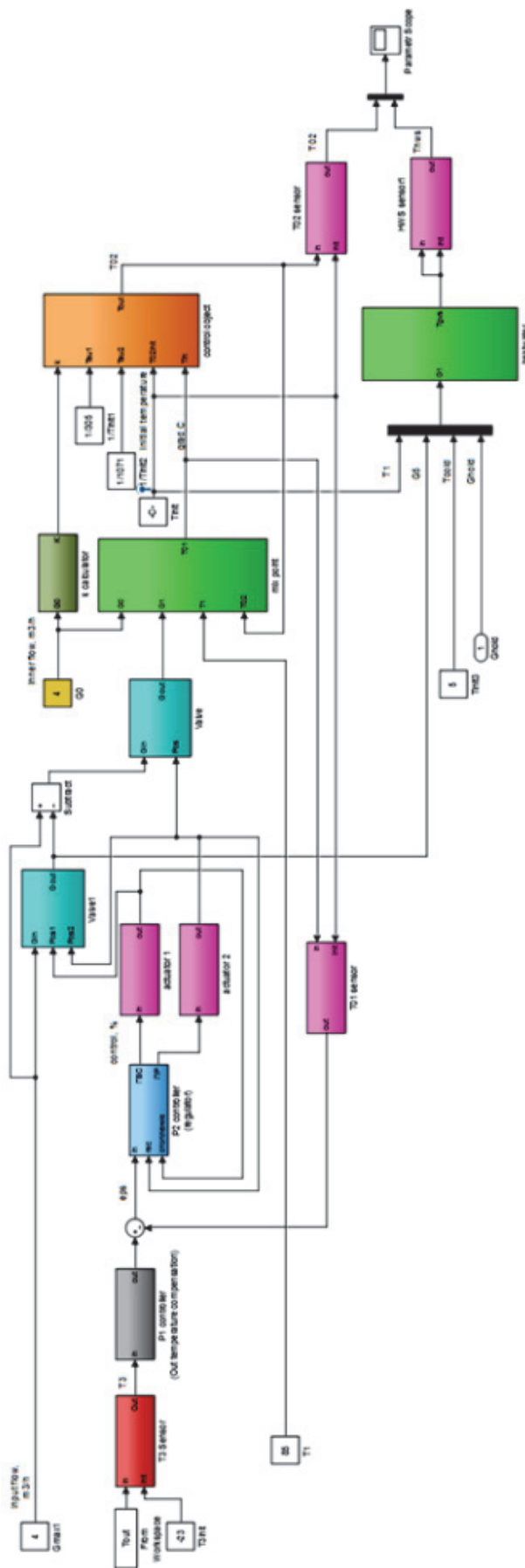


Рис. 7. Структура имитационной модели устройства обнаружения осадков на контролируемой поверхности

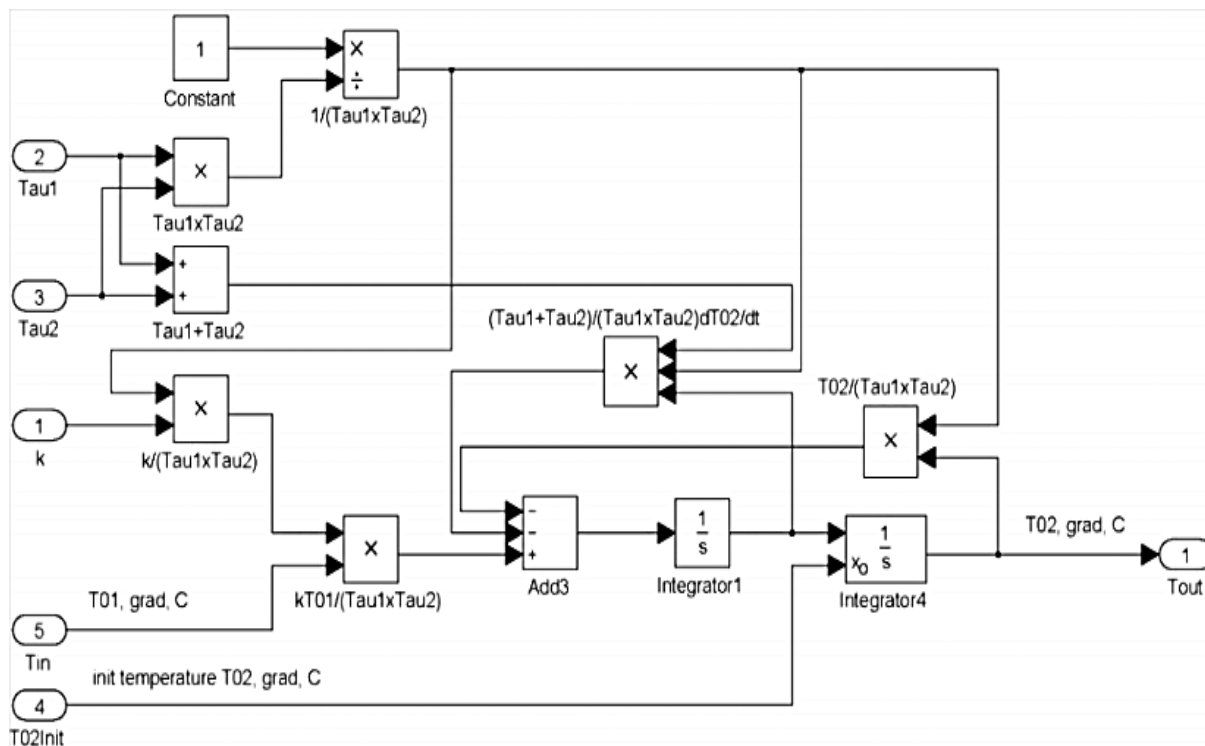


Рис. 8. Структура имитационной модели объекта управления

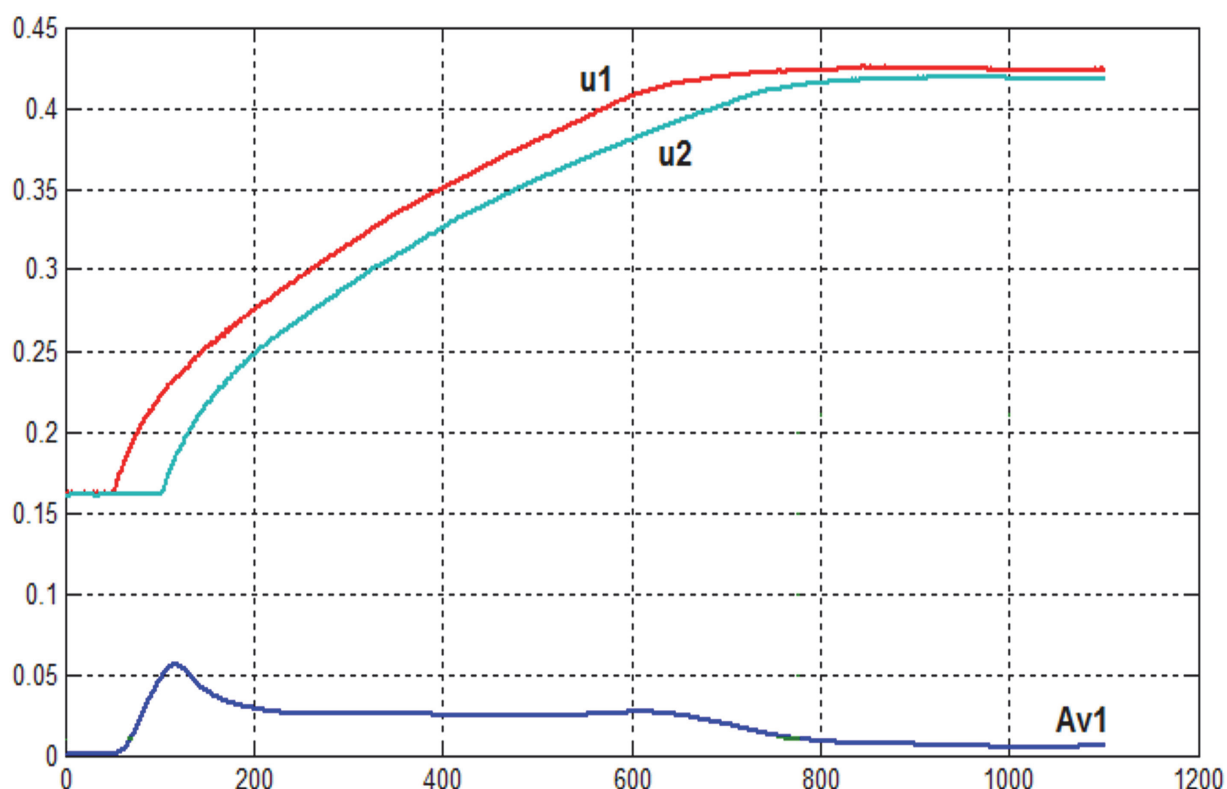


Рис. 9. Графики значений температуры чувствительных элементов датчика и их разности с течением времени работы нагревателей при асинхронном включении их нагревателей (экспериментальный, при обледенелых рабочих поверхностях)

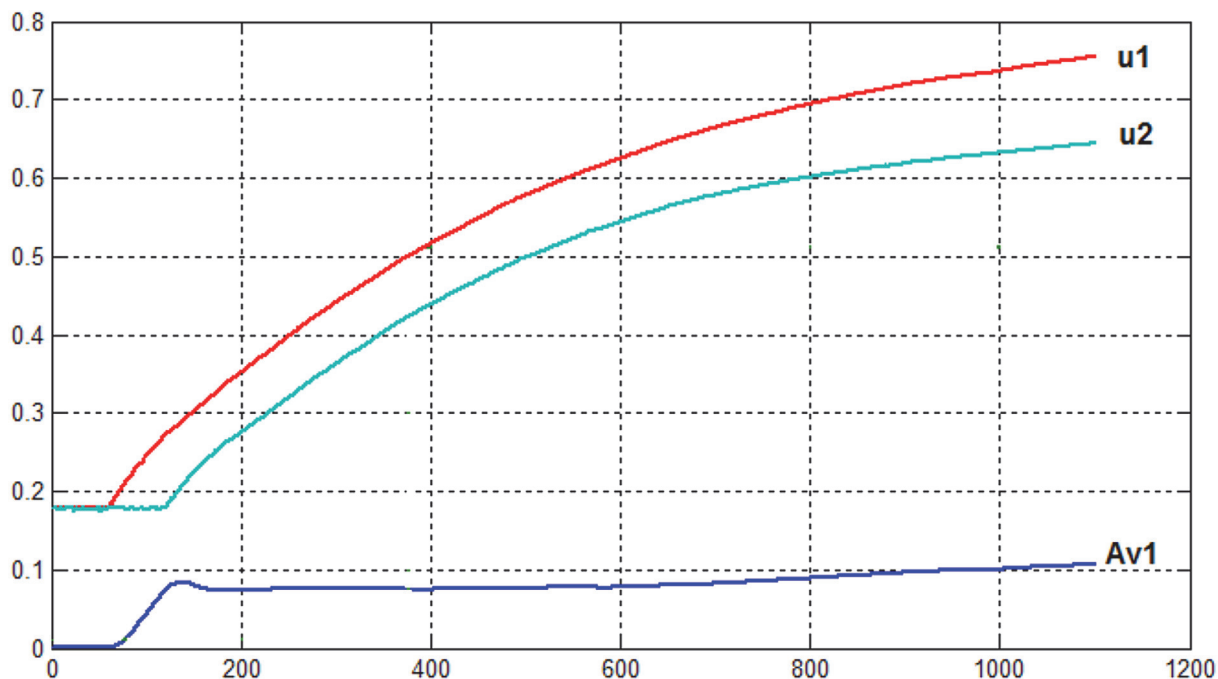


Рис. 10. Графики значений температуры чувствительных элементов датчика и их разности с течением времени работы нагревателей при асинхронном включении их нагревателей (экспериментальный, при «чистых» пластинах)

Библиографический список

1. Никитин А. В. Снегоборьба на железных дорогах России // Академическая публикастика. – 2018. – № 5. – С. 45–47.
2. Герцик Д. В., Семенов А. Г. Инновации на железных дорогах в суровом климате: модернизация системы электрообогрева стрелочных переводов // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы международной научно-технической конференции. – Тюмень, 2016. – С. 79–84.
3. Осмоловский Д. В. Новая система электрообогрева стрелочных переводов // Автоматика, связь, информация. – 2011. – № 10. – С. 27–29.
4. Яковлев И. П. Разработка автоматизированной системы управления и контроля электрообогревом стрелочных переводов // Современные проблемы радиоэлектроники: электронное научное издание. – Красноярск, 2018.
5. Колисниченко Е. А. Оценка экономической эффективности при внедрении устройства по очистке стрелочного перевода от снега и льда // Наука и образование транспорту. – 2015. – № 1. – С. 212–215.
6. Султонов Ш. Х. Выводы о целесообразности применения с точки зрения технико-экономической эффективности системы электрообогрева / Ш. Х. Султонов // Материалы X Международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте» (Гомель, 26–27 ноября 2020 г.): в 5 ч. – Ч. 4. – Гомель: БелГУТ, 2020. – С. 57–59.
7. Кочубей В. Ф., Евдокимов И. А. Защита стрелочных переводов от снега и льда: практические решения // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 11. – С. 29–33.
8. Вавилов В. Д., Суконкин А. Н. Обзор отечественных и зарубежных сигнализаторов обледенения // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2013. – № 1. – С. 297–310.

9. Датчик наличия осадков TSP02: [Электронный ресурс]: Предложение продукции. URL: http://antiled66.ru/images/instrukcii/pasport_TSP02.pdf (дата обращения: 22.12.2020).
10. Пат. 2582627 Российская Федерация, МПК С1 01 В 7/24. Устройство электрообогрева стрелочных переводов типа СЭИТ-04 / В. А. Бараусов, В. Ф. Кочубей. Заявитель и патентообладатель В. А. Бараусов, В. Ф. Кочубей. – № 2015106701, заявл. 26.02.15, опубл. 27.04.16, бюл. № 12.
11. Султонов Ш. Х. Структурная схема формирования управляющих воздействий системы обнаружения обледенения / Ш. Х. Султонов, В. П. Бубнов, Д. В. Бараусов // Сборник тезисов национальной научно-технической конференции «Перспективы будущего в образовательном процессе» в рамках ежегодного фестиваля «Неделя науки – 2020» (Санкт-Петербург, 21 апреля). – СПб.: ПГУПС, 2020. – С. 183–186.
12. Пат. 2685631 Российская Федерация, МПК С1 01 F 7/56. Способ и устройство обнаружения обледенения или снега на контролируемой поверхности / С. Г. Селянин. Заявитель и патентообладатель В. А. Бараусов, П. В. Григорьев. – № 2018125617, заявл. 11.07.18, опубл. 22.04.19, бюл. № 12.
13. Barausov V.A., Bubnov V.P., Sultonov Sh. Kh. Control Software for Surface Ice and Snow Detecting Device / Models and Methods of Information Systems Research Workshop. SPb.: CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org), 20197. – Vol. 2556. – С. 75–79. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2556/paper13.pdf>.
14. Султонов Ш. Х. Алгоритм работы системы управления электрообогревом стрелочных переводов на основе энергосберегающих технологий / Ш. Х. Султонов, В. П. Бубнов // Сборник трудов LXXX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Транспорт: проблемы, идеи, перспективы». – СПб.: ПГУПС, 2020. – С. 74–77.
15. Султонов Ш. Х. Структура управляющей программы и способ для обнаружения обледенения на поверхности стрелочных переводов / Ш. Х. Султонов, Н. А. Крицкий, З. Р. Султонова // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2020. – № 2 (22). – С. 59–64.
16. Программа для устройства обнаружения обледенения или снега на контролируемой поверхности: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020619431 от 17.08.2020 Российская Федерация / В. А. Бараусов, П. В. Григорьев, Ш. Х. Султонов, заявл. № 2020612292 от 21.02.2020. опубл. 17.08.2020, бюл. № 8. – 1 с.
17. Султонов Ш. Х. Программа для автоматизации вычислений величин нагрузок, действующих на кузов вагона при прочностных расчетах / Ш. Х. Султонов, В. П. Бубнов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2019. – № 9. – С. 37–43.
18. Ing Bey, Dzhifeng Ksu. Vzaimodeistvie Matlab s ANSI C, Visual C ++, Visual Basic i Java, [Interaction of MATLAB with ANSI C, Visual C ++, Visual Basic and Java]. – М.: Williams, 2005. – 207 p.
19. Смоленцев Н. К. Создание Windows-приложений с использованием математических процедур MATLAB. – М.: ДМК-Пресс, 2008. – 456 с.
20. Schröder F.G. Science Case Of A Scintillator And Radio Surface Array At icecube // Proceedings of Science. 36. Сер. «36th International Cosmic Ray Conference, ICRC 2019» 2019.
21. Anker A., Barwick S. W., Gaswint G., Glaser C., Lahmann R., Paul M. P. et al. Neutrino vertex reconstruction with in-ice radio detectors using surface reflections and implications for the neutrino energy resolution // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. – 2019. – Т. 2019. – № 11. – С. 030.997062.
22. Nishiyama R., Ariga A., Ariga T., Käser S., Scampoli P., Vladymyrov M., Ereditato A., Lechmann A., Mair D., Schlunegger F. First measurement of ice-bedrock interface of alpine glaciers by cosmic muon radiography // Geophysical Research Letters. – 2017. – Т. 44. – № 12. – С. 6244–6251.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии
профессором Д. В. Ефановым
Поступила в редакцию 27.11.2020, принята к публикации 25.12.2020*

БАРАУСОВ Виктор Александрович — генеральный директор ООО «КТН»
barausovv@gmail.com

БУБНОВ Владимир Петрович — доктор технических наук, профессор кафедры
«Информационные и вычислительные системы» Петербургского государственного
университета путей сообщения Императора Александра I
bubnov1950@yandex.ru

СУЛТОНОВ Шохрух Холмурзаевич — аспирант кафедры «Информационные и вы-
числительные системы» Петербургского государственного университета
путей сообщения Императора Александра I
sultonovsh@yandex.ru

БАРАУСОВ Даниил Викторович — инженер кафедры «Информационные и вы-
числительные системы» Петербургского государственного университета
путей сообщения Императора Александра I
barausovv@gmail.com

© Бараусов В. А., Бубнов Вл. П., 2021
© Султонов Ш. Х., Бараусов Д. В., 2021

V. A. Barausov
VI. P. Bubnov, Dr. Sci. in Engineering
Sh. Kh. Sulstonov
D. V. Barausov

*LLC "КТН"
Department of Information and Computing Systems,
Emperor Alexander I Petersburg State Transport University*

ALGORITHMS OF THE CONTROL PROGRAM OF AUTOMATIC CLEANING SYSTEMS OF THE TURNOUTS BASED ON THE SENSOR FOR DETERMINING ICE OR SNOW ON THE CONTROLLED SURFACE

The structure of an automatic system for cleaning turnouts is considered, the main advantages and disadvantages of precipitation sensors of existing automatic systems for cleaning turnouts are analyzed. It is concluded that it is necessary to develop an advanced system based on a sensor for detecting ice or snow on a controlled surface. The developed block diagram of the formation of control actions of the system for detecting icing or snow on the controlled surface is presented. Рассматривается устройство и способ обнаружения обледенения или снега на контролируемой поверхности. An algorithm is given for its technical implementation, as well as for measuring the anticipatory control of the process of electric heating of the controlled surface of the switches. The results of simulation

of the device and method for determining ice or snow on a controlled surface in the Matlab Simulink environment are presented.

Automatic system for cleaning turnouts, sensor for detecting ice or snow, block diagram of the control action, method for detecting icing or snow on the controlled surface, algorithm of the control program, simulation model

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-231-251

References

1. Nikitin A. V. (2018) Snegobor'ba na zheleznykh dorogakh Rossii [Snow defence on the railways of Russia]. *Akademicheskaya publitsistika [Academic journalism]*, no. 5, pp. 45–47. (In Russian)
2. Gertsik D. V., Semenov A. G. (2016) Innovatsii na zheleznykh dorogakh v surovom klimate: modernizatsiya sistemy elektroobogreva strelochnykh perevodov [Innovations on railways in a harsh climate: modernization of the electric heating system for turnouts]. *Transportnyye i transportno-tehnologicheskiye sistemy. materialy mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii [Transport and transport-technological systems. materials of the international scientific and technical conference]*. Tyumen', pp. 79–84. (In Russian)
3. Osmolovskiy D. V. (2011) Novaya sistema elektroobogreva strelochnykh perevodov [New electrical heating system for turnouts]. *Avtomatika, svyaz', informatsiya [Automation, communication, information]*, no. 10, pp. 27–29. (In Russian)
4. Yakovlev I. P. (2018) Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy upravleniya i kontrolya elektroobogrevom strelochnykh perevodov [Development of an automated control and monitoring system for electric heating of turnouts]. *Sovremennyye problemy radioelektroniki: elektronnoye nauchnoye izdaniye [Modern problems of radio electronics: electronic scientific publication]*. Krasnoyarsk. (In Russian)
5. Kolisnichenko E. A. (2015) Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti pri vnedrenii ustroystva po ochistke strelochnogo perevoda ot snega i l'da [Evaluation of economic efficiency when introducing a device for cleaning a turnout switch from snow and ice]. *Nauka i obrazovaniye transportu [Science and education for transport]*, no. 1, pp. 212–215. (In Russian)
6. Sultonov Sh. Kh. (2020) Vyvody o tselesoobraznosti primeneniya s tochki zreniya tekhniko-ekonomicheskoy effektivnosti sistemy elektroobogreva [Conclusions on the feasibility of using the electrical heating system in terms of technical and economic efficiency]. *Materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy bezopasnosti na transporte» (Gomel', 26–27 noyabrya 2020 g.): v 5 ch. Ch. 4. [Materials of the X International Scientific and Practical Conference “Problems of Transport Safety” (Gomel', November 26–27, 2020) in 5 parts. Part 4. Gomel', BelsUT [Belarusian State Transport University] Publ., pp. 57–59. (In Russian)*
7. Kochubei V. F., Evdokimov I. A. (2015) Zashchita strelochnykh perevodov ot snega i l'da: prakticheskiye resheniya [Protection of turnouts from snow and ice: practical solutions]. *Put' i putevoye khozyaystvo [Track and track facilities]*, no. 11, pp. 29–33. (In Russian)
8. Vavilov V. D., Sukonkin A. N. (2013) Obzor otechestvennykh i zarubezhnykh signalizatorov obledeneniya [Review of domestic and foreign ice signaling devices]. *Trudy NGTU im. R. E. Alekseyeva [Proceedings of Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev]*, no. 1, pp. 297–310. (In Russian)
9. *Datchik nalichiya osadkov TSP02: Predlozheniye produktsii [Precipitation sensor TSP02: Product offer]*. URL: http://antiled66.ru/images/instrukcii/pasport_TSP02.pdf (accessed: December 22, 2020). (In Russian)

10. *Pat. 2582627 Rossiyskaya Federatsiya, MPK S1 01 B 7/24. Ustroystvo elektroobogreva strelochnykh perezvodov tipa SEIT-04/V.A. Barausov, V.F. Kochubei. zayavitel' i patentoobladatel' V.A. Barausov, V.F. Kochubei. – № 2015106701, zayavl. 26.02.15, opubl. 27.04.16, byul. № 12 [Pat. 2582627 Russian Federation, IPC C1 01 B 7/24. Electrical heating device for switches of the SEIT-04 type/V.A. Barausov, V.F. Kochubei. applicant and patentee V.A. Barausov, V.F. Kochubei. – No. 2015106701, app. 02/26/15, publ. 04/27/16, bul. No. 12.]. (In Russian)*
11. Sultonov Sh. Kh., Bubnov V.P., Barausov D. V. (2020) Strukturnaya skhema formirovaniya upravlyayushchikh vozdeystviy sistemy obnaruzheniya obledeneniya [Structural diagram of the formation of control actions of the icing detection system]. *Sbornik tezisov natsional'noy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Perspektivy budushchego v obrazovatel'nom protsesse» v ramkakh yezhegodnogo festivalya «nedelya nauki – 2020» (Sankt-Peterburg, 21 aprelya) [Collection of abstracts of the national scientific and technical conference “Prospects for the future in the educational process” within the framework of the annual festival “Week of science – 2020” (St. Petersburg, April 21)]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., pp. 183–186. (In Russian)*
12. *Pat. 2685631 Rossiyskaya Federatsiya, MPK S1 01 F 7/56. Sposob i ustroystvo obnaruzheniya obledeneniya ili snega na kontroliruyemoy poverkhnosti/S. G. Selyanin. zayavitel' i patentoobladatel' V.A. Barausov P.V. Grigor'yev. – № 2018125617, zayavl. 11.07.18, opubl. 22.04.19, byul. № 12 [Pat. 2685631 Russian Federation, IPC C1 01 F 7/56. Method and device for detecting ice or snow on a controlled surface/S.G. Selyanin. applicant and patentee V.A. Barausov P.V. Grigor'yev. – No. 2018125617, app. 07/11/18, publ. 04/22/19, bul. No. 12.]. (In Russian)*
13. Barausov V.A., Bubnov V.P., Sultonov Sh. Kh. (20197) Control Software for Surface Ice and Snow Detecting Device. *Models and Methods of Information Systems Research Workshop. Saint Petersburg, CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org), vol. 2556, pp. 75–79. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2556/paper13.pdf>.*
14. Sultonov Sh. Kh., Bubnov V.P. (2020) Algoritm raboty sistemy upravleniya elektroobogrevom strelochnykh perezvodov na osnove energosberegayushchikh tekhnologiy [Algorithm of operation of the control system for electric heating of turnouts on the basis of energy-saving technologies]. *Sbornik trudov LXXX Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Transport: problemy, idei, perspektivy» FGBOU VO PGUPS [Proceedings of the LXXX All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists “Transport: Problems, Ideas, Prospects”]. Saint Petersburg, Petersburg State Transport University Publ., pp. 74–77. (In Russian)*
15. Sultonov Sh. Kh., Kritskiy N.A., Sultonova Z. R. (2020) Struktura upravlyayushchey programmy i sposob dlya obnaruzheniya obledeneniya na poverkhnosti strelochnykh perezvodov [The structure of the control program and a method for detecting icing on the surface of the turnouts]. *Intellektual'nyye tekhnologii na transporte [Intelligent technologies in transport], no. 2 (22), pp. 59–64. (In Russian)*
16. *Programma dlya ustroystva obnaruzheniya obledeneniya ili snega na kontroliruyemoy poverkhnosti: Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2020619431 ot 17.08.2020 Rossiyskaya Federatsiya/V.A. Barausov, P. V. Grigor'yev, Sh. Kh. Sultonov, zayavl. № 2020612292 ot 21.02.2020. opubl. 17.08.2020, byul. № 8. – 1 s. [Control Software for Surface Ice and Snow Detecting Device: Certificate of state registration of a computer program No. 2020619431 dated 17.08.2020 Russian Federation/V.A. Barausov, P.V. Grigor'yev, Sh. Kh. Sultonov, Appl. No. 2020612292 dated 21.02.2020. publ. 08/17/2020, bul. No. 8, 1 p.]. (In Russian)*

17. Sultonov Sh. Kh., Bubnov V. P. (2019) Programma dlya avtomatizatsii vychisleniy velichin nagruzok, deystvuyushchikh na kuzov vagona pri prochnostnykh raschetakh [A program for automating the calculation of the values of loads acting on the car body during strength calculations]. *Izvestiya SPbGETU "LETI"* [Bulletin of the St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI"], no. 9, pp. 37–43. (In Russian)
18. Ing Bey, Dzhifeng Ksu (2005) Vzaimodeistvie Matlab s ANSI C, Visual C ++, Visual Basic i Java, [Interaction of MATLAB with ANSI C, Visual C ++, Visual Basic and Java]. M., Williams Publ., 207 p.
19. Smolentsev N. K. (2008) *Sozdaniye Windows-prilozheniy s ispol'zovaniyem matematicheskikh protsedur MATLAB* [Creation of Windows applications using MATLAB mathematical procedure]. Moscow, DMK-Press Publ., 456 p. (In Russian)
20. Schröder F. G. (2019) SCIENCE CASE OF A SCINTILLATOR AND RADIO SURFACE ARRAY AT ICECUBE. *Proceedings of Science*. 36. Series "36th International Cosmic Ray Conference, ICRC 2019".
21. Anker A., Barwick S. W., Gaswint G., Glaser C., Lahmann R., Paul M. P. et al. (2019) Neutrino vertex reconstruction with in-ice radio detectors using surface reflections and implications for the neutrino energy resolution. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, vol. 2019, no. 11, pp. 030.997062.
22. Nishiyama R., Ariga A., Ariga T., Käser S., Scampoli P., Vladymyrov M., Ereditato A., Lechmann A., Mair D., Schlunegger F. (2017) First measurement of ice-bedrock interface of alpine glaciers by cosmic muon radiography. *Geophysical Research Letters*, vol. 44, no. 12, pp. 6244–6251.

УДК 656.212.5

К. Е. Ковалев, канд. техн. наук

А. В. Новичихин, докт. техн. наук

*Кафедра «Логистика и коммерческая работа»,
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I*

КОМПЛЕКСНЫЙ СИНЕРГЕТИКО-ИНДИКАТОРНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕВОЗОК НА ИНТЕНСИВНЫХ И МАЛОДЕЯТЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ

Рассмотрена актуальная для железнодорожного транспорта комплексная проблема эффективного функционирования и развития методологии управления перевозками на малодеятельных железнодорожных линиях при взаимодействии с интенсивными магистралями. Поставлены комплексные проблемы, исследованы теоретические положения задач функционирования малодеятельных железнодорожных линий и их взаимодействие с интенсивными и проектируемыми (модернизируемыми) линиями. Решение указанной проблемы имеет важное социально-экономическое и хозяйственное значение для работы железнодорожной транспортной сети, обеспечения потребностей производства и населения в перевозках.

Предложен комплексный синергетико-индикаторный подход к управлению интенсивными и малодеятельными железнодорожными линиями на базе существующих функций управления, включающих анализ, организацию, стимулирование, контроль и координацию перевозочного процесса. Дана общая оценка динамики функционирования малодеятельных железнодорожных линий.

Представлена концептуальная структура комплексного синергетико-индикаторного подхода, имеющая эмпирические основы, предпосылки, теоретические основы и реализацию, подтверждаемую критериями достоверности. Разработана структура предлагаемой системы управления железнодорожным транспортом при выделении объектов управления. Установлены элементы взаимодействия интенсивных, малодеятельных и проектируемых железнодорожных линий. Разработана схема математической модели взаимодействия интенсивных, модернизируемых малодеятельных линий и функция состояния рассматриваемой системы. Классифицирована моделируемая транспортная система.

Комплексный синергетико-индикаторный подход, управление процессами перевозок, интенсивные линии, малодеятельные линии, проектируемые линии, пропускная способность, железнодорожный транспорт, структурный синтез

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-252-267

Введение

В современных условиях загрузки существующей железнодорожной сети явно выражена тенденция к концентрации движения на высокоинтенсивных направлениях, связанная с добычей и переработкой сырья, а также направлениями, входящими в международные транспортные коридоры и подходы к морским торговым портам. Спад объемов производства в регионах и износ материально-технической базы железнодорожного транспорта стремительно

обостряет проблему эффективного использования инфраструктуры малодеятельных железнодорожных линий.

Низкая эффективность малодеятельных железнодорожных линий обусловлена спадом производства или перераспределениями транспортных потоков в районах, обслуживаемых этими линиями. Указанные причины определяют необходимость поиска путей снижения их убыточности, прежде всего за счет эффективного использования инфраструктуры и стимулирования клиентов к перевозкам по этим направлениям, что весьма актуально для ОАО «РЖД», субъектов РФ и укрепления транспортной доступности территорий.

Анализ нормативно-правовых документов [1] показал, что под «малодеятельной линией» понимается железнодорожный путь общего пользования с невысокой грузонапряженностью и низкой эффективностью работы. Задачи повышения эффективности функционирования малодеятельных линий в настоящее время еще не нашли оптимальных решений в рамках совершенствования методологических основ управления процессами перевозок.

Таким образом, актуальной проблемой является разработка комплексного синергетико-индикаторного подхода управления перевозочным процессом. В качестве объектов управления процессами перевозок выделены интенсивные, проектируемые (моделируемые) и малодеятельные линии как структурные элементы сложной транспортной системы. Это предполагает необходимость идентификации связей с управляющей системой и декомпозиции ее элементов, определение набора входных и выходных векторов и установление взаимовлияний и зависимостей линий.

1. Современное состояние вопроса эксплуатации малодеятельных линий

В современных условиях на железных дорогах Российской Федерации количество малодеятельных линий составляет около трехсот участков [2]. Наблюдается тенденция к увеличению их количества и протяженности (рис. 1).

Проблема функционирования малодеятельных железнодорожных линий рассмотрена в отечественных и зарубежных исследованиях [3–16]. Анализ исследований показал отсутствие разработанного методологического подхода взаимодействия интенсивных и малодеятельных железнодорожных линий, который был бы доведен до реализации и подтвердил свою эффективность на практике. Разработка такого подхода позволяет учитывать взаимоисключающие факторы для каждого из видов железнодорожных линий, в т. ч. комплексировать параметры проектирования и показатели эффективности на количественном и качественном уровне. Актуальные задачи для функционирования интенсивных железнодорожных линий — снижение размеров движения поездов и приведение их к нормативным значениям, повышение пропускной способности путем совершенствования технических и технологических решений, инструментария



Рис. 1. Процентное соотношение малодеятельных линий к общей протяженности линий ОАО «РЖД» в динамике

их разработки и корректировки. На малодеятельных линиях недостаточные размеры движения поездов приводят к убыточности, низкой эффективности, уменьшению инвестиционной привлекательности. При этом многие из них имеют серьезное стратегическое и социально-экономическое значение для регионов нашей страны.

Цель исследования — решение комплексной проблемы взаимодействия интенсивных, малодеятельных и проектируемых (модернизируемых) линий, что позволит повысить эффективность функционирования железнодорожной транспортной системы, создать предпосылки к увеличению значимости и привлекательности интермодальных, мультимодальных и других видов перевозок, недостаточно востребованных в настоящее время.

Для применения комплексного синергетико-индикаторного подхода необходима разработка научно-теоретических основ управления процессами перевозок при взаимодействии интенсивных, малодеятельных и проектируемых (модернизируемых) железнодорожных линий. Для достижения цели исследования используется метод структурного синтеза.

Области структурного синтеза при взаимодействии проектируемых, интенсивных и малодеятельных железнодорожных линий представлены на рис. 2. Идеей структурного синтеза является комплексирование элементов на этапах разработки и принятия управляющих решений при обеспечении взаимодействия железнодорожных линий, а также учет и агрегирование их отличительных признаков, в т. ч. на количественном и качественном уровнях. Посредством синтеза общих целей обеспечения потребностей производства и населения



Рис. 2. Схема структурного синтеза при взаимодействии проектируемых, интенсивных и малодеятельных железнодорожных линий

в перевозках и выделения трех составляющих поставлены задачи повышения эффективности перевозочного процесса, которые решаются с помощью разрабатываемых алгоритмов, процедур и синергетического эффекта различных математических методов, позволяющих улучшить показатели взаимодействия функционирующих интенсивных и малодеятельных линий.

Функционирование каждой железнодорожной линии возможно по различным сценариям, включающим жизненный цикл линии. Цикл охватывает различные состояния системы: проектирование, строительство, функционирование, эксплуатация при нестандартных ситуациях, снижение или увеличение объемов перевозок, моральное и техническое устаревание, изменение класса и типа линии, модернизация или закрытие линии.

2. Формализованное описание комплексного синергетико-индикаторного подхода

Концептуальная структура решения комплексной проблемы функционирования малодеятельных линий представлена на рис. 3.

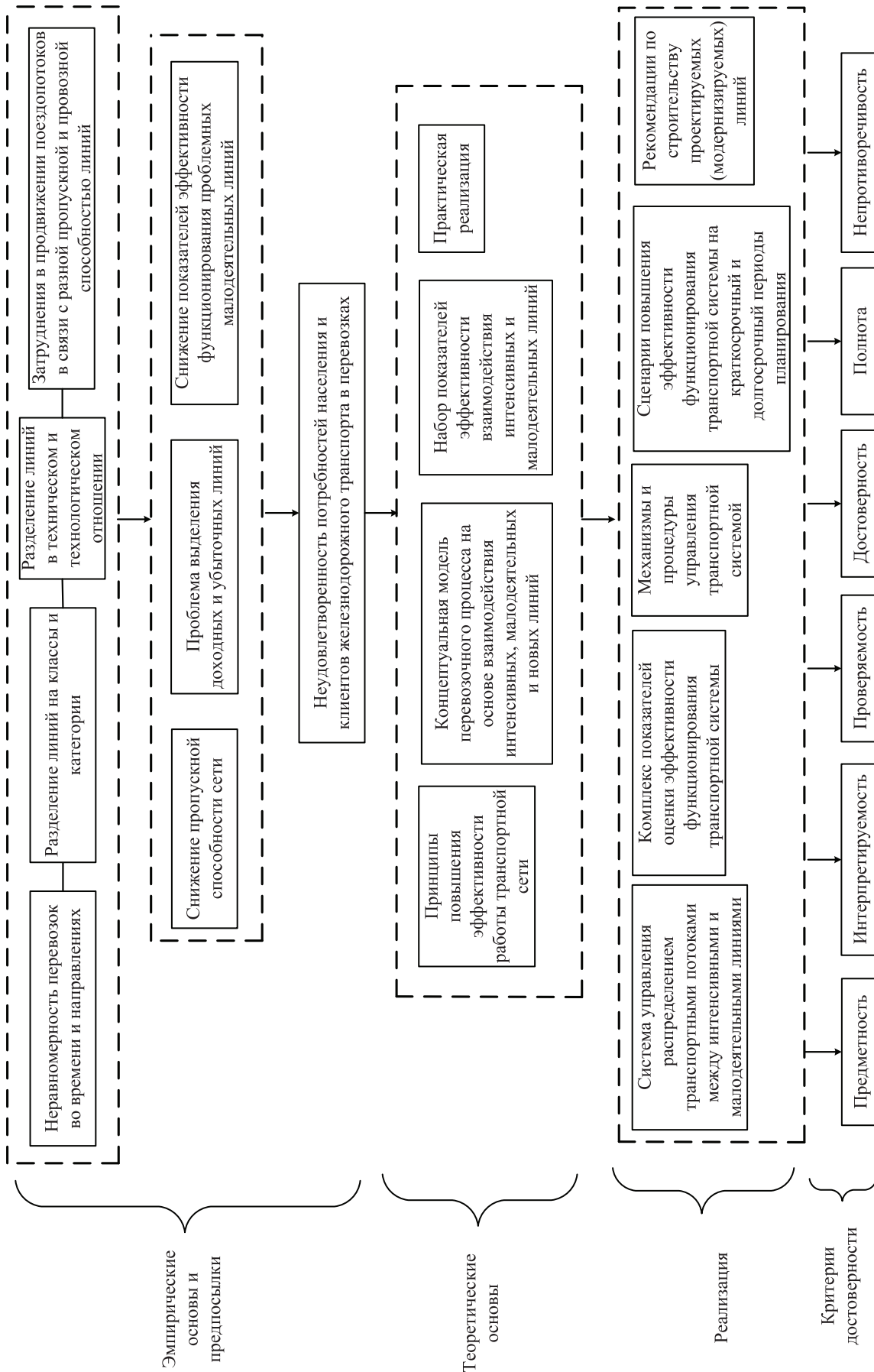


Рис. 3. Концептуальная структура решения комплексной проблемы функционирования малоделятельных линий

Одним из результатов решения проблемы станет обоснованное перераспределение и появление новых транспортных потоков между интенсивными и малодеятельными линиями. В тех случаях, когда использование малодеятельных линий неэффективно, рассмотрена возможность разработки рекомендаций по строительству новых линий.

Предпосылки для решения указанной комплексной проблемы — неравномерность перевозок по времени и направлениям. Наибольшие размеры перевозок можно осуществить при циклическом функционировании транспортного процесса с одинаковыми размерами движения и при отсутствии нестандартных ситуаций.

Неравномерность приводит к разделению железнодорожных линий по классам и категориям в зависимости от характера перевозок. Особенности размеров перевозок влияют на расходующие средства и системы управления на линии. Классификация линий железнодорожной транспортной системы дает понимание структуры сети, но также вызывает затруднения в продвижении поездопотоков, что вызвано разной пропускной способностью линий.

Указанные предпосылки ведут к снижению пропускной способности железнодорожной транспортной сети и к проблеме выделения высокодоходных, доходных и убыточных железнодорожных линий. В итоге потребности населения и производства в перевозках не удовлетворяются.

Решения основано на теоретических положениях повышения эффективности работы транспортной сети. Перевозочный процесс представлен в виде концептуальной модели, в которой объектами системы являются интенсивные, малодеятельные и новые железнодорожные линии. Каждый из объектов системы обладает свойствами и связями. Прямые и обратные связи имеются между всеми объектами. В качестве свойств интенсивных линий можно выделить приведенную грузонапряженность и техническую скорость грузовых поездов. Свойства малодеятельных линий — размеры движения и приведенная грузонапряженность. Свойства новых линий — планируемая приведенная грузонапряженность, чистый дисконтированный доход и эксплуатационные расходы.

Разработана концептуальная структура системы управления железнодорожным комплексом, направленная на повышение эффективности работы железнодорожной транспортной системы с учетом максимально возможного использования малодеятельных линий (рис. 4) и улучшения структурных взаимодействий между транспортом, населением и предприятиями с помощью проблемно-ориентированных наборов индикаторов и показателей при взаимодействии.

На входе системы вектор $V(t)$ характеризует параметры потребностей населения и предприятий (клиентов) в перевозках на железнодорожном транспорте. Выход системы представлен вектором $Vi(t)$, характеризующим показатели удовлетворенности населения и предприятий в перевозках. Целевой ориентир — повышение показателей эффективности функционирования железнодорожной транспортной сети и доходности малодеятельных линий.

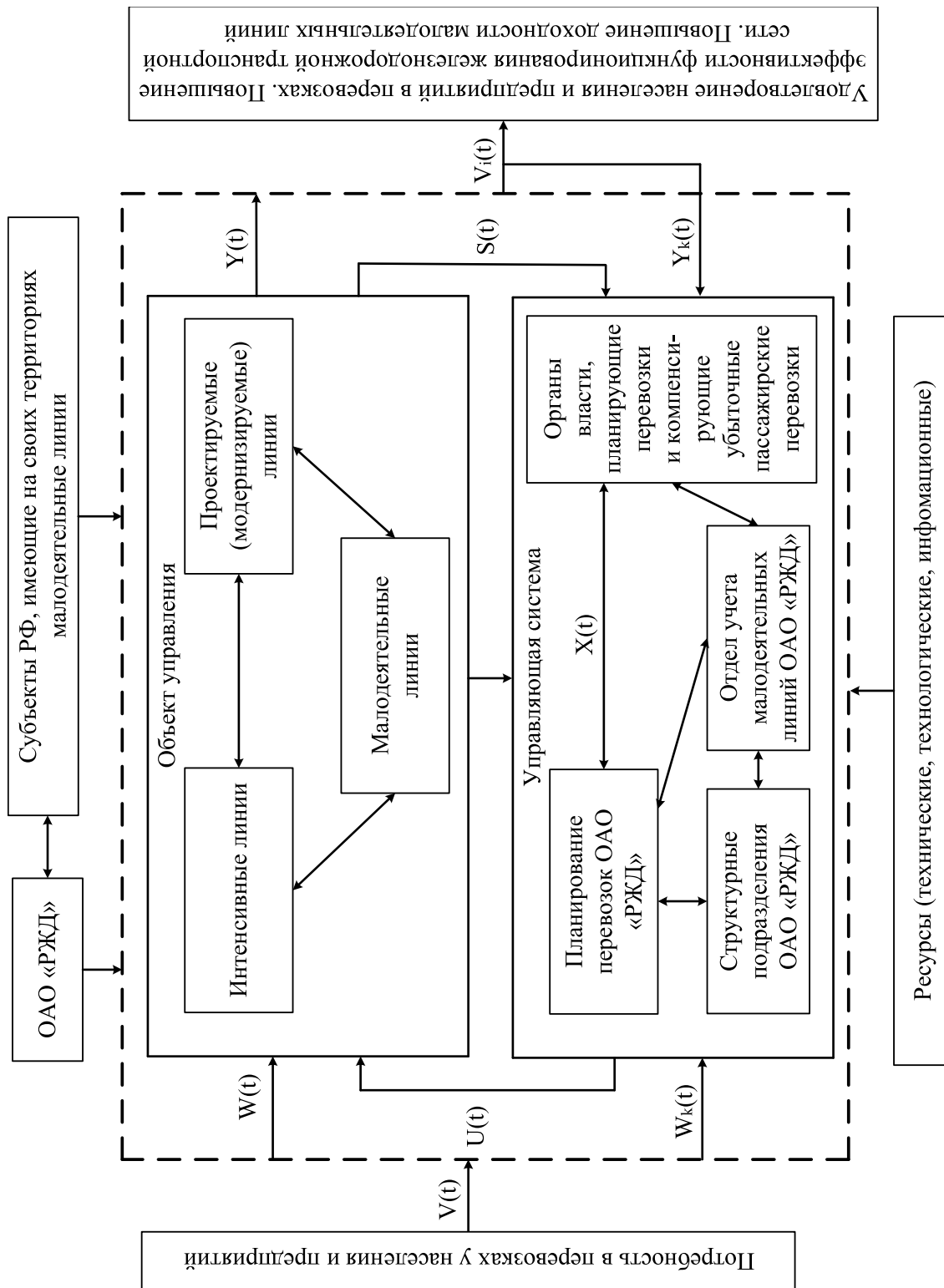


Рис. 4. Концептуальная структура системы управления железнодорожным транспортом при выделении объектов управления интенсивных, проектируемых (модернизируемых) и малоделятельных линий

Объект управления — железнодорожный комплекс, включающий в себя интенсивные линии со значительными размерами перевозок; малодейственные линии с низкими размерами движения, признанные убыточными; проектируемые и модернизируемые линии, которые смогут взять на себя часть грузопотоков. Объект управления представлен векторами входных $W(t)$ и выходных величин $Y(t)$, состояний объекта $S(t)$.

Управляющая система характеризуется вектором управляющих воздействий $U(t)$ (согласованными между ОАО «РЖД» и органами исполнительной власти в регионах размерами перевозок, концепцией развития ОАО «РЖД» до 2030 года, нормативными требованиями, планами, техническими заданиями, расчетными показателями классности железнодорожных линий)). Цель управления $X(t)$ — удовлетворение потребностей населения и предприятий в перевозках, повышение показателей эффективности функционирования железнодорожной транспортной сети, повышение доходности малодейственных линий, оценка вектора контролируемых внешних воздействий $Wk(t)$ и вектора контролируемых переменных состояний объекта $Yk(t)$.

Очевидно влияние интенсивных и малодейственных линий на новые линии. Оценка влияния и выявление его закономерностей можно установить с помощью модельных экспериментов на количественном и качественном уровнях согласно натурным и статистическим данным.

Для разработки модели планируется в качестве переменных использовать численные значения размеров движения поездов по интенсивным и малодейственным линиям. Чтобы оценить эффективность работы модели взаимодействия интенсивных, проектируемых (модернизируемых) и малодейственных линий, нужно разработать комплекс показателей. К ним можно отнести коэффициент перераспределения поездопотоков между малодейственными и интенсивными линиями и критерий использования малодейственных тупиковых или транзитных линий.

Процедуры и алгоритмы на основе концептуальной модели позволят создать систему управления распределением транспортных потоков между интенсивными и малодейственными линиями. Инструментарий определения показателей транспортной системы и механизмы управления способны обеспечить разработку эффективных решений и сценариев функционирования для повышения эффективности работы линий.

С помощью модели взаимодействия интенсивных, проектируемых (модернизируемых) и малодейственных линий (рис. 5) планируется разработать алгоритмы, нормирование весовых значений связей и свойств объектов системы для установления рекомендаций по строительству новых железнодорожных линий.

Перечислим параметры описанной концептуальной структуры.

1. Предметность (теоретические основы и механизмы реализации направлены на повышение эффективности существующей транспортной сети).

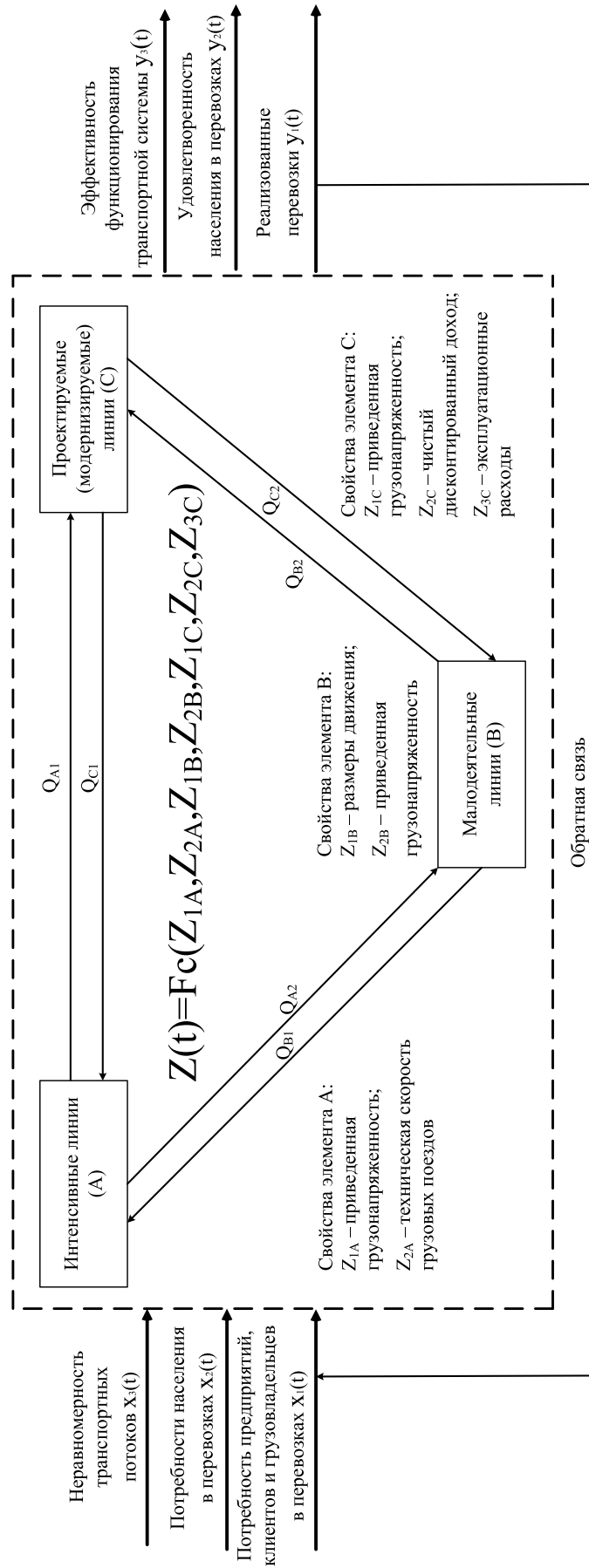


Рис. 5. Схема математической модели взаимодействия интенсивных, проектируемых (модернизируемых) и малодеятельных линий

2. Интерпретируемость (наличие расчетных значений рассматриваемых параметров дает возможность численно оценить эффективность работы транспортной системы).

3. Проверяемость (результаты работы модели, алгоритмов и процедур можно сопоставить с реальными объектами транспортной инфраструктуры).

4. Достоверность (система управления, комплекс показателей и механизмы управления отражают изменения пропускной способности транспортной инфраструктуры малодеятельных железнодорожных линий).

5. Полнота (охват интенсивных, малодеятельных и новых железнодорожных линий в комплексе влияют на реализуемую пропускную способность железнодорожной транспортной системы).

6. Непротиворечивость (концепция, принципы и результаты реализации в виде системы управления, комплекса показателей и сценарии их моделирования и изменения не противоречат друг другу и имеют прямые и обратные связи).

При функционировании системы входным воздействием будет потребность в перевозках $x_1(t)$ и другие параметры $x_2(t)$, $x_3(t)$, результатом функционирования системы — реализованные перевозки $y_1(t)$ и другие параметры $y_2(t)$, $y_3(t)$.

Состояние системы Z есть функция F_c в совокупности свойств ее элементов, которое можно представить выражением:

$$Z(t) = F_c (Z_{1A}, Z_{2A}, Z_{1B}, Z_{2B}, Z_{1C}, Z_{2C}, Z_{3C}).$$

Каждый объект системы имеет набор показателей. Для интенсивных линий учитываются приведенная грузонапряженность и техническая скорость, для малодеятельных — размеры движения и тонно-километры работы, для новых — приведенная грузонапряженность, чистый дисконтированный доход и эксплуатационные расходы на обслуживание линии.

Характеристики математической модели взаимодействия интенсивных, проектируемых (модернизируемых) и малодеятельных линий представлены в табл. 1 (в соответствии с общей теорией систем) [17–20].

Взаимодействие интенсивных, проектируемых (модернизируемых) и малодеятельных линий является эргодическим при взаимодействии человека и автоматизированных систем управления различного уровня и назначения. Управляющее решение принимает человек при поддержке автоматизированных систем управления.

Наличие математических моделей позволит создать алгоритмы расчета загрузки оперативного персонала на малодеятельных линиях с целью оптимизации затрат на функционирование и повышения доходности. Понимание содержательной части показателей функционирования и взаимодействия интенсивных и малодеятельных железнодорожных линий позволит сформулировать механизмы управления малодеятельными линиями.

Таблица 1. Характеристики модели взаимодействия интенсивных, проектируемых (модернизируемых) и малодеятельных линий

| Классификационные признаки | Вид класса | Сфера применения |
|--|-------------------|---|
| Природа элементов | Реальный | Система является реальной и функционирующей |
| Происхождение | Искусственный | Система создана человеком для управления перевозочным процессом в железнодорожной транспортной сети |
| Длительность существования | Временный | Система является временной, т. к. структура, цели и задачи каждого элемента могут меняться |
| Изменчивость свойств | Динамический | Элементы и параметры системы могут меняться как непрерывно, так и дискретно |
| Степень сложности | Сложный | Система состоит из большого числа взаимосвязанных и взаимодействующих элементов, каждый из ее элементов характеризуется многомерностью и имеет набор факторов и показателей |
| Отношение к среде | Открытый | Система является открытой, т. к. может обмениваться с другими видами транспорта, грузоотправителями и грузополучателями грузами и информацией |
| Реакция на возмущающие воздействия | Активный | Система активна, способна противостоять воздействиям среды (в т. ч. учитывается активность лица, принимающего решения) |
| Характер поведения | С управлением | Система является управляемой и функционирует на основе управляющих воздействий, передаваемых человеком |
| Степень связи с внешней средой | Открытый | Система связана с системами других видов транспорта и сопутствующих отраслей народного хозяйства |
| Степень участия в реализации управляющих воздействий людей | Человеко-машинный | Человек сопряжен с техническими устройствами; окончательное решение принимает человек, а средства автоматизации лишь помогают ему обосновать правильное решение |

Таким образом, комплексный синергетико-индикаторный подход позволит комплексно решать проблемы функционирования малодеятельных линий как самостоятельных субъектов, так и проблемы их взаимодействия с интенсивными и проектируемыми линиями.

На интенсивных направлениях возникает необходимость перераспределения потоков. Решением может стать либо строительство дополнительных путей (это

капиталоемкий вариант), либо использование существующей инфраструктуры малодеятельных линий, признанных убыточными. Повышение эффективности эксплуатации малодеятельных линий повысит привлекательность железнодорожного транспорта в целом. Разработанная модель обеспечивает адаптацию алгоритмов распределения транспортных потоков для снижения транспортной работы на интенсивных направлениях и повышения ее на малодеятельных направлениях, тем самым увеличивая эффективность функционирования железнодорожной транспортной системы. Разработка показателей взаимодействия интенсивных и малодеятельных железнодорожных линий и их комплексирование позволяет оценить эффективность работы, определить синергетический эффект и закономерности функционирования.

Заключение

Эксплуатация малодеятельных линий — важная социально-экономическая и хозяйственная задача.

Результатом исследования является разработка решения комплексной проблемы эффективного функционирования и развития методологии управления перевозками на малодеятельных железнодорожных линиях при взаимодействии с интенсивными магистралями.

Практическая значимость исследования состоит в том, что в современных условиях возрастает количество и протяженность малодеятельных участков в связи с динамично изменяющимися условиями экономики и социальной миграции населения страны. Поэтому своевременные решения в области взаимодействия интенсивных и малодеятельных линий позволит сохранить и повысить эффективность работы железнодорожного транспорта.

Установлены элементы взаимодействия интенсивных, малодеятельных и проектируемых железнодорожных линий. Представлены теоретические основы и концептуальная структура методологического подхода, реализация которого подтверждается критериями достоверности.

Разработана схема математической модели, имеющая входной и выходной поток, элементы и взаимосвязи системы. Определена оценка и зависимость состояния системы от совокупности ее свойств и элементов. Предложены характеристики модели взаимодействия интенсивных, проектируемых (модернизируемых) и малодеятельных линий.

Инфраструктура железнодорожного транспорта обладает слабой динамикой и не поспевает за изменениями грузопотоков, что приводит к появлению малодеятельных линий. Современные технические и экономические аспекты эксплуатации таких линий направлены в сторону снижения затрат на организацию перевозочного процесса. Это позволяет использовать малодеятельные линии как полигон для испытания современных технических решений с дальнейшей возможностью их применения на интенсивных железнодорожных линиях.

Библиографический список

1. «Классификации и специализации железнодорожных линий». Утв. ОАО «РЖД» 23 декабря 2015 г., № 3048р. – 74 с.
2. [Интернет-ресурс: газета «Гудок»: «РЖД увеличивают темп погрузки на малодеятельных ветках»: <https://www.gudok.ru/content/infrastructure/1505179/> дата доступа 20.11.2020].
3. Frumin D. Branching processes of conservative nested Petri nets / D. Frumin, I. A. Lomazova // VPT 2014. Second International Workshop on Verification and Program Transformation. Vol. 28: EPiC Series. EasyChair, 2014. – Pp. 19–35.
4. Chan Y. K., Gaffney P., Neailey K., Ip W. H. The establishment of an integrated management system paradigm for railway engineering management // The TQM Magazine, 1998. – Т. 10. – № 6. – С. 420–424.
5. Purnell C. J., Frommer G., Chan K., Auch A. A. Development and management of a radon assessment strategy suitable for underground railway tunnelling projects // Radiation Protection Dosimetry, 2004. – Т. 108. – № 4. – С. 353, doi: 10.1093/rpd/nch035.
6. Fröhling R. D. Wheel/rail interface management in heavy haul railway operations – applying science and technology // Vehicle System Dynamics, 2007. – Т. 45. – № 7–8. – С. 649–677.
7. Ballis A., Dimitriou L. Issues on railway wagon asset management using advanced information systems // Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2010. – Т. 18. – № 5. – С. 807–820.
8. Hiraguri S. Train Control System for Secondary Lines Using Radio Communications in Specific Area / S. Hiraguri, M. Fukuda, H. Fujita, Y. Ono // Quarterly Report of RTRI, 2012. – Feb. – Pp. 1–6.
9. Sauer C. Gleisstromkreise – ein veraltetes oder aktuelles Mittel zur Gleisfreimtding / C. Sauer // Eisenbahningenieur, 2014. – 65. – No 7. – S. 25–30.
10. Q. Shen, J. Qiu, G. Liu, and K. Lv. Intermittent fault's parameter framework and stochastic petri net based formalization model. Eksploatacja i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability, 2016. – Vol. 18, no. 2. – Pp. 210–217.
11. The tool for modeling of wireless sensor networks with nested Petri nets. In Proceedings of 7th the Spring / Nina Buchina and Leonid Dworzanski // Summer Young Researchers' Colloquium on Software Engineering, SYRCoSE '13. Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences, 2013. – Pp. 15–18.
12. Jian W. A Train Control System for Low Density Line in China / W. Jian, J. Cheng Mingm, C. Baigen, L. Jiang // Journal of the China railway society, 2015. – December. – Pp. 46–53.
13. Кириленко О. Н. Экономическая эффективность методов эксплуатации малодеятельных линий // Экономика железных дорог. – 2014. – № 8. – С. 79–85.
14. Вакуленко С. П., Колин А. В., Евреенова Н. Ю. Малодеятельные линии: состояние и варианты оптимизации // Мир транспорта. – 2017. – Т. 15. – № 3 (70). – С. 174–180.
15. Никитин А. Б., Кушпиль И. В. Возможность внедрения цифровой радиосвязи и организации передачи данных между станциями на малодеятельных линиях // Автоматика на транспорте. – 2019. – Т. 5. – № 1. – С. 45–61.
16. Шорохова А. В., Новичихин А. В. Имитационные модели социально-экологической безопасности горнопромышленных районов // Экономика и менеджмент систем управления. – 2016. – № 4. – С. 93–100.
17. Шорохова А. В., Новичихин А. В. Социально-экологическая безопасность горнопромышленных районов: разработка и конкретизация организационно-технологического механизма управления // Экономика и менеджмент систем управления. – 2016. – № 4.1 (22). – С. 194–200.

18. Шеповалов Е. Н. Некоторые алгебраические аспекты метода системного анализа в общей теории сложных механических систем // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Физика. Химия. – 2006. – № 7. – С. 164–175.
19. Месарович М., Месарович И. Общая теория систем: математические основы // М. Такаха. – М.: Мир, 1978. – 311 с.
20. Bratishchev A., Batishcheva G., Denisov M., Zhuravleva M. Bifurcation analysis and synergetic control of a dynamic system with several parameters // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Т. 1095. – С. 639–646.
21. Romanenko V. E., Yarkin E. K., Mokhov V. A. System analysis and the task of ontological modeling of multimodal transportation // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 272 (2019) 022231, doi:10.1088/1755-1315/272/2/022231.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии
профессором В. В. Сапожниковым*

Поступила в редакцию 16.03.2020, принята к публикации 19.06.2020

КОВАЛЕВ Константин Евгеньевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Логистика и коммерческая работа» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I
e-mail: kovalev_kostia@mail.ru

НОВИЧИХИН Алексей Викторович — доктор технических наук, профессор кафедры «Логистика и коммерческая работа» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I
e-mail: novitchihin@bk.ru

© Ковалев К. Е., Новичихин А. В., 2021

AN INTEGRATED SYNERGETIC-INDICATOR APPROACH TO THE MANAGEMENT OF TRANSPORTATION PROCESSES ON BUSY AND LOW-DENSITY LINES

K. E. Kovalev, PhD in Engineering
A. V. Novichikhin, Dr. Sci. in Engineering

*Department of Logistics and commercial work,
Emperor Alexander I Petersburg State Transport University*

The article considers the complex problem of effective functioning and the methodology development for managing transportation on low-density railway lines when interacting with intensive highways, which is urgent for railway transport. The article raises complex problems and investigates theoretical provisions of the problems of functioning of low-density railway lines and their interaction with intensive and projected (modernized) lines. The solution to this problem is of great socio-economic and economic importance for the operation of the railway transport network, ensuring the needs of production and the population in transportation.

The article proposes a comprehensive synergetic-indicator approach to the management of intensive and low-density railway lines based on existing management functions, including analysis, organization, stimulation, control and coordination of the transportation process. A general assessment of the dynamics of the functioning of low-density railway lines is given.

The conceptual structure of the integrated synergetic-indicator approach is presented, which has empirical foundations, prerequisites, theoretical foundations and implementation, confirmed by reliability criteria. The structure of the proposed railway transport management system is developed for the selection of management objects. The elements of interaction of busy, low-density and projected railway lines are established. The mathematical model diagram of the interaction of intensive modernized low-density lines and the state function of the system under consideration have been developed. The modeled transport system is classified.

Integrated synergetic-indicator approach, management of transportation processes, busy lines, low-density lines, projected lines, throughput, railway transport, structural synthesis

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-252-267

References

1. “Klassifikatsii i spetsializatsii zheleznodorozhnykh liniy”. Utv. OAO “RZHD” 23 dekabrya 2015 g., № 3048r [*Classifications and specializations of railway lines*]. Approved by JSC “Russian Railways” on December 23, 2015. No. 3048r]. Moscow, 74 p. (In Russian)
2. «RZHD uvelichivayut temp pogruzki na malodeyatel’nykh vetkakh» [“Russian Railways is increasing the rate of loading on low-activity lines”]. URL: <http://www.gudok.ru/content/infrastructure/1505179> (accessed: November 20, 2020) (In Russian)
3. Frumin D., Lomazova I.A. (2014) Branching processes of conservative nested Petri nets. VPT 2014. *Second International Workshop on Verification and Program Transformation*, vol. 28: EPiC Series. EasyChair, pp. 19–35.
4. Chan Y.K., Gaffney P., Neailey K., Ip W.H. (1998) The establishment of an integrated management system paradigm for railway engineering management. *The TQM Magazine*, vol. 10, no. 6, pp. 420–424.
5. Purnell C.J., Frommer G., Chan K., Auch A.A. (2004) Development and management of a radon assessment strategy suitable for underground railway tunnelling projects. *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 108, no. 4, p. 353.
6. Fröhling R.D. (2007) Wheel/rail interface management in heavy haul railway operations – applying science and technology. *Vehicle System Dynamics*, 2007, vol. 45, no. 7–8, pp. 649–677.
7. Ballis A., Dimitriou L. (2010) Issues on railway wagon asset management using advanced information systems. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*, vol. 18, no. 5, pp. 807–820.
8. Hiraguri S., Fukuda M., Fujita H., Ono Y. (2012) Train Control System for Secondary Lines Using Radio Communications in Specific Are. *Quarterly Report of RTRI*, February, pp. 1–6.
9. Sauer C. (2014) Gleisstromkreise – ein veraltetes oder aktuelles Mittel zur Gleisfreimtding. *Eisenbahningenieur*, vol. 65, no. 7, pp. 25–30.
10. Shen Q., Qiu J., Liu G., and Lv.K. (2016) Intermittent fault’s parameter framework and stochastic petri net based formalization model. *Eksploatacja i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability*, vol. 18, no. 2, pp. 210–217.
11. Buchina N., Dworzanski L. (2013) The tool for modeling of wireless sensor networks with nested Petri nets. *Summer Young Researchers’ Colloquium on Software Engineering, SYRCoSE ’13*. Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences, pp. 15–18.
12. Jian W., Cheng Mingm J., Baigen C., Jiang L. (2015) A Train Control System for Low Density Line in China. *Journal of the China railway society*, December, pp. 46–53.
13. Kirilenko O.N. (2014) Ekonomicheskaya effektivnost’ metodov eksploatacii malodeyatel’nykh liniy [Economic efficiency of methods for operating low-activity lines]. *Ekonomika zheleznykh dorog [Economy of railways]*, no. 8, pp. 79–85 (In Russian)

14. Vakulenko S. P., Kolin A. V., Evreenova N. Y. (2017) Malodeyatel'nyye linii: sostoyaniye i varianty optimizatsii [Inactive lines: state and optimization options]. *Mir transporta [World of Transport]*, vol. 15, no. 3 (70), pp. 174–180. (In Russian)
15. Nikitin A. B., Kushpil I. V. (2019) Vozmozhnost' vnedreniya tsifrovoy radiosvyazi i organizatsii peredachi dannykh mezhdru stantsiyami na malodeyatel'nykh liniyakh [Possibility of introducing digital radio communication and organizing data transmission between stations on low-activity lines]. *Avtomatika na transporte [Transport Automation]*, vol. 5, no. 1, pp. 45–61 (In Russian)
16. Shorokhova A. V., Novichikhin A. V. (2016) Imitatsionnyye modeli sotsial'no-ekologicheskoy bezopasnosti gornopromyshlennykh rayonov [Simulation models of social and ecological safety of mining regions]. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya [Economics and management of control systems]*, no. 4, pp. 93–100 (In Russian)
17. Shorokhova A. V., Novichikhin A. V. (2016) Sotsial'no-ekologicheskaya bezopasnost' gornopromyshlennykh rayonov: razrabotka i konkretizatsiya organizatsionno-tekhnologicheskogo mekhanizma upravleniya [Socio-ecological safety of mining regions: development and specification of the organizational and technological mechanism of management]. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya [Economics and Management of Control Systems]*, no. 4.1 (22), pp. 194–200 (In Russian)
18. Shepvalov Y. N. (2006) Nekotoryye algebraicheskiye aspekty metoda sistemnogo analiza v obshchey teorii slozhnykh mekhanicheskikh sistem [Some algebraic aspects of the system analysis method in the general theory of complex mechanical systems]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematika. Fizika. Khimiya [Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematics. Physics. Chemistry]*, no 7, pp. 164–175 (In Russian)
19. Mesarovic M., Takahara Y. (1975) General systems theory: mathematical foundations. Elsevier Science Publ. Mesarovic M., Takahara Y. *Obshchaya teoriya sistem: matematicheskiye osnovy*. Moscow, Mir Publ., 1978, p. 311.
20. Bratishchev A., Batishcheva G., Denisov M., Zhuravleva M. (2020) Bifurcation analysis and synergetic control of a dynamic system with several parameters. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1095, pp. 639–646.
21. Romanenko V. E., Yarkin E. K., Mokhov V. A. (2019) System analysis and the task of ontological modeling of multimodal transportation. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 272 (2019) 022231. DOI:10.1088/1755-1315/272/2/022231.

УДК 625.71:625.72

В. Н. Мячин, д-р техн. наук

К. С. Боровикова

Д. П. Кривцов

*Научно-исследовательский и проектный институт территориального развития
и транспортной инфраструктуры (ООО «НИПИ ТРТИ»)*

ОСОБЕННОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ГРАФА ДОРОГ В ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ

Построение транспортных моделей — актуальный инструмент решения различных транспортных проблем. В статье рассмотрен один из важных этапов создания транспортной модели — построение графа улично-дорожной сети. Представлены примеры разработанных авторами графов улично-дорожной сети городов. Особое внимание уделено особенностям классификации дорог при разработке графа. Проведен анализ нормативных документов, в соответствии с которыми присваивается класс дорогам и улицам в РФ. Предложены три способа разработки графа улично-дорожной сети. Более подробно излагаются способы построения графа с использованием данных об улично-дорожной сети из открытого картографического источника OSM. Обозначены основные проблемы применения каждого из способов. Главной проблемой названо несоответствие классификации автомобильных дорог из OSM с принятой в нормативной документации классификацией дорог РФ. Даны варианты упрощения построения графа улично-дорожной сети в транспортной модели.

Транспортное моделирование, улично-дорожная сеть, граф улично-дорожной сети, классификация улично-дорожной сети

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-268-283

Введение

В наше время актуальность проблем, связанных с автомобильным транспортом, неоспорима. Развитие улично-дорожной сети (УДС) не соответствует постоянно увеличивающемуся уровню автомобилизации страны, опорная сеть дорог федерального значения не до конца сформирована, не все сельские населенные пункты связаны дорогами с твердым покрытием с сетью путей сообщения общего пользования и др. [1]. Ошибки в проектировании объектов транспортной инфраструктуры, разработке транспортных моделей, прогнозировании транспортных, пассажирских потоков приводят не только к экономическим потерям, но и к социальным [2]. Если дорога строится на основе ошибочно заложенных проектных решений, общество получает новую автомобильную связь, не отвечающую требованиям транспортного спроса. Потраченные средства на строительство магистрали не приводят к улучшению на загруженных участках УДС и не снижают заторы.

Единиц автотранспорта с каждым годом всё больше, вследствие чего усиливается негативное влияние на окружающую среду из-за вредных выбросов в атмосферу, повышенного уровня шума [3–9].

Возникает необходимость в разработке и обосновании новых проектов в сфере дорожного движения.

Для решения вышеуказанных проблем все чаще применяется транспортное моделирование. Оно является обязательным условием при разработке документов транспортного планирования (программы комплексного развития транспортной инфраструктуры, комплексные схемы организации транспортного обслуживания населения, комплексные схемы организации дорожного движения, проекты организации дорожного движения) [10–14].

Транспортная модель — основанное на компьютерных расчетах представление перемещений людей и товаров по транспортной сети в заданных границах изучаемой области, которая обладает определенными социально-экономическими характеристиками и землепользованием [15, 16]. Понятие транспортной модели, их разновидности, особенности и способы построения описаны в статьях зарубежных авторов [17–19].

Один из первых и важных этапов создания транспортной модели — разработка графа УДС [20, 21]. Он представляет собой математическое описание улично-дорожной сети рассматриваемой зоны и является основой для расчетов, построения маршрутов, анализа дорожной обстановки и решения транспортных задач [22].

В статье поставлены и решены следующие задачи:

- выявление и анализ особенностей классификации УДС при разработке графа автомобильных дорог в соответствии с нормативными документами, принятыми в РФ [16–18], и на основе данных о классификации автомобильных дорог из открытого картографического источника OSM (Open Street Map);
- определение достоинств и недостатков разных способов разработки графа УДС;
- формулировка рекомендаций по упрощению построения графа УДС.

1. Графы улично-дорожной сети

Граф УДС состоит из отрезков (участки дорог и улиц) и узлов (перекрестков). Для каждого отрезка с учетом направления движения задаются параметры: разрешенные для движения виды транспорта, количество полос движения, пропускная способность, максимально допустимая скорость и пр. [23, 24]. Для каждого узла задаются разрешенные маневры на полосах движения, задержки на поворотах, пропускная способность на поворотах, разрешенные для движения виды транспорта. Примеры разработанных авторами графов улично-дорожной сети городов представлены на рис. 1–3.

Для разработки графа УДС используются следующие способы:

- ручной;
- автоматизированный;
- комбинированный.

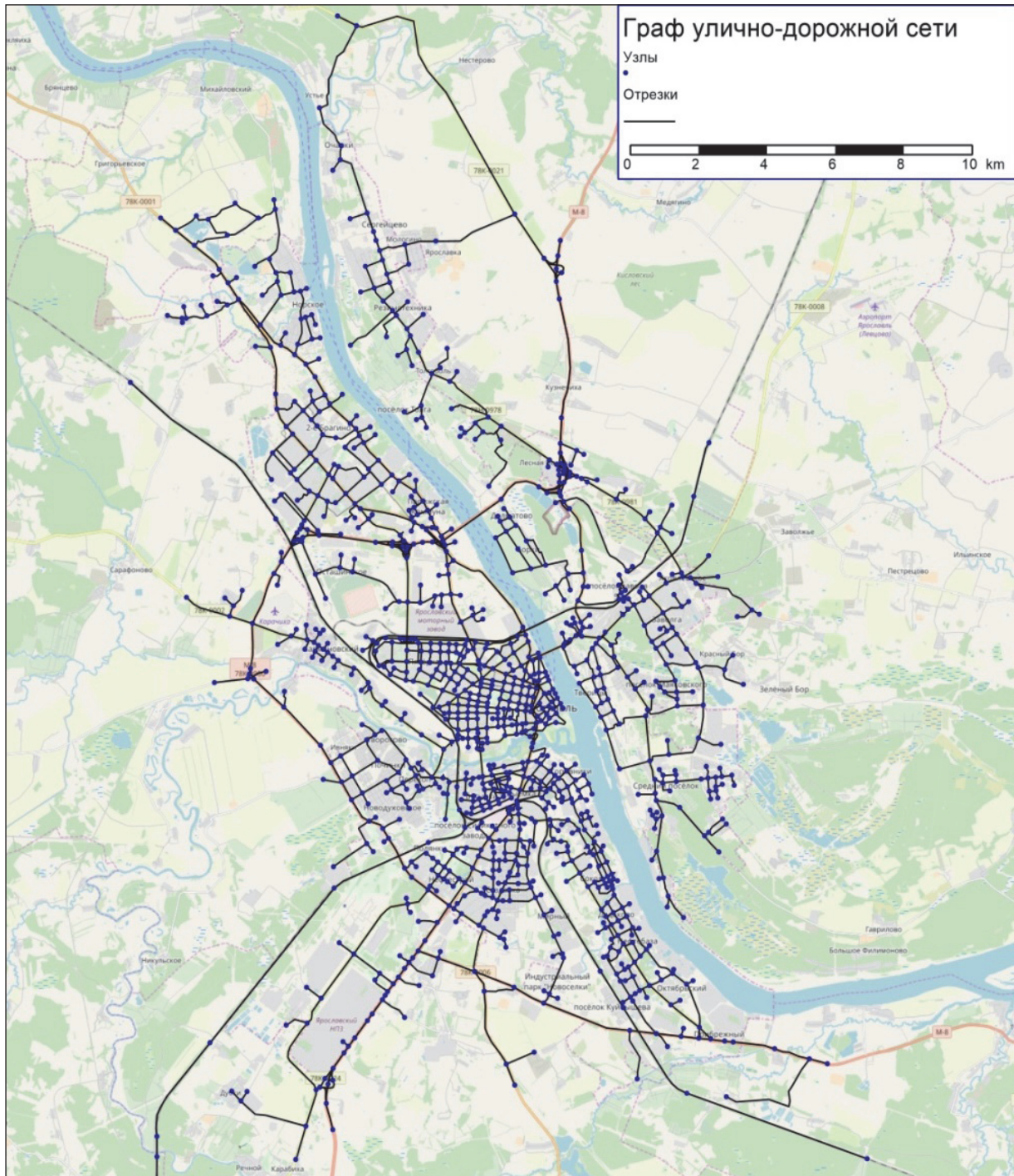


Рис. 1. Граф УДС Ярославля

2. Классификация автомобильных дорог РФ

При разработке графа УДС важным аспектом становится назначение класса автомобильной дороги. Выбор класса определяет такие параметры дороги, как пропускная способность, скоростной режим движения и др. Эти параметры влияют на результаты расчетов прогнозируемой интенсивности движения.

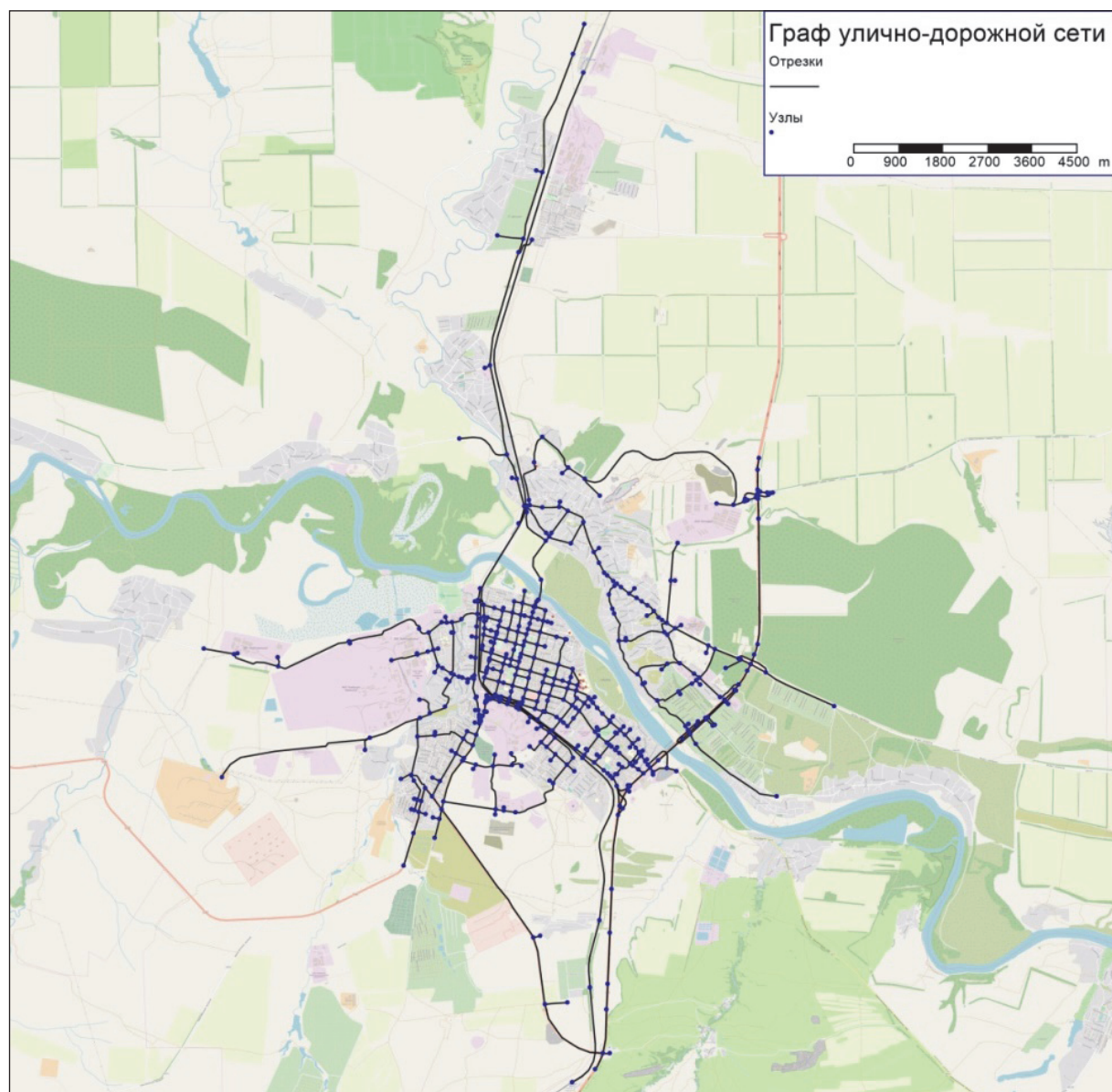


Рис. 2. Граф УДС Каменск-Шахтинского

В РФ классификация и категория автомобильных дорог и улиц принимается в соответствии с нормативными документами.

1. ГОСТ Р 52398–2005 «Классификация автомобильных дорог. Основные параметры и требования», 2006 [25].

Перечислены следующие классы автодорог:

- автомагистраль (IA);
- скоростная дорога (IB);
- дорога обычного типа (нескоростная дорога: IB, II, III, IV).

Для каждого класса автомобильных дорог приводятся технические характеристики:

- категория автомобильной дороги;

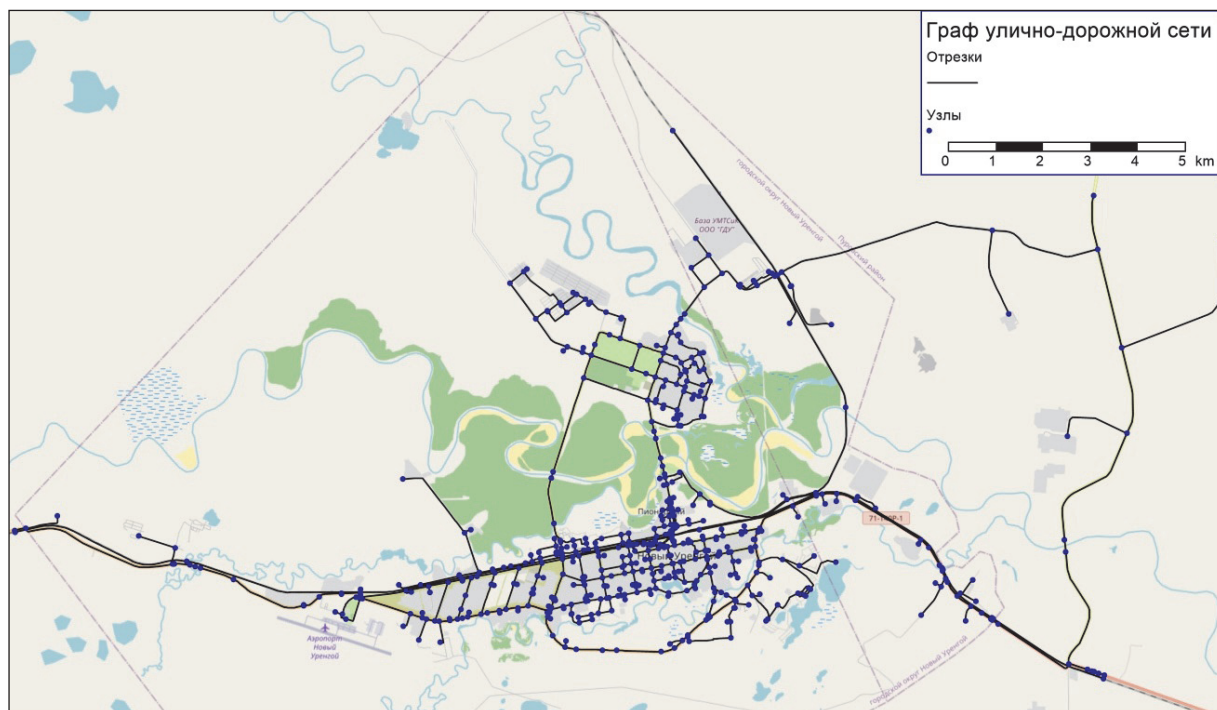


Рис. 3. Граф УДС Нового Уренгоя

- общее количество полос движения;
 - ширина полосы движения, м;
 - центральная разделительная полоса;
 - пересечения с автомобильными дорогами, велосипедными и пешеходными дорожками;
 - пересечения с железными дорогами и трамвайными путями;
 - доступ на дорогу с примыкания в одном уровне.
2. СП 34.13330.2012 «Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02–85*», 2013 [26].

Все автомобильные дороги подразделяются на шесть категорий: IA, IB, IB, II, III, IV.

В СП 34.13330.2012 отражены параметры элементов автодороги в зависимости от ее категории:

- общее число полос движения, шт.;
- ширина полосы движения, м;
- ширина обочины, м;
- ширина разделительной полосы, м;
- пересечение с автодорогами;
- пересечение с железными дорогами;
- доступ к дороге с примыкающей дороги в одном уровне.

В указанных нормативных документах подробно описаны параметры элементов внегородских автомобильных дорог. Городские дороги и улицы рас-

смаатриваются в документе СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» [27]. Приведены категории дорог и улиц крупнейших, крупных и больших городов.

- Магистральные городские дороги:
 - 1-го класса — скоростного движения;
 - 2-го класса — регулируемого движения.
- Магистральные улицы общегородского значения:
 - 1-го класса — непрерывного движения;
 - 2-го класса — регулируемого движения;
 - 3-го класса — регулируемого движения.
- Магистральные улицы районного значения.
- Улицы и дороги местного значения:
 - улицы в зонах жилой застройки;
 - улицы в общественно-деловых и торговых зонах;
 - улицы и дороги в производственных зонах.
- Пешеходные улицы и площади.

Категорийность для средних и малых городов отличается тем, что городские дороги, улицы общегородского и районного значения не подразделяются на классы.

В СП 42.13330.2016 основное назначение дорог и улиц населенных пунктов дано в форме текстового описания, что позволяет интерпретировать каждую категорию.

Также содержатся такие основные параметры, как:

- расчетная скорость движения, км/ч;
- ширина полосы движения, м;
- число полос движения (суммарно в двух направлениях);
- наименьший радиус кривых в плане с виражом/без виража, м;
- наибольший продольный уклон, ‰;
- наименьший радиус вертикальной выпуклой кривой, м;
- наименьший радиус вертикальной вогнутой кривой, м;
- наименьшая ширина пешеходной части тротуара, м.

Многие категории в СП 42.13330.2016 отличаются друг от друга по расчетной скорости движения, при том что некоторые другие совпадают, например количество полос движения, ширина полосы. В условиях города, где разрешенная скорость не превышает 60 км/ч, на всех дорогах скорость движения одинаковая; могут совпадать и иные параметры. В таком случае неясно, к какой категории относится конкретная дорога.

Это может привести к неверному назначению категорий городских дорог и улиц, а затем к ошибкам при разработке транспортных моделей. Такой важный параметр, как пропускная способность автомобильной дороги, определяется неверно, что влечет за собой некорректное моделирование и расчет транспортных потоков [28, 29].

3. Разработка графа улично-дорожной сети и классификация улиц и дорог

При ручном способе разработки графа все параметры УДС задаются транспортным инженером с нуля, что не исключает влияния человеческого фактора и ведет к высоким трудозатратам. При таком способе разработки графа класс автомобильной дороги задается в соответствии с классификацией, представленной в нормативных документах РФ. При описанных выше проблемах класс может быть присвоен неверно.

При автоматизированном способе уже готовая сеть УДС загружается в программное обеспечение из открытых картографических источников [30, 31]. Пример экспортирования улично-дорожной сети города из открытого картографического источника OSM и дальнейшего импорта в специализированное ПО для моделирования транспортных потоков представлен на рис. 4–5. Базу данных OSM можно применять для упрощения такого этапа моделирования, как разработка графа УДС.

Комбинированный способ сочетает характеристики двух способов разработки графа: сеть загружается из открытых картографических источников и корректируется, дополняется вручную. Налицо плюсы ручного и автоматизированного способов разработки.

Комбинированный способ в разы быстрее.

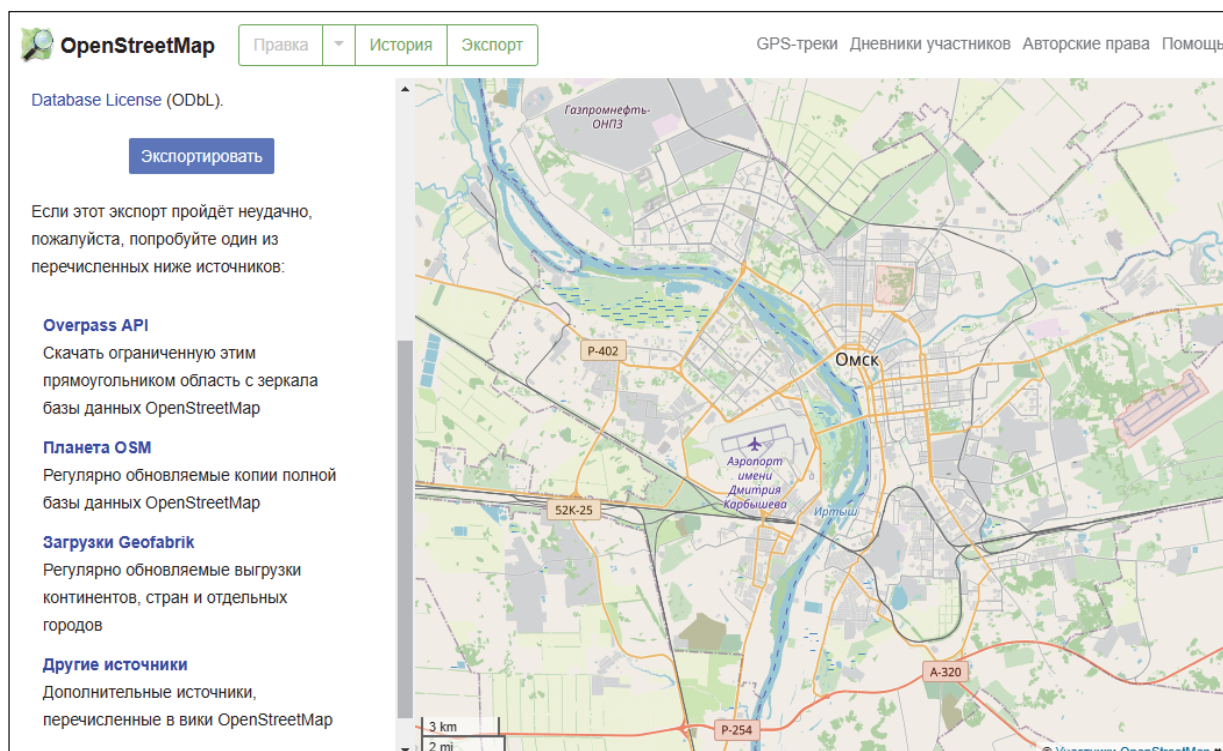


Рис. 4. Экспорт УДС Омска из OSM

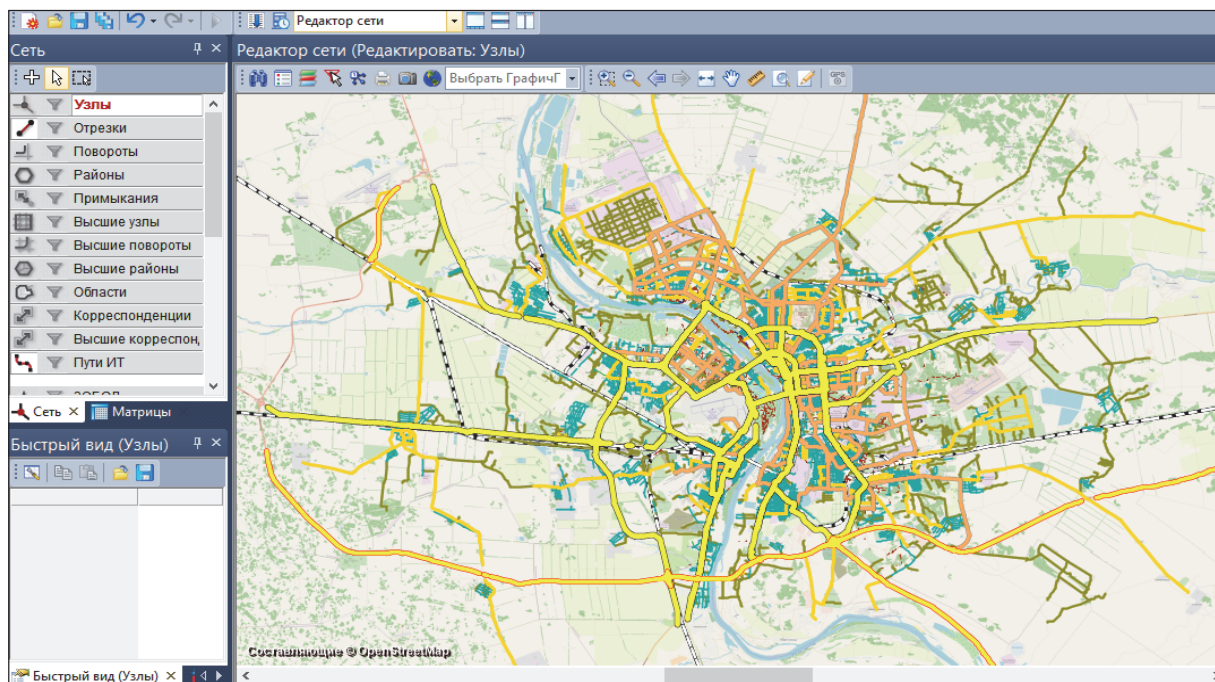


Рис. 5. Импорт УДС Омска в специализированное ПО для моделирования транспортных потоков

Причины сокращения временных затрат:

— импорт рассматриваемой зоны УДС в программное обеспечение занимает около часа (этап включает в себя выбор необходимой зоны для импортирования, сам импорт и временной запас на выполнение непредвиденных задач в связи с возникновением ошибок/неточностей);

— дальнейшая корректировка и уточнение данных занимают в среднем от двух до четырех недель (в зависимости от размера моделируемой территории), что превосходит по скорости ручной способ разработки графа.

Сравнить между собой способы разработки графа улично-дорожной сети поможет таблица.

Для реализации автоматизированного способа разработки графа сеть УДС может быть загружена из картографического сервиса с открытым предоставлением данных Open Street Map. Ниже представлены картографические классы в формате OSM:

1. Motorway (шоссе);
2. Trunk (магистраль);
3. Primary (первичный);
4. Secondary (вторичный);
5. Tertiary (третичный);
6. Residential (селитебный);
7. Service (обслуживающий);
8. Living street (жилые улицы).

Таблица 1. Достоинства и недостатки различных способов разработки графа УДС

| Способ разработки графа УДС | Плюсы | Минусы |
|-----------------------------|---|---|
| Ручной | Класс задается в соответствии с нормативными документами, принятыми в РФ | Человеческий фактор |
| | Выбирается нужная детализация УДС | Высокие временные и трудовые затраты |
| Автоматизированный | Исключен человеческий фактор при назначении класса | Класс задается в соответствии с классификацией, принятой в открытом картографическом источнике и отличающейся от принятой в РФ |
| | Наименьшие временные и трудовые затраты | Нет возможности выбрать нужную детализацию УДС |
| Комбинированный | Оптимальное соотношение затраченного на разработку времени и полученного результата | Класс задается в соответствии с классификацией, принятой в открытом картографическом источнике, с дальнейшим переходом к классификации, принятой в РФ |
| | Нужная детализация УДС задается в процессе корректировки загруженной сети | |

Эта классификация отличается от принятой в РФ прежде всего тем, что в ее основе лежат не технические характеристики, а относительная важность дорог в УДС [32].

Например, класс primary включает автомобильные дороги регионального значения, соединяющие крупные города и/или областные центры, и дороги межрегионального значения. Если опираться на классификацию, описанную в нормативных документах РФ, данному классу могут соответствовать магистральные улицы городского значения непрерывного движения, магистральные улицы городского значения регулируемого движения, а также внегородские дороги.

Заключение

Сегодня не существует метода разработки графа улично-дорожной сети, который полностью исключал бы ошибки, вызванные влиянием человеческого фактора при минимальных временных затратах. Оптимальным является ком-

бинированный метод. Он осуществляется с меньшими затратами времени, чем ручной способ, но с большими, чем автоматизированный. В отличие от автоматизированного метода, назначение классов дорог производится согласно нормативной документации РФ, что опять же не исключает человеческого фактора.

В дальнейшем рациональным был бы полный переход к автоматизированному способу. Для этого нужно разработать метод автоматизированного перехода от классификации автомобильных дорог из OSM к принятой в нормативной документации РФ.

Необходимо упростить классификацию городских улиц и дорог в нормативных документах, сократив количество классов. Модернизированные документы будут удовлетворять потребностям транспортного моделирования, что значительно упростит и ускорит разработку транспортных моделей.

Возможны и альтернативные варианты. Это методика выявления соответствий параметров дорог для перехода от классификации из OSM к принятой в РФ. А также создание российской геоинформационной системы, аналога OSM, в которой будет использоваться классификация автомобильных дорог в соответствии с отечественными нормативными документами.

Библиографический список

1. Шуравина Е. Н. Проблемы современной транспортной системы России // Вестник Самарского государственного университета. – 2011. – № 9 (90). – С. 58–62.
2. Philippe Y. R. Sohounou, Panayotis Christidis, Aris Christodoulou, Luis A. C. Neves, Davide Lo Presti. Using a random road graph model to understand road networks robustness to link failures. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. June, 2020.
3. Филиппова Р. В. Влияние автомобильного транспорта на изменение климата, экологию городов и здоровье населения // Перспективы развития транспортного комплекса: сб. трудов конференции. – Минск: БелНИИТ Транстехника, 2017. – С. 211–215.
4. Изменение климата и здоровье [Электронный ресурс]: инф. бюлл. ВОЗ, № 266 2016. Режим доступа: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs266/ru/> (дата обращения: 25.05.2020).
5. Давыдов М. В. Проблемы обеспечения безопасности движения пешеходов // Управление деятельностью по обеспечению безопасности дорожного движения: состояние, проблемы, пути совершенствования: журнал, № 1 (1); ОпЮИ МВД России имени В. В. Лукьянова. – 2018. – С. 142–147.
6. Гусев Е. С. Моделирование транспортных сетей как способ оптимизации улично-дорожного движения // Научный аспект. – 2013. – № 4. – С. 164–167.
7. Горюшинский В. С., Черникова И. Е., Милосердова И. С. Основные факторы и причины, влияющие на динамику аварийности на автомобильном транспорте // Современные научные исследования и разработки. – 2018. – № 12 (29). – С. 258–261.
8. Лазарев Ю. Г. Показатели обеспечения безопасности транспортных систем в интересах реальной экономики // СПбГЭУ. – 2018. – № 1 (43). – С. 61–65.
9. Liang Chen, Bin Sun, Haibo Wang, Qiaoru Li, Le Hu, Zixuan Chen. Forecast and control of traffic noise based on improved UE model during road network design. *Applied Acoustics*, 15 December 2020.

10. Правила подготовки документации по организации дорожного движения: утв. приказом Минтранса России от 26 декабря 2018 г. № 480.
11. Постановление Правительства РФ от 25 декабря 2015 г. № 1440 «Об утверждении требований к программам комплексного развития транспортной инфраструктуры поселений, городских округов».
12. Об утверждении Методики отбора проектов строительства (реконструкции) автомобильных дорог (участков автомобильных дорог и (или) искусственных дорожных сооружений), реализуемых субъектами Российской Федерации в рамках концессионных соглашений, для предоставления иных межбюджетных трансфертов в целях достижения целевых показателей региональных программ в сфере дорожного хозяйства, предусматривающих реализацию указанных проектов: утв. приказом от 01 августа 2016 года № 221.
13. Методические рекомендации по разработке документов транспортного планирования субъектов Российской Федерации: утв. протоколом заседания рабочей группы проектного комитета по национальному проекту «Безопасные и качественные автомобильные дороги» от 12.08.2019 № ИА-63.
14. Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения «Использование программных продуктов математического моделирования транспортных потоков при оценке эффективности проектных решений в сфере организации дорожного движения» от 13.07.2017.
15. Руководство по применению транспортных моделей в транспортном планировании и оценке проектов. – СПб.: ООО «Издательско-полиграфическая компания “КОСТА”», 2016. – 128 с. (Серия «Библиотека транспортного инженера»).
16. Старцева А. А., Милина М. Ю., Тарусова М. С., Васильева В. В. Моделирование транспортной ситуации с помощью пакета программ PTV VISUM // Современные материалы, техника и технология: сб. науч. статей 9-й Международной научно-практической конференции (в 2 т.); под ред. А. А. Горохова. – ЮЗГУ. – 2019. – С. 271–275.
17. Algers, S., Daly, A. J., Kjellman, P. and Widlert, S. (1995) Stockholm model system: application. 7th World Conference on Transport Research, Sydney, July 1995, Australia.
18. Bates J. J., Gunn H. F. and Roberts M. (1978) A model of household car ownership. *Traffic Engineering and Control* 19, pp. 486–491, 562–566.
19. Bowman J. L. and Ben-Akiva M. E. (2001) Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules. *Transportation Research* 35A, pp. 1–28.
20. Основы транспортного моделирования: практическое пособие / А. Э. Горев, К. Бёттгер, А. В. Прохоров, Р. Р. Гизатуллин (серия «Библиотека транспортного инженера»). – СПб.: ООО «Издательско-полиграфическая компания “КОСТА”», 2015. – 168 с., ил.
21. Сапрыкин О. Н., Сапрыкина О. В., Щербаков О. Д. Автоматизированная система построения графа улично-дорожной сети // Транспортные и логистические системы: проблемы и перспективы развития: сб. науч. статей под редакцией Т. И. Михеевой. – СГАУ. – 2014. – С. 109–112.
22. Braess D., Nagurney A. and Wakolbinger T. (2005) On a paradox of traffic planning. *Transportation Science* 39. – Pp. 446–450.
23. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов: монография / М. Р. Якимов. – М.: Логос, 2013. – 188 с.
24. *Modelling transport*, Fourth Edition. Juan de Dios Ortuzar, Luis G. Willumsen. John Wiley and Sons, Ltd., Published 2011 by John Wiley and Sons, Ltd.
25. ГОСТ Р 52398–2005 Классификация автомобильных дорог. Основные параметры и требования, 2006.

26. СП 34.13330.2012 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02–85*, 2013.
27. СП 42.13330.2016 Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений, 2016.
28. Highway Capacity Manual 2000. – Transportation Research Board, National Research Council. – Washington, D. C., USA, 2000. – 1134 p.
29. Junqing Shi, Linwu Chen, Fengxiang Qiao, Lei Yu, Qing Li, Guilian Fan. Simulation and analysis of the carrying capacity for road networks using a grid-based approach. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), vol. 7, issue 4, August 2020. – Pp. 498–506.
30. Баранов Д. А. Получение данных об улично-дорожной сети из открытых источников // Транспортное планирование и моделирование: сб. тр. IV Международной научно-практической конференции [11–12 апреля 2019 г.]. – СПбГАСУ. – 2019. – С. 10–18.
31. Farhad Ahmadzai, K. M. Lakshmana Rao, Shahzada Ulfat. Assessment and modelling of urban road networks using Integrated Graph of Natural Road Network (a GIS-based approach). Journal of Urban Management, Issue 1, April 2019. – Pp. 109–125.
32. RU: Highway classification [Электронный ресурс]: OpenStreetMap Wiki. 2020. №266. Режим доступа: https://wiki.openstreetmap.org/wiki/RU:Highway_classification (дата обращения: 27.05.2020).

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Ефановым Д. В.
Поступила в редакцию 10.09.2020, принята к публикации 10.02.21*

МЯЧИН Валерий Николаевич — доктор технических наук, профессор, генеральный директор Научно-исследовательского и проектного института территориального развития и транспортной инфраструктуры (ООО «НИПИ ТРТИ») vmyachin@ipr.ru

БОРОВИКОВА Ксения Сергеевна — магистрант, инженер 1 категории Научно-исследовательского и проектного института территориального развития и транспортной инфраструктуры (ООО «НИПИ ТРТИ») kborovikova@ipr.ru

КРИВЦОВ Дмитрий Петрович — руководитель проектного направления транспортного моделирования, прогнозирования и организации дорожного движения Научно-исследовательского и проектного института территориального развития и транспортной инфраструктуры (ООО «НИПИ ТРТИ») dkrivtsov@ipr.ru

© Мячин В. Н., Боровикова К. С., Кривцов Д. П., 2021

V. N. Myachin, Dr. Sci. in Engineering
K. S. Borovikova
D. P. Krivtsov

*Research and Design Institute for Territorial Development and Transport Infrastructure
(LLC "NIPI TRTI")*

FEATURES OF THE CLASSIFICATION OF THE STREET-ROAD NETWORK WHEN CONSTRUCTING THE ROAD GRAPH IN THE TRANSPORT MODEL

Constructing transport models is a relevant tool for solving various transport problems. The article discusses one of the important stages of creating a transport model — building a graph of a street-road network. The examples of the graphs of the street-road network of cities developed by the authors are presented. Special attention is paid to the features of road classification when developing a graph. The analysis of normative documents, in accordance with which a class is assigned to roads and streets in the Russian Federation, is carried out. Three ways of developing a road network graph are proposed. Methods for constructing a graph using data on the street-road network from the open cartographic source OSM are described in more detail. The main problems of applying each of the methods are outlined. The main problem is the discrepancy between the classification of roads from the OSM and the classification of roads of the Russian Federation adopted in the regulatory documents. Variants of simplifying the construction of the road network graph in the transport model are suggested.

Traffic modeling, road network, road network graph, road network classification

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-268-283

References

1. Shuravina E. N. (2011) Problemy sovremennoy transportnoy sistemy Rossii [Problems of the modern transport system of Russia]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Samara State University], no. 9 (90), pp. 58–62. (In Russian)
2. Sohounou Philippe Y. R., Christidis Panayotis, Christodoulou Aris, Neves Luis A. C., Lo Presti Davide (2020). Using a random road graph model to understand road networks robustness to link failures. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, June.
3. Filippova R. V. (2017) Vliyaniye avtomobil'nogo transporta na izmeneniye klimata, eko-logiyu gorodov i zdorov'ye naseleniya [Influence of automobile transport on climate change, urban ecology and population health]. *Perspektivy razvitiya transportnogo kompleksa: sb. trudov konferentsii* [Prospects for the development of the transport complex: conference proceedings]. BelNIIT Transtekhnika [Belarusian Research Institute of Transport "Transtekhnika"]. Minsk, pp. 211–215. (In Russian)
4. *Izmeneniye klimata i zdorov'ye: inf. byul. Vsemir. org. zdavookhraneniya* [Climate Change and Health: Fact Sheet of World Health Organization], № 266, 2016. URL: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs266/ru/> (accessed: May 25, 2020). (In Russian)
5. Davydov M. V. (2018) Problemy obespecheniya bezopasnosti dvizheniya peshekhodov [Problems of ensuring pedestrian traffic safety]. *Upravleniye deyatel'nost'yu po obespecheniyu bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya: sostoyaniye, problemy, puti sovershenstvovaniya* [Management of activities to ensure road safety: state, problems, ways of improvement], no. 1 (1);

- OrYUI MVD Rossii imeni V. V. Luk'yanova [Oryol Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation named after V. V. Luk'yanov], pp. 142–147. (In Russian)
6. Gusev E. S. (2013) Modelirovaniye transportnykh setey kak sposob optimizatsii ulichno-dorozhnogo dvizheniya [Modeling of transport networks as a way to optimize road traffic]. *Nauchnyy aspekt [Scientific aspect]*, no. 4, pp. 164–167. (In Russian)
 7. Goryushinskiy V. S., Chernikova I. E., Miloserdova I. S. (2018) Osnovnyye faktory i prichiny, vliyayushchiye na dinamiku avariynosti na avtomobil'nom transporte [The main factors and causes affecting the dynamics of road transport accidents]. *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i razrabotki [Modern research and development]*, no. 12 (29), pp. 258–261. (In Russian)
 8. Lazarev Yu. G. (2018) Pokazateli obespecheniya bezopasnosti transportnykh sistem v interesakh real'noy ekonomiki [Indicators of ensuring the safety of transport systems to the benefit of the real economy]. *SPbGEU [Saint Petersburg State University of Economics]*, no. 1 (43), pp. 61–65. (In Russian)
 9. Liang Chen, Bin Sun, Haibo Wang, Qiaoru Li, Le Hu, Zixuan Chen (2020). Forecast and control of traffic noise based on improved UE model during road network design. *Applied Acoustics*, 15 December.
 10. *Pravila podgotovki dokumentatsii po organizatsii dorozhnogo dvizheniya: utv. prikazom Mintransa Rossii ot 26 dekabrya 2018 g. [Rules for the preparation of documentation on the organization of traffic: approved. by order of the Ministry of Transport of Russia dated December 26, 2018]. № 480. (In Russian)*
 11. *Postanovleniye Pravitel'stva RF ot 25 dekabrya 2015 g. № 1440 «Ob utverzhdenii trebovaniy k programmam kompleksnogo razvitiya transportnoy infrastruktury poseleniy, gorodskikh okrugov» [Decree of the Government of the Russian Federation of December 25, 2015 No. 1440 “On approval of requirements for programs for the integrated development of transport infrastructure of settlements, urban districts”]. (In Russian)*
 12. *Ob utverzhdenii Metodiki otbora proyektov stroitel'stva (rekonstruktsii) avto-mobil'nykh dorog (uchastkov avtomobil'nykh dorog i (ili) iskusstvennykh dorozhnykh sooru-zheniy), realizuyemykh sub'yektami Rossiyskoy Federatsii v ramkakh kontsessionnykh soglashe-niy, dlya predostavleniya inykh mezhibyudzhethnykh transfertov v tselyakh dostizheniya tselevykh pokazateley regional'nykh programm v sfere dorozhnogo khozyaystva, predusmatrivayushchikh realizatsiyu ukazannykh proyektov: utv. prikazom ot 01 avgusta 2016 goda № 221 [On approval of the Methodology for the selection of projects for the construction (reconstruction) of auto-mobile roads (sections of highways and (or) artificial road structures), implemented by the constituent entities of the Russian Federation within the framework of concession agreements, for the provision of other interbudgetary transfers in order to achieve the target indicators of regional programs in the field of road facilities, providing for the implementation of these projects: approved. by order of August 01, 2016 No. 221]. (In Russian)*
 13. *Metodicheskiye rekomendatsii po razrabotke dokumentov transportnogo planirovaniya sub'yektov Rossiyskoy Federatsii: utv. protokolom zasedaniya rabochey gruppy proyekt-nogo komiteta po natsional'nomu projektu «Bezopasnyye i kachestvennyye avtomobil'nyye dorogi» ot 12.08.2019 № IA–63 [Guidelines for the development of transport planning documents for the constituent entities of the Russian Federation: approved. minutes of the meeting of the working group of the project committee on the national project “Safe and high-quality roads” dated 12.08.2019 No. IA-63]. (In Russian)*
 14. *Metodicheskiye rekomendatsii po razrabotke i realizatsii meropriyatiy po organizatsii dorozhnogo dvizheniya «Ispol'zovaniye programmnykh produktov matematicheskogo mo-*

- delirovaniya transportnykh potokov pri otsenke effektivnosti proyektnykh resheniy v sfere organizatsii dorozhnogo dvizheniya»* ot 13.07 2017 [*Methodological recommendations for the development and implementation of measures for the organization of traffic “Use of software products for mathematical modeling of traffic flows in assessing the effectiveness of design solutions in the field of traffic management”* dated July 13, 2017]. (In Russian)
15. *Rukovodstvo po primeneniyu transportnykh modeley v transportnom planirovani i otsenke projektov* [Guidance on the application of transport models in transport planning and project evaluation]. Saint Petersburg, ООО «Izdatel'sko-poligraficheskaya kompaniya “KOSTA”» [LLC “Publishing and Printing Company “KOSTA””], 2016, 128 p. (Seriya «Biblioteka transportnogo inzhenera») [(Series “Library of Transport Engineers”)]. (In Russian)
 16. Startseva A. A., Milina M. Yu., Tarusova M. S., Vasil'yeva V. V. (2019) Modelirovaniye transportnoy situatsii s pomoshch'yu paketa programm PTV VISUM [Modeling the transport situation using the PTV VISUM software package]. *Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologiya: sb. nauch. statey 9-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konfe-rentsii (v 2-kh tomakh)* pod redaktsiyey A. A. Gorokhova [Modern materials, equipment and technology: Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference (in 2 volumes), ed. by A. A. Gorokhov], pp. 271–275. (In Russian)
 17. Algers S., Daly A. J., Kjellman P., Widlert S. (1995) Stockholm model system: application. *7th World Conference on Transport Research*, Sydney, July 1995, Australia.
 18. Bates J. J., Gumn H. F., Roberts M. (1978) A model of household car ownership. *Traffic Engineering and Control*, 19, pp. 486–491, 562–566.
 19. Bowman J. L., Ben-Akiva M. E. (2001) Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules. *Transportation Research*, 35A, pp. 1–28.
 20. Gorev A. E., Böttger K., Prokhorov A. V., Gizatullin R. R. (2015) *Osnovy transportnogo modelirovaniya: Prakticheskoye posobiye* (seriya «Biblioteka transportnogo inzhenera») [Basics of transport modeling: A practical guide (series “Library of transport engineers”)]. Saint Petersburg, ООО «Izdatel'sko-poligraficheskaya kompaniya “KOSTA”» [LLC “Publishing and Printing Company “KOSTA””], 168 p., ill. (In Russian)
 21. Saprykin O. N., Saprykina O. V., Shcherbakov O. D. (2014) Avtomatizirovannaya sistema postroyeniya grafa ulichno-dorozhnoy seti [Automated system for constructing a graph of a street-road network]. *Transportnyye i logisticheskiye sistemy: proble-my i perspektivy razvitiya: sb. nauch. statey pod redaktsiyey T. I. Mikheyevoy* [Transport and logistics systems: problems and development prospects: a collection of scientific articles, ed. by T. I. Mikheeva], pp. 109–112. (In Russian)
 22. Braess, D., Nagurney, A., Wakolbinger, T. (2005) On a paradox of traffic planning. *Transportation Science*, 39, pp. 446–450.
 23. Yakimov M. R. (2013) *Transportnoye planirovaniye: sozdaniye transportnykh modeley gorodov* [Transport planning: creating transport models of cities]. Moscow, Logos Publ., 188 p. (In Russian)
 24. Juan de Dios Ortuzar, Luis G. Willumsen (2011). *Modelling transport*. 4th ed. John Wiley and Sons, Ltd. Publ.
 25. *GOST R 52398–2005 Klassifikatsiya avtomobil'nykh dorog. Osnovnyye parametry i trebovaniya*, 2006 [GOST R 52398–2005 Classification of highways. Basic parameters and requirements, 2006]. (In Russian)
 26. *SP 34.13330.2012 Avtomobil'nyye dorogi. Aktualizirovannaya redaktsiya SNI P* [SP 34.13330.2012 Automobile roads. Updated edition of Building regulations], 2.05.02–85*, 2013. (In Russian)

27. SP 42.13330.2016 *Gradostroitel'stvo. Planirovka i zastroyka gorodskikh i sel'skikh poseleniy* [SP 42.13330.2016 *Urban planning. Planning and development of urban and rural settlements*], 2016. (In Russian)
28. *Highway Capacity Manual* (2000). Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D. C., USA, 1134 p.
29. Junqing Shi, Linwu Chen, Fengxiang Qiao, Lei Yu, Qing Li, Guilian Fan (2020). Simulation and analysis of the carrying capacity for road networks using a grid-based approach. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 7, iss 4, August, pp. 498–506.
30. Baranov D. A. (2019) Polucheniye dannykh ob ulichno-dorozhnoy seti iz otkrytykh istochnikov [Obtaining data on the street-road network from open sources]. *Transportnoye planirovaniye i modelirovaniye: sb. tr. IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* (11–12 aprelya 2019 g.) [*Transport planning and modeling: Proceedings of IV International Scientific and Practical Conference* (April 11–12, 2019)], pp. 10–18. (In Russian)
31. Farhad Ahmadzai, Lakshmana Rao K. M., Shahzada Ulfat (2019). Assessment and modeling of urban road networks using Integrated Graph of Natural Road Network (a GIS-based approach). *Journal of Urban Management*, iss. 1, April. pp. 109–125.
32. RU: Highway classification: OpenStreetMap Wiki. 2020. №266. URL: [https://wiki.openstreetmap.org/wiki/RU: Highway_classification](https://wiki.openstreetmap.org/wiki/RU:Highway_classification) (accessed: May 27, 2020).

УДК 004.052.42+681.518.5

Д. В. Ефанов, д-р техн. наук

*ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга», Санкт-Петербург,
Высшая школа транспорта, Институт машиностроения, материалов и транспорта
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург
Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»,
Российский университет транспорта, Москва*

Г. В. Осадчий

ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга», Санкт-Петербург

М. В. Зуева

ООО «Ф-ЛАЙН СОФТВЕР», Санкт-Петербург

ОСОБЕННОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОШИБОК КОДАМИ С СУММИРОВАНИЕМ ЕДИНИЧНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ РАЗРЯДОВ В КОЛЬЦЕ ВЫЧЕТОВ ПО ЗАДАННОМУ МОДУЛЮ В СХЕМАХ ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЛОГИЧЕСКОГО ДОПОЛНЕНИЯ¹

Анализируются характеристики обнаружения ошибок кодами с суммированием единичных информационных разрядов в кольце вычетов по заданному модулю, проявляющиеся при синтезе схем встроенного контроля по методу логического дополнения. Ошибки, возникающие в кодовых словах модульных кодов с суммированием, могут быть не обнаружены тестером, если они возникают только в информационных векторах и одновременно в информационных и контрольных векторах кодовых слов. Ошибки же, возникающие в контрольных векторах, обнаруживаются всегда. В отличие от предыдущих исследований в данной предметной области, авторы фокусируют внимание на особенностях обнаружения ошибок модульными кодами с суммированием во всех кодовых словах, а не только в информационных векторах. Установлены ранее неизвестные свойства обнаружения ошибок модульными кодами с суммированием с классификацией их по видам (монотонные, симметричные и асимметричные ошибки) и кратностям. Приводятся каталоги подробных характеристик модульных кодов с суммированием. Описаны ключевые закономерности, присущие данному классу кодов. Результаты исследования могут использоваться при организации схем встроенного контроля по методу логического дополнения, при решении других задач технической диагностики, где важно знать свойства обнаружения ошибок в кодовых словах, а также задач защиты и передачи данных.

Схема встроенного контроля, рабочее диагностирование, метод логического дополнения, код с суммированием, код Бергера, модульный код с суммированием, обнаружение ошибок, необнаруживаемая ошибка, контроль ошибок

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-284-314

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта № МД-2533.2021.4 Президента Российской Федерации.

Введение

При решении задач синтеза вычислительных систем и устройств с обнаружением неисправностей широко применяются методы теории информации и кодирования [1–5]. Для наделения какого-либо объекта свойством обнаружения неисправностей практикуется внесение аппаратной или программной избыточности [6].

Часто при реализации отказоустойчивых устройств и систем обращаются к методам кратного резервирования и диверсифицирования, что требует внесения существенной избыточности для получения такого свойства. Как правило, отказоустойчивый объект по показателям структурной избыточности более чем втрое превосходит изначальное устройство [7]. Для реализации блоков с обнаружением неисправностей в процессе их функционирования подходят самопроверяемые схемы встроенного контроля (СВК), реализующиеся с использованием равномерных двоичных избыточных кодов [8]. Для построения в таком случае берут делимые и неделимые двоичные равномерные коды с небольшой избыточностью, что дает возможность реализации устройств с уменьшенной по сравнению с дублированием избыточностью [9].

Вопросам применения двоичных избыточных кодов при организации устройств, наделенных свойством обнаружения неисправностей, посвящена не одна публикация [10–17]. Отдельный круг научных работ содержит результаты исследований характеристик избыточных кодов, пригодных для синтеза отказоустойчивых устройств и устройств с обнаружением неисправностей [18–20].

В статье внимание читателя фокусируется на отдельном классе кодов — кодах с суммированием единичных информационных разрядов в кольце вычетов по заданному модулю (модульных кодов с суммированием, остаточных кодов). Применению таких кодов для синтеза отказоустойчивых устройств и устройств с обнаружением неисправностей посвящено множество публикаций, среди которых [21, 22]. В статьях [23–26] и в монографии [19] анализируются свойства обнаружения ошибок модульными кодами с суммированием только в информационных векторах кодовых слов, что актуально, например, при синтезе СВК логических устройств, а свойства самих кодов определяют и свойства получаемых на их основе структур.

Исследования показывают, что характеристики обнаружения ошибок в информационных векторах кодовых слов напрямую определяют и характеристики СВК, синтезируемых на основе классического метода, подразумевающего дополнение в схеме контроля функций, вычисляемых исходным устройством без использования операций преобразования самих функций (метода вычисления контрольных разрядов) [7, 9, 18–20]. В таком случае одиночный дефект аппаратных средств может приводить только к искажениям в информационных векторах либо только к искажениям в контрольных векторах кодовых слов. Однако в мировой литературе на эту тему [27–30] известен и другой метод, под-

разумевающий именно преобразование всех или части функций в СВК, — метод логического дополнения. Он позволяет строить СВК более гибко, в частности упрощать структуры конечных устройств и процедуры по обеспечению полной их самопроверяемости.

В основном метод логического дополнения исследовался на случай применения неразделимых кодов или класса самодвойственных функций алгебры логики [31–34]. Но в том, что касается синтеза СВК по методу логического дополнения с использованием делимых кодов (тех же модульных кодов с суммированием), одиночный дефект в исходном устройстве может приводить к возникновению искажений как в информационном, так и контрольном векторе кодовых слов. В статье приводятся и обсуждаются результаты проведенных авторами исследований характеристик обнаружения ошибок в кодовых словах модульными кодами с суммированием, для которых при построении использовался модуль $M \in \{2^i\}, i = 1, 2, \dots$.

1. Использование двоичных избыточных кодов при синтезе схем встроенного контроля на основе метода логического дополнения

Одной из первых публикаций по методу логического дополнения следует признать [35], где предложено задействовать схему самодвойственного паритета для синтеза СВК для логических устройств автоматики и вычислительной техники. Большое число работ, например [27–33], освещает результаты применения равновесных кодов при синтезе СВК по методу логического дополнения. О применении при синтезе СВК на основе метода логического дополнения делимых кодов, например, классических кодов Бергера [36], написано не так много работ [37]. Рассмотрим особенности организации СВК по методу логического дополнения до делимых кодов на примере модульных кодов с суммированием. Обозначим их как $SM(m, k)$ -коды, где M — значение модуля, m — длина информационного вектора, k — длина контрольного вектора (длина кодового слова равна n).

$SM(m, k)$ -коды строятся следующим образом [19].

1. Выбирается и фиксируется значение модуля M в виде некоторого натурального числа ($M \geq 2$).
2. Подсчитывается вес r информационного вектора.
3. Определяется значение наименьшего неотрицательного вычета числа r по модулю M — число $r_M = r \pmod{M}$.
4. Число r_M представляется в двоичном виде и записывается в разряды контрольного вектора.

К примеру, получим контрольный вектор для информационного вектора $\langle 01010111 \rangle$ кода $S_4(8, 2)$: $r=5$, $5 \pmod{4}=1$, $[1]_{10} = [01]_2$. В контрольный вектор будет записано число $\langle 01 \rangle$.

Рассмотрим использование $SM(m, k)$ -кодов при организации СВК по методу логического дополнения.

На рис. 1 приведены структуры организации СВК для устройства $F(x)$, вычисляющего функции $f_1, f_2, \dots, f_{n-1}, f_n$, по $S2(m,1)$, $S4(m,2)$ и $S8(m,3)$ кодам (первый

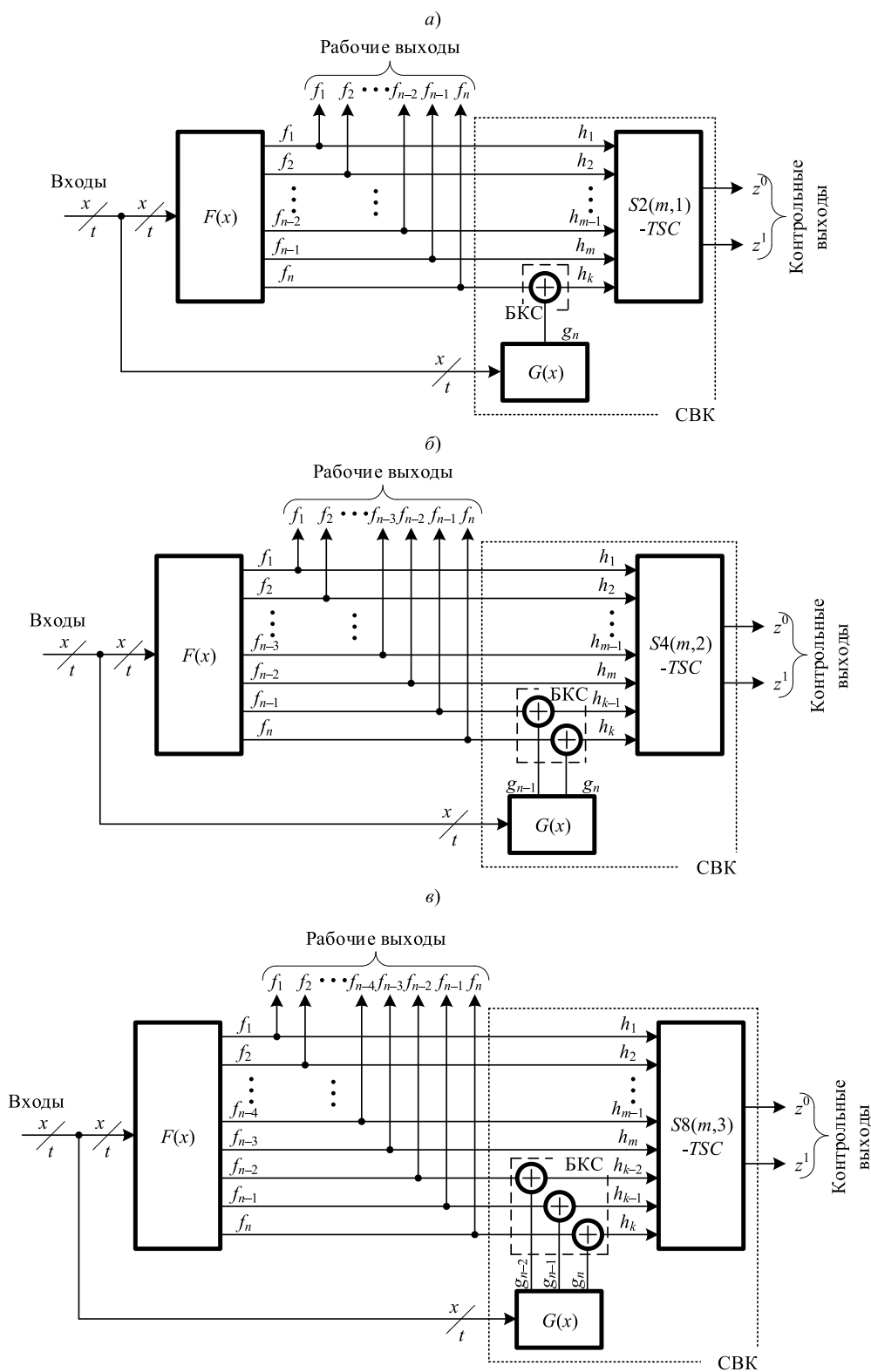


Рис. 1. Структуры организации СВК по методу логического дополнения до модульных кодов с суммированием

код известен как код паритета [38], а вторые два — как коды Боуза-Лина [39]). В СВК используется три функциональных блока. Блок коррекции сигналов (БКС), образованный двухвходовыми элементами сложения по модулю $M=2$ (*XOR*), предназначен для преобразования части рабочих функций в контрольные функции $SM(m,k)$ -кода. Число элементов преобразования определяется выбранным кодом и числом контрольных разрядов в нем. Соответственно, преобразуются k рабочих функций, $n-k=m$ функций не преобразуются. Для преобразования на первые входы элементов *XOR* в БКС подаются сигналы от рабочих функций, а на вторые — от контрольных функций $g_1, g_2, \dots, g_{k-1}, g_k$, вычисляемых блоком контрольной логики $G(x)$. Кодовое слово $SM(m,k)$ -кода формируется в СВК на входах тестера (*totally self-checking checker* — *TSC*), снабженного двумя выходами z^0 и z^1 [40]. Значения разрядов получаются по формулам:

$$h_i = \begin{cases} f_i, i = \overline{1, m}, \\ f_i \oplus g_i, i = \overline{m+1, n}. \end{cases} \quad (1)$$

Неисправности блоков $G(x)$ и БКС непосредственно вызывают ошибки в контрольных векторах $SM(m,k)$ -кодов, что фиксируется тестером. Неисправности самого тестера также обнаруживаются на входных воздействиях, т. к. он имеет самопроверяемую структуру [40]. Неисправности блока $F(x)$ способны вызывать ошибки и в одних только информационных векторах, и в информационных и контрольных векторах одновременно. Тестер может не обнаружить их в том случае, если искаженное кодовое слово будет принадлежать заданному $SM(m,k)$ -коду.

Таким образом, в рассматриваемых структурах важны не только изученные характеристики обнаружения ошибок в информационных векторах, но и определение характеристик обнаружения ошибок во всех кодовых словах.

2. Характеристики обнаружения ошибок в кодовых словах модульных кодов с суммированием

2.1. Общие замечания

Общее число искажений в кодовых словах длиной n определяется числом переходов каждого кодового слова (всего имеется 2^n кодовых слов) в каждое:

$$N_n = 2^n (2^n - 1) = 2^{m+k} (2^{m+k} - 1). \quad (2)$$

Общее число искажений в информационных векторах длиной $m=n-k$ определяется числом переходов каждого кодового слова (всего имеется $2^m = 2^{n-k}$ кодовых слов) в каждое:

$$N_m = 2^m (2^m - 1) = 2^{n-k} (2^{n-k} - 1). \tag{3}$$

Число же необнаруживаемых ошибок равно общему числу переходов $2^m = 2^{n-k}$ кодовых векторов друг в друга:

$$N_{n,k} = N_m = 2^m (2^m - 1). \tag{4}$$

Ошибки, возникающие в кодовых словах делимых кодов, могут быть классифицированы следующим образом (рис. 2). Первую группу ошибок составляют те, что возникают только в информационных векторах (их число определяется по формуле (3)). Вторую группу образуют ошибки, возникающие только в контрольных векторах (их число равно $2^k (2^k - 1)$). В третью группу входят ошибки, возникающие как в информационных, так в контрольных векторах (их общее число определяется по формуле (2)). Ошибки в разрядах кодовых слов делимых кодов могут относиться к обнаруживаемым и к необнаруживаемым. Любые ошибки в контрольном векторе обнаруживаются в любом делимом коде, т. к. нарушается соответствие между информационным и контрольным векторами. К необнаруживаемым могут относиться только ошибки, возникающие в информационных векторах, и только ошибки, возникающие как в информационных, так и контрольных векторах одновременно. Число

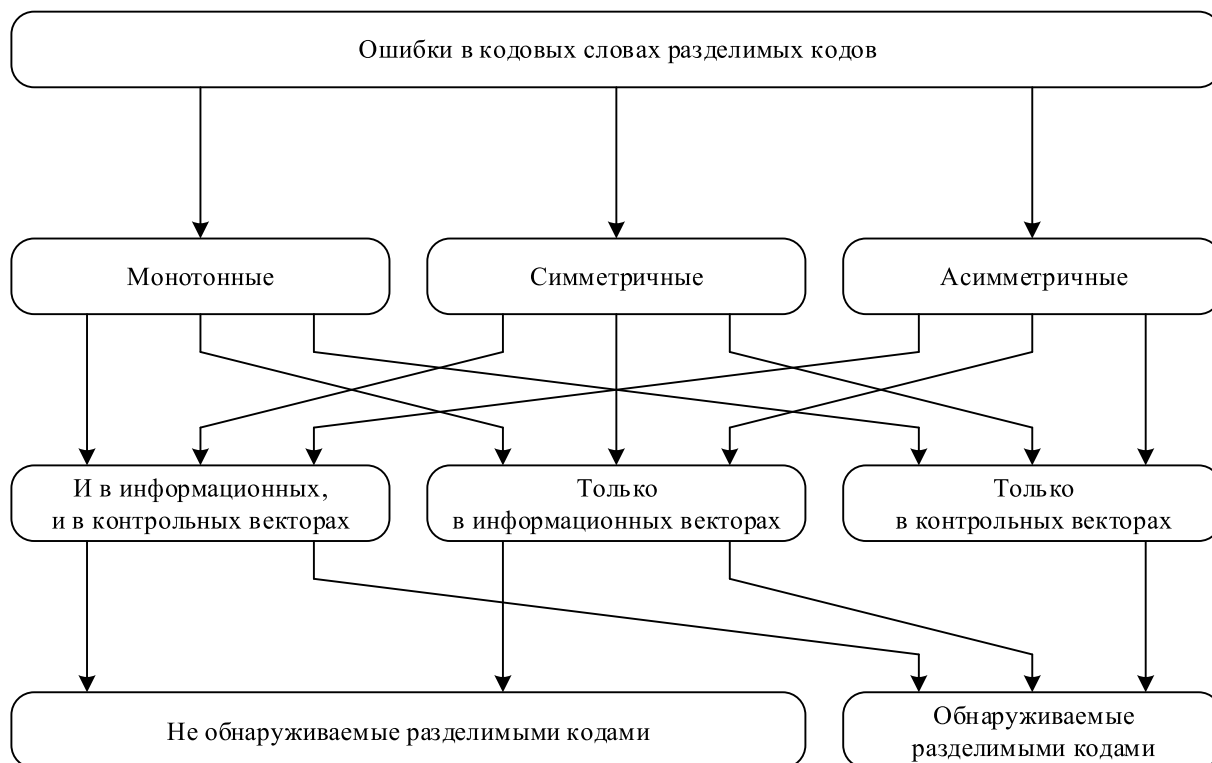


Рис. 2. Классификация ошибок в кодовых словах делимых кодов

ошибок первого типа обозначим через $N_{m,k}^D$, а число ошибок второго типа — через $N_{n,k}^{D+C}$ (здесь D — от слова Data и C — от слова Check).

Помимо разделения ошибок по принадлежности их к отдельным частям кодового слова, выделяют ошибки различных видов [19, 41]. Вид ошибки определяется числом сочетаний искажений нулевых и единичных разрядов. Если искажаются только нулевые или только единичные разряды, то ошибку считают однонаправленной (монотонной). Если искажаются и единичные и нулевые разряды, такая ошибка называется разнонаправленной (немонотонной). Немонотонные ошибки подразделяются на симметричные² и асимметричные. Симметричная ошибка возникает при одинаковом числе искажений нулевых и единичных разрядов в кодовом слове или его части. Если искажается неодинаковое число нулевых и единичных разрядов в кодовом слове или его части, то ошибка является асимметричной. Разделение ошибок по видам именно таким образом связано с возможностью использования кодов с различными свойствами обнаружения ошибок разных видов для решения задач технической диагностики. К примеру, в [11] для синтеза самотестируемых конечных автоматов используется свойство кода Бергера, связанное с обнаружением им любых монотонных ошибок в информационных векторах, а в [42] для синтеза самопроверяемых СВК используется то, что кодами Бергера обнаруживаются любые монотонные и асимметричные ошибки в информационных векторах. Известны [15, 17–20] и другие коды с другими свойствами, использование которых эффективно при решении задач технической диагностики.

В [19, 41] приводится способ подсчета общего количества не обнаруживаемых $SM(m,k)$ -кодами ошибок в информационных векторах, основанный на анализе табличной формы задания кода. Такой способ задания кода подразумевает классификацию информационных векторов делимого кода по группам, соответствующим значениям наименьших неотрицательных вычетов из множества $r_M \in \{0, 1, \dots, M-1\}$ (они соответствуют контрольным векторам кода). В табл. 1 задан произвольный $SM(m,k)$ -код. В каждой группе для $SM(m,k)$ -кода помещаются информационные векторы с весом $r_M \in \{0, 1, \dots, M-1\}$: для таких векторов значения истинного веса r (числа единичных разрядов) равны $r = r_M, r = r_M + M, \dots, r = r_M + iM$ ($C_m^{r_M+iM}, r_M + iM \leq m$).

² Следует подчеркнуть отличие в терминологии в классической теории информации и кодирования и технической диагностики. В классической теории информации и кодирования под симметричной ошибкой понимается ошибка, при которой вероятность искажения нулевого значения равна вероятности искажения единичного значения. В технической диагностике, если речь идет о некотором вычислительном устройстве, симметричная ошибка в кодовом слове может быть следствием внутренних ошибок, вызванных дефектами компонентов структуры, и распространяться по различным путям к выходам устройства. Это не связано с «вероятностным характером» самого искажения, а определяется только структурой устройства и конфигурацией связей между внутренними элементами.

Таблица 1. Число информационных векторов $SM(m, k)$ -кода в каждой контрольной группе

| r_M (десятичный эквивалент контрольного вектора) | | | |
|--|--------------|-----|------------------|
| 0 | 1 | ... | $M-1$ |
| C_m^0 | C_m^1 | ... | C_m^{M-1} |
| C_m^M | C_m^{M+1} | ... | C_m^{2M-1} |
| C_m^{2M} | C_m^{2M+1} | ... | C_m^{3M-1} |
| ... | ... | ... | ... |
| C_m^{iM} | C_m^{iM+1} | ... | $C_m^{(i+1)M-1}$ |

Необнаруживаемые ошибки будут происходить только в том случае, если при искажении осуществляется переход между информационными векторами, значение r_M для которых одинаково (переход векторов внутри группы). Число векторов в группе равно:

$$p_{r_M} = C_m^{r_M} + C_m^{r_M+M} + C_m^{r_M+2M} + \dots + C_m^{r_M+iM}. \tag{5}$$

Количество необнаруживаемых ошибок в одной контрольной группе равно:

$$N_{m,r_M} = p_{r_M} (p_{r_M} - 1). \tag{6}$$

Суммируя числа в (6) для каждой группы $r_M \in \{0, 1, \dots, M-1\}$, получаем выражение для подсчета общего количества не обнаруживаемых в информационных векторах $SM(m, k)$ -кодами ошибок:

$$\begin{aligned} N_{m,k}^D &= \sum_{r_M=0}^{M-1} N_{m,r_M} = \sum_{r_M=0}^{M-1} p_{r_M} (p_{r_M} - 1) = \\ &= \sum_{r_M=0}^{M-1} (C_m^{r_M} + C_m^{r_M+M} + C_m^{r_M+2M} + \dots + C_m^{r_M+iM}) \times \\ &= \sum_{r_M=0}^{M-1} (C_m^{r_M} + C_m^{r_M+M} + C_m^{r_M+2M} + \dots + C_m^{r_M+iM} - 1) = \\ &= \sum_{r_M=0}^{M-1} \left(\sum_{i=0}^{\lfloor \frac{m}{M} \rfloor} C_m^{r_M+iM} \right) \left(\sum_{i=0}^{\lfloor \frac{m}{M} \rfloor} C_m^{r_M+iM} - 1 \right) = \sum_{r_M=0}^{M-1} A_{\left(\sum_{i=0}^{\lfloor \frac{m}{M} \rfloor} C_m^{r_M+iM} \right)}^2, r_M + jM \leq m. \end{aligned} \tag{7}$$

Зная (7) и (4), нетрудно получить выражение для подсчета числа необнаруживаемых ошибок, возникающих одновременно как в информационном, так и в контрольном векторах $SM(m, k)$ -кодов:

$$N_{n,k}^{D+C} = N_{n,k} - N_{m,k}^D = 2^m (2^m - 1) - \sum_{r_M=0}^{M-1} A_{\left[\begin{matrix} m \\ M \\ \sum_{i=0}^{r_M} C_m^{r_M+iM} \end{matrix} \right]}, r_M + jM \leq m. \quad (8)$$

Пользуясь приведенными выше формулами (4)–(8), получим числа $N_{n,k}$, $N_{m,k}^D$ и $N_{n,k}^{D+C}$ для $S4(6,2)$ -кода.

Определим число $N_{m,k}^D$.

Пользуясь выражением (5), получаем:

$$p_0 = C_6^0 + C_6^{0+4} = 1 + 15 = 16; \quad p_1 = C_6^1 + C_6^{1+4} = 6 + 6 = 12;$$

$$p_2 = C_6^2 + C_6^{2+4} = 15 + 1 = 16; \quad p_3 = C_6^3 = 20.$$

Далее, используя (6), имеем:

$$N_{6,0} = 16 \cdot 15 = 240; \quad N_{6,1} = 12 \cdot 11 = 132; \quad N_{6,2} = 16 \cdot 15 = 240; \quad N_{6,3} = 20 \cdot 19 = 380.$$

Суммируя полученные величины в (6), определяем окончательное число $N_{m,k}^D$:

$$N_{6,2}^D = N_{6,0} + N_{6,1} + N_{6,2} + N_{6,3} = 240 + 132 + 240 + 380 = 992.$$

Для определения $N_{n,k}$ используем непосредственно формулу (4):

$$N_{n,k} = 2^6 (2^6 - 1) = 64 \cdot 63 = 4032.$$

Из (8) следует, что:

$$N_{n,k}^{D+C} = N_{n,k} - N_{m,k}^D = 4032 - 992 = 3040.$$

Формулы (2)–(8) дают возможность определить общее число не обнаруживаемых $SM(m,k)$ -кодами ошибок. Для установления более подробных характеристик кодов требуется использование программных методов анализа.

Отметим здесь три ключевых свойства $SM(m,k)$ -кодов, доказанных в [19], характеризующих необнаруживаемые ошибки в информационных векторах по видам и кратностям и эффективно используемые при синтезе СВК логических устройств.

Теорема 1. Любой $SM(m,k)$ -код не обнаруживает 100% симметричных ошибок в информационных векторах и 100% монотонных ошибок кратностью $d = jM$,

$$j = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{m}{M} \right\rfloor.$$

Теорема 2. Любой $SM(m,k)$ -код не обнаруживает некоторую долю асимметричных ошибок кратностью $d = M + 2j, j = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{m-M}{2} \right\rfloor$ в информационных векторах, другие асимметричные ошибки им обнаруживаются.

Теорема 3. Доля необнаруживаемых ошибок кратностью d в информационных векторах $SM(m,k)$ -кодов от общего количества ошибок данной кратности вне зависимости от длины информационного вектора является постоянной величиной.

Исследования показывают, что эти свойства справедливы исключительно для ошибок, возникающих в информационных векторах $SM(m,k)$ -кодов. При рассмотрении ошибок, возникающих как в информационных, так и в контрольных векторах одновременно, данные свойства нарушаются.

2.2. Характеристики обнаружения ошибок кодами паритета

$S2(m,1)$ -коды имеют всего один контрольный разряд, вычисляемый как сумма по модулю $M=2$ всех информационных разрядов [19]. $S2(m,1)$ -кодами не обнаруживается 100 % ошибок каждой четной кратности в информационных векторах кодовых слов. Исследования свойств обнаружения ошибок в кодовых словах этими кодами позволили установить их новые особенности.

В табл. 2 и 3 приведены результаты расчетов общего числа необнаруживаемых ошибок в информационных векторах и одновременно в информационных и контрольных векторах по видам и кратностям, а также рассчитаны некоторые относительные показатели: $\delta_n = \frac{N_{m,k}^D}{N_n} \cdot 100 \%$, $\eta_n = \frac{N_{n,k}^{D+C}}{N_n} \cdot 100 \%$, $\gamma_n = \frac{N_{n,k}}{N_n} \cdot 100 \%$,

$$\varepsilon_n = \frac{N_{m,k}^D}{N_{n,k}} \cdot 100 \%, \quad \eta_n = \frac{N_{n,k}^{D+C}}{N_{n,k}} \cdot 100 \%, \quad \varphi_n = \frac{N_{n,k}^{D+C}}{N_{m,k}^D} \cdot 100 \%, \quad \beta_{n,d} = \frac{N_{n,d}}{2^n C_n^d} \cdot 100 \%.$$

Расчеты показали, что $S2(m,1)$ -коды не обнаруживают 50 % любых ошибок четной кратностью, возникающих и в одних только информационных векторах, и во всем кодовом слове. Все остальные ошибки нечетных кратностей этими кодами обнаруживаются. При этом доли необнаруживаемых ошибок в информационных векторах от общего числа ошибок в кодовых словах данных кодов (величина $\delta_n, \%$) и доли необнаруживаемых ошибок во всем кодовом слове от общего числа ошибок в кодовых словах (величина $\eta_n, \%$) практически совпадают для одинаковых значений m . Доля необнаруживаемых ошибок $S2(m,1)$ -кодами от общего их числа составляет примерно 25 % ($2^{-2} \cdot 100 \%$) и с ростом n приближается к данной величине (рис. 3). Другими словами, кодами паритета не обнаруживается каждая четвертая ошибка в кодовом слове.

Таблица 2. Характеристика обнаруживаемых $S_2(m, 1)$ -кодами ошибок

| m | k | n | N_m | N_n | $N_{m,k}^D$ | $N_{n,k}^{D+C}$ | $N_{n,k}$ | $\delta_n, \%$ | $\eta_n, \%$ | $\gamma_n, \%$ | $\varepsilon_n, \%$ | $\zeta_n, \%$ | $\phi_n, \%$ |
|-----|-----|-----|------------|-------------|-------------|-----------------|------------|----------------|--------------|----------------|---------------------|---------------|--------------|
| 4 | 1 | 5 | 240 | 992 | 112 | 128 | 240 | 11,29 | 12,903 | 24,194 | 46,667 | 53,333 | 1,143 |
| 5 | 1 | 6 | 992 | 4032 | 480 | 512 | 992 | 11,905 | 12,698 | 24,603 | 48,387 | 51,613 | 1,067 |
| 6 | 1 | 7 | 4032 | 16256 | 1984 | 2048 | 4032 | 12,205 | 12,598 | 24,803 | 49,206 | 50,794 | 1,032 |
| 7 | 1 | 8 | 16256 | 65280 | 8064 | 8192 | 16256 | 12,353 | 12,549 | 24,902 | 49,606 | 50,394 | 1,016 |
| 8 | 1 | 9 | 65280 | 261632 | 32512 | 32768 | 65280 | 12,427 | 12,524 | 24,951 | 49,804 | 50,196 | 1,008 |
| 9 | 1 | 10 | 261632 | 1047552 | 130560 | 131072 | 261632 | 12,463 | 12,512 | 24,976 | 49,902 | 50,098 | 1,004 |
| 10 | 1 | 11 | 1047552 | 4192256 | 523264 | 524288 | 1047552 | 12,482 | 12,506 | 24,988 | 49,951 | 50,049 | 1,002 |
| 11 | 1 | 12 | 4192256 | 16773120 | 2095104 | 2097152 | 4192256 | 12,491 | 12,503 | 24,994 | 49,976 | 50,024 | 1,001 |
| 12 | 1 | 13 | 16773120 | 67100672 | 8384512 | 8388608 | 16773120 | 12,495 | 12,502 | 24,997 | 49,988 | 50,012 | 1 |
| 13 | 1 | 14 | 67100672 | 268419072 | 33546240 | 33554432 | 67100672 | 12,498 | 12,501 | 24,998 | 49,994 | 50,006 | 1 |
| 14 | 1 | 15 | 268419072 | 1073709056 | 134201344 | 134217728 | 268419072 | 12,499 | 12,5 | 24,999 | 49,997 | 50,003 | 1 |
| 15 | 1 | 16 | 1073709056 | 4294901760 | 536838144 | 536870912 | 1073709056 | 12,499 | 12,5 | 25 | 49,998 | 50,002 | 1 |
| 16 | 1 | 17 | 4294901760 | 17179738112 | 2147418112 | 2147483648 | 4294901760 | 12,5 | 12,5 | 25 | 49,999 | 50,001 | 1 |

Таблица 3. Характеристика не обнаруживаемых $S2(m,1)$ -кодами ошибок по видам и кратностям

| m | k | n | Число необнаруживаемых ошибок | | | | | | $\beta_{n,2}, \%$ | $\beta_{n,4}, \%$ |
|-----|-----|-----|-------------------------------|------------|--------------|---------------|------------|----------------|-------------------|-------------------|
| | | | Всего | Монотонных | Симметричных | Асимметричных | Двукратных | Четырехкратных | | |
| 4 | 1 | 5 | 240 | 90 | 110 | 40 | 160 | 80 | 50 | 50 |
| 5 | 1 | 6 | 992 | 302 | 420 | 270 | 480 | 480 | 50 | 50 |
| 6 | 1 | 7 | 4032 | 966 | 1652 | 1414 | 1344 | 2240 | 50 | 50 |
| 7 | 1 | 8 | 16256 | 3026 | 6342 | 6888 | 3584 | 8960 | 50 | 50 |
| 8 | 1 | 9 | 65280 | 9330 | 24054 | 31896 | 9216 | 32256 | 50 | 50 |
| 9 | 1 | 10 | 261632 | 28502 | 91740 | 141390 | 23040 | 107520 | 50 | 50 |
| 10 | 1 | 11 | 1047552 | 86526 | 351692 | 609334 | 56320 | 337920 | 50 | 50 |
| 11 | 1 | 12 | 4192256 | 261626 | 1350492 | 2580138 | 135168 | 1013760 | 50 | 50 |
| 12 | 1 | 13 | 16773120 | 788970 | 5196204 | 10787946 | 319488 | 2928640 | 50 | 50 |
| 13 | 1 | 14 | 67100672 | 2375102 | 20048392 | 44677178 | 745472 | 8200192 | 50 | 50 |
| 14 | 1 | 15 | 268419072 | 7141686 | 77542376 | 183735010 | 1720320 | 22364160 | 50 | 50 |
| 15 | 1 | 16 | 1073709056 | 21457826 | 300513862 | 751737368 | 3932160 | 59637760 | 50 | 50 |
| 16 | 1 | 17 | 4294901760 | 64439010 | 1166737574 | 3063725176 | 8912896 | 155975680 | 50 | 50 |

Наибольшую долю в классе необнаруживаемых ошибок составляют симметричные, затем следуют монотонные и асимметричные. На рис. 4 представ-

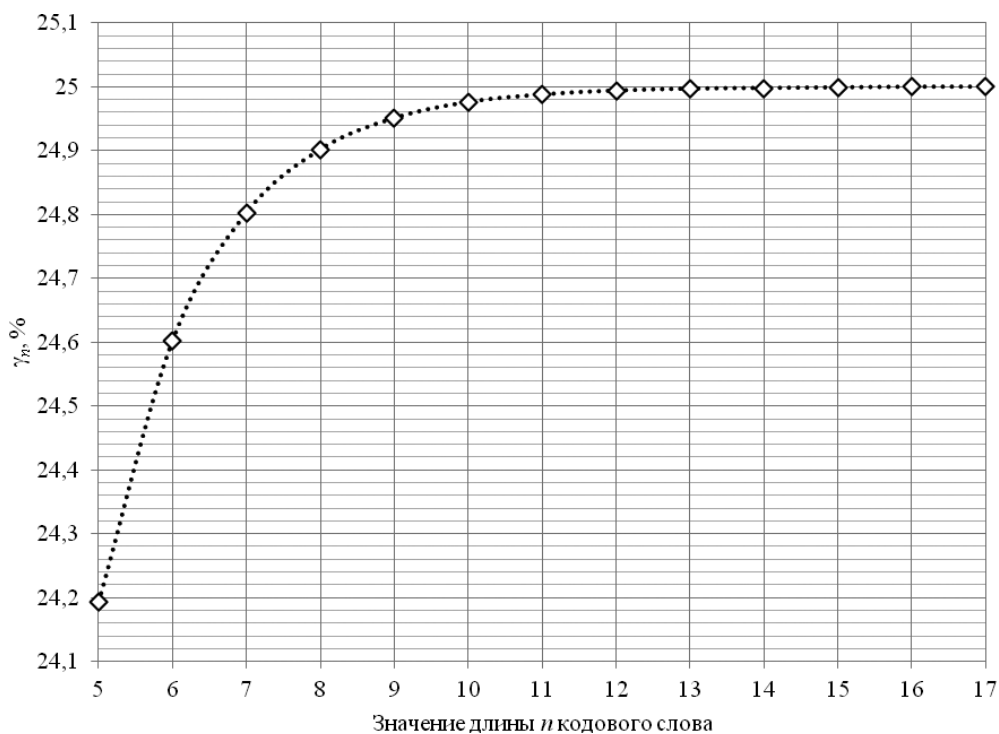


Рис. 3. Значение коэффициента γ_n для $S2(m,1)$ -кодов

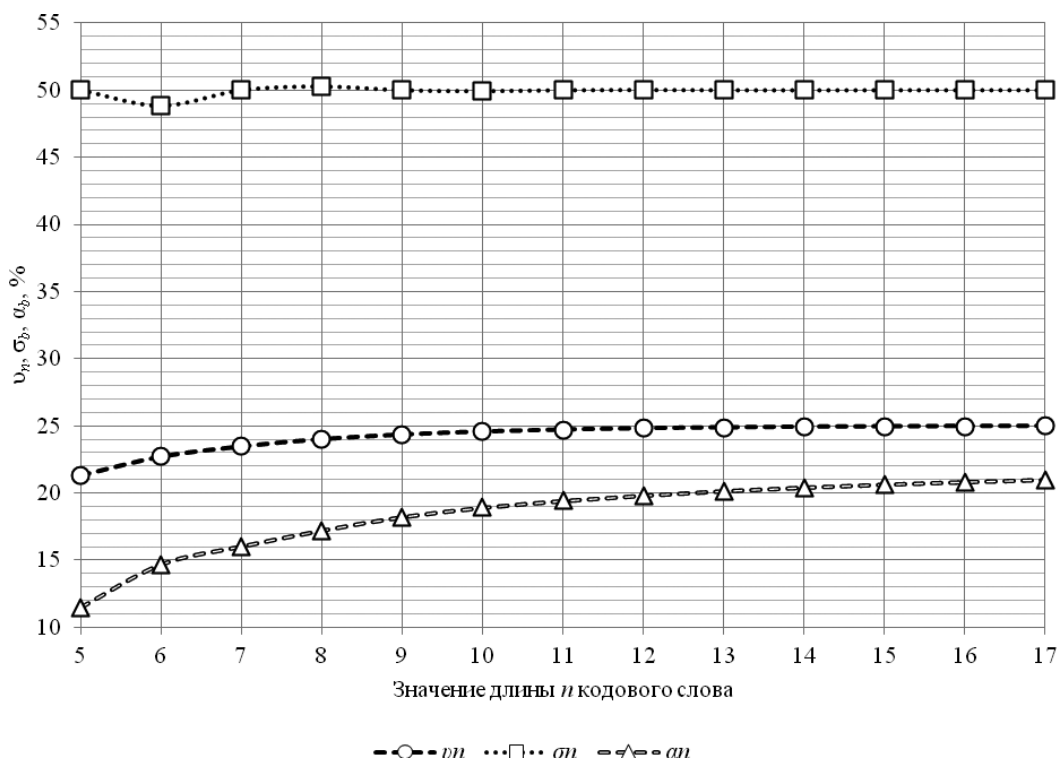


Рис. 4. Значение коэффициентов u_n , σ_n и α_n для $S2(m,1)$ -кодов

лены зависимости долей необнаруживаемых монотонных ошибок от общего количества монотонных ошибок в кодовых словах (величин υ_n , %), долей необнаруживаемых симметричных ошибок от общего количества симметричных ошибок в кодовых словах (величин σ_n , %), долей необнаруживаемых асимметричных ошибок от общего числа асимметричных ошибок в кодовых словах (величин α_n , %). Значение величины $\sigma_n \approx 50\%$, величины $\upsilon_n \approx 25\%$. Величина α_n гораздо меньше: с ростом значения n она постепенно возрастает в диапазоне 10...20%.

2.3. Характеристики обнаружения ошибок кодами Боуза-Лина с модулем $M=4$

$S4(m,2)$ -кодами, как известно [19], не обнаруживается 50% ошибок с четными кратностями, возникающих в информационных векторах, для любых значений m . При этом все ошибки в информационных векторах с нечетными кратностями этими кодами обнаруживаются. При рассмотрении всего кодового вектора добавляется еще два разряда ($n=m+2$), поэтому число возможных ошибок существенно возрастает по сравнению с рассмотренными ранее $S2(m,1)$ -кодами. Общее число необнаруживаемых ошибок для данного значения m (в силу того, что рассматриваются все переходы каждого из векторов в каждый) остается тем же. Меняется распределение необнаруживаемых ошибок между информационной и контрольной частями кодового слова: число необнаруживаемых ошибок в информационных векторах уменьшается, а количество возникающих одновременно в информационных и контрольных векторах, наоборот, возрастает (табл. 4). Соответственно, меняются показатели ϵ_n , ζ_n и φ_n . Если для $S2(m,1)$ -кодов φ_n находится примерно в окрестности 1, то для $S4(m,2)$ -кодов данный показатель примерно равен 3. При этом с увеличением длины кодового слова φ_n постепенно уменьшается, приближаясь к обозначенным величинам для обоих классов кодов.

Для $S4(m,2)$ -кодов существенно уменьшается значение величины γ_n по сравнению с аналогичной величиной для $S2(m,1)$ -кодов. На это влияет общее количество возможных ошибок.

Указанная величина γ_n не превышает порогового значения в 6,25% ($2^{-4} \cdot 100\%$), а с увеличением длины информационного вектора постепенно возрастает и стремится к нему (рис. 5).

Также по сравнению с $S2(m,1)$ -кодами меняется распределение необнаруживаемых ошибок по видам и кратностям (табл. 5). Например, число монотонных и симметричных необнаруживаемых ошибок для данного значения m в $S4(m,2)$ -кодах уменьшается, а число асимметричных возрастает. У $S4(m,2)$ -кодов появляются необнаруживаемые ошибки с нечетными кратностями, возникающие как в информационных, так и в контрольных векторах одновременно. Рис. 6 и 7 дополняют данные табл. 4 и 5.

Таблица 4. Характеристика не обнаруживаемых S4 (m,2)-кодами ошибок

| m | k | n | N_m | N_n | $N_{m,k}^D$ | $N_{n,k}^{D+C}$ | $N_{n,k}$ | $\delta_n, \%$ | $\eta_n, \%$ | $\gamma_n, \%$ | $\varepsilon_n, \%$ | $\zeta_n, \%$ | $\varphi_n, \%$ |
|-----|-----|-----|------------|-------------|-------------|-----------------|------------|----------------|--------------|----------------|---------------------|---------------|-----------------|
| 4 | 2 | 6 | 240 | 4032 | 56 | 184 | 240 | 1,389 | 4,563 | 5,952 | 23,333 | 76,667 | 3,286 |
| 5 | 2 | 7 | 992 | 16256 | 240 | 752 | 992 | 1,476 | 4,626 | 6,102 | 24,194 | 75,806 | 3,133 |
| 6 | 2 | 8 | 4032 | 65280 | 992 | 3040 | 4032 | 1,52 | 4,657 | 6,176 | 24,603 | 75,397 | 3,065 |
| 7 | 2 | 9 | 16256 | 261632 | 4032 | 12224 | 16256 | 1,541 | 4,672 | 6,213 | 24,803 | 75,197 | 3,032 |
| 8 | 2 | 10 | 65280 | 1047552 | 16256 | 49024 | 65280 | 1,552 | 4,68 | 6,232 | 24,902 | 75,098 | 3,016 |
| 9 | 2 | 11 | 261632 | 4192256 | 65280 | 196352 | 261632 | 1,557 | 4,684 | 6,241 | 24,951 | 75,049 | 3,008 |
| 10 | 2 | 12 | 1047552 | 16773120 | 261632 | 785920 | 1047552 | 1,56 | 4,686 | 6,245 | 24,976 | 75,024 | 3,004 |
| 11 | 2 | 13 | 4192256 | 67100672 | 1047552 | 3144704 | 4192256 | 1,561 | 4,687 | 6,248 | 24,988 | 75,012 | 3,002 |
| 12 | 2 | 14 | 16773120 | 268419072 | 4192256 | 12580864 | 16773120 | 1,562 | 4,687 | 6,249 | 24,994 | 75,006 | 3,001 |
| 13 | 2 | 15 | 67100672 | 1073709056 | 16773120 | 50327552 | 67100672 | 1,562 | 4,687 | 6,249 | 24,997 | 75,003 | 3 |
| 14 | 2 | 16 | 268419072 | 4294901760 | 67100672 | 201318400 | 268419072 | 1,562 | 4,687 | 6,25 | 24,998 | 75,002 | 3 |
| 15 | 2 | 17 | 1073709056 | 17179738112 | 268419072 | 805289984 | 1073709056 | 1,562 | 4,687 | 6,25 | 24,999 | 75,001 | 3 |
| 16 | 2 | 18 | 4294901760 | 68719214592 | 1073709056 | 3221192704 | 4294901760 | 1,562 | 4,687 | 6,25 | 25 | 75 | 3 |

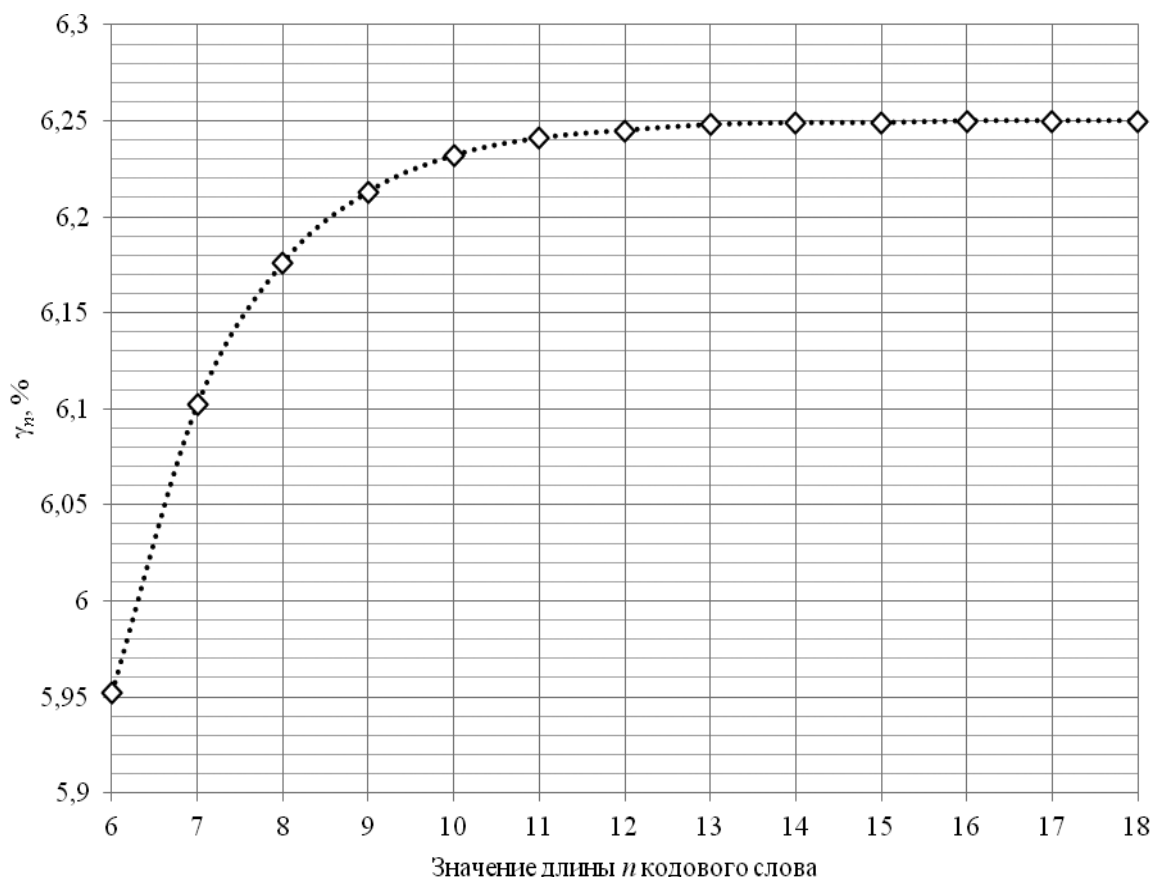


Рис. 5. Значение коэффициента γ_n для $S4(m,2)$ -кодов

Отметим, что значительно меньшими становятся показатели $\beta_{n,d}$ для $S4(m,2)$ -кодов в сравнении с $S2(m,1)$ -кодами.

В табл. 5 и на рис. 7 прослеживаются зависимости изменения рассматриваемых величин для различных значений d .

Например, $\beta_{n,2}$ и $\beta_{n,4}$ возрастают с увеличением длины кодового слова, и характер их изменения схож.

Аналогично $\beta_{n,3}$ и $\beta_{n,5}$ убывают похожим образом с увеличением длины кодового слова. В рассматриваемом диапазоне длин кодовых слов все величины $\beta_{n,d}$ с $d=2...5$ не превосходят 12 %.

Значения величин υ_n , σ_n и α_n для $S4(m,2)$ -кодов не превосходят 7 %. При этом σ_n оказывается максимальной для любых значений n .

С ростом n величина несущественно возрастает, достигая своего максимума при $n=9$, затем начинает незначительно убывать.

Похожий характер изменения наблюдается у величины α_n : с увеличением n она сначала возрастает, достигая максимума при $n=8$, затем постепенно убывает в пределах 0,5 %, однако затем вновь начинает незначительно расти.

Величина υ_n сначала убывает до минимума при $n=8$, затем стремительно растет, а при $n=13$ достигает значений α_n и даже незначительно превосходит их.

Таблица 5. Характеристика не обнаруживаемых S4(m,2)-кодами ошибок по видам и кратностям

| m | k | n | Число необнаруживаемых ошибок | | | | | | | | $\beta_{n,2}, \%$ | $\beta_{n,3}, \%$ | $\beta_{n,4}, \%$ |
|----|---|----|-------------------------------|------------|--------------|---------------|------------|-------------|----------------|--------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | | Всего | Монотонных | Симметричных | Асимметричных | Двукратных | Трехкратных | Четырехкратных | | | | |
| 4 | 2 | 6 | 240 | 78 | 54 | 108 | 80 | 80 | 40 | 8,333 | 6,25 | 4,167 | |
| 5 | 2 | 7 | 992 | 202 | 220 | 570 | 240 | 240 | 240 | 8,929 | 5,357 | 5,357 | |
| 6 | 2 | 8 | 4032 | 546 | 860 | 2626 | 672 | 672 | 1120 | 9,375 | 4,688 | 6,25 | |
| 7 | 2 | 9 | 16256 | 1766 | 3304 | 11186 | 1792 | 1792 | 4480 | 9,722 | 4,167 | 6,944 | |
| 8 | 2 | 10 | 65280 | 6138 | 12614 | 46528 | 4608 | 4608 | 16128 | 10 | 3,75 | 7,5 | |
| 9 | 2 | 11 | 261632 | 20462 | 48108 | 193062 | 11520 | 11520 | 53760 | 10,227 | 3,409 | 7,955 | |
| 10 | 2 | 12 | 1047552 | 64086 | 183732 | 799734 | 28160 | 28160 | 168960 | 10,417 | 3,125 | 8,333 | |
| 11 | 2 | 13 | 4192256 | 194306 | 703384 | 3294566 | 67584 | 67584 | 506880 | 10,577 | 2,885 | 8,654 | |
| 12 | 2 | 14 | 16773120 | 588198 | 2700060 | 13484862 | 159744 | 159744 | 1464320 | 10,714 | 2,679 | 8,929 | |
| 13 | 2 | 15 | 67100672 | 1791922 | 10392408 | 54916342 | 372736 | 372736 | 4100096 | 10,833 | 2,5 | 9,167 | |
| 14 | 2 | 16 | 268419072 | 5443626 | 40100216 | 222875230 | 860160 | 860160 | 11182080 | 10,938 | 2,344 | 9,375 | |
| 15 | 2 | 17 | 1073709056 | 16363646 | 155084752 | 902260658 | 1966080 | 1966080 | 29818880 | 11,029 | 2,206 | 9,559 | |
| 16 | 2 | 18 | 4294901760 | 48774258 | 601014854 | 3645112648 | 4456448 | 4456448 | 77987840 | 11,111 | 2,083 | 9,722 | |

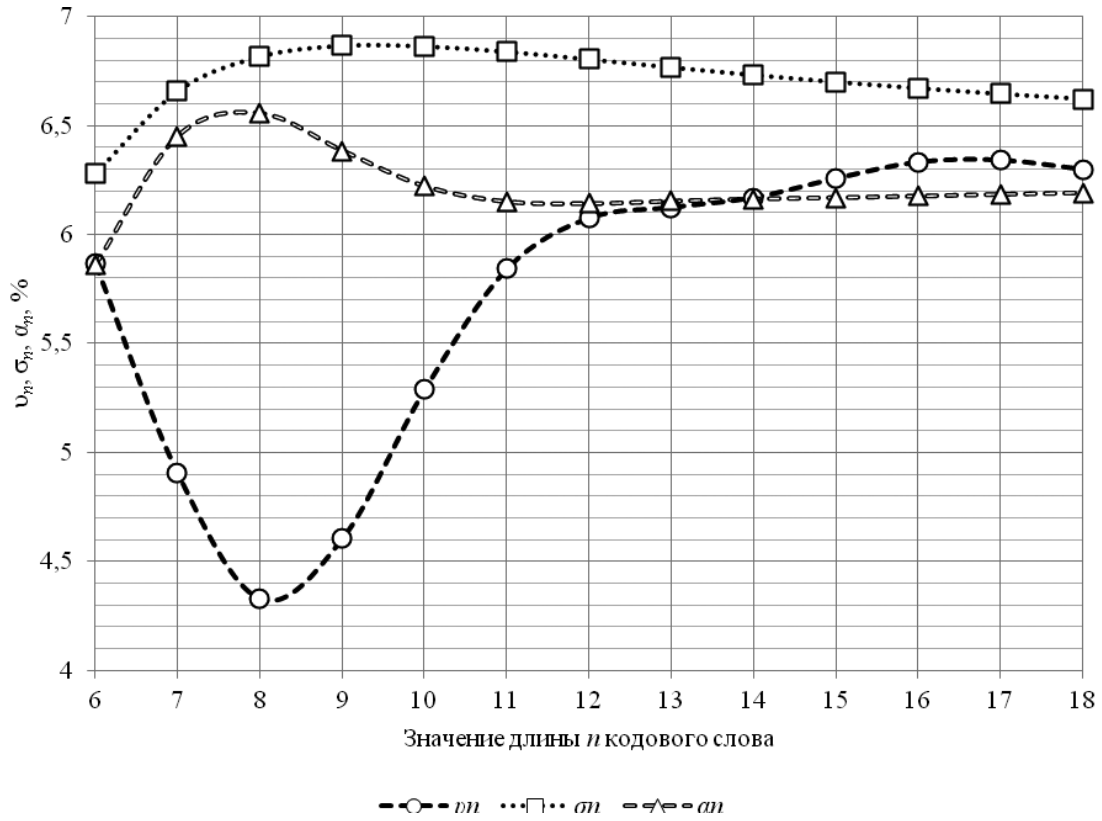


Рис. 6. Значение коэффициентов u_n , σ_n и α_n для $S4(m,2)$ -кодов

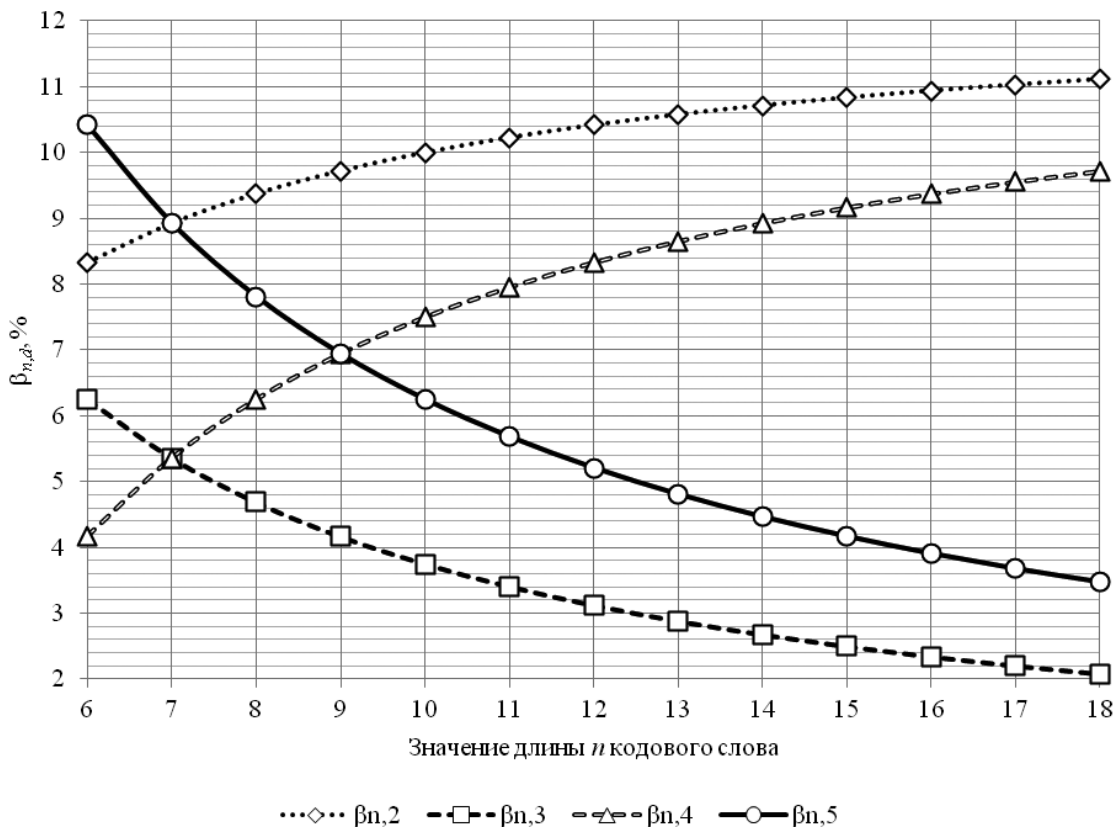


Рис. 7. Значение коэффициентов $\beta_{n,d}$ для $S4(m,2)$ -кодов

2.4. Характеристики обнаружения ошибок кодами Боуза-Лина с модулем $M=8$

$S8(m,3)$ -коды, как и все модульные коды со значениями модуля $M \in \{2^i\}, i = 1, 2, \dots$, обнаруживают любые ошибки с нечетными кратностями в информационных векторах кодовых слов. Однако при рассмотрении характеристик обнаружения ошибок в обеих частях кодового слова начинают появляться и ошибки с нечетными кратностями. Интересно, что при любых значениях n $S8(m,3)$ -кодами обнаруживаются любые монотонные ошибки с кратностями $d=4, 6, 9, 12, 14, 17$ и т. д. Среди рассмотренных модульных кодов с суммированием $S8(m,3)$ -коды обладают максимальными смещениями значений необнаруживаемых ошибок в сторону ошибок, возникающих одновременно в информационной и контрольной частях кодовых слов. Значения показателей ϵ_n, ζ_n и φ_n для таких кодов с ростом n изменяются существенно (табл. 6). К примеру, величина φ_n от значения 3,444 % при $n=7$ возрастает до 5,904 % при $n=19$. Если для $S2(m,1)$ -кодов φ_n находится примерно в окрестности 1, то для $S4(m,2)$ -кодов данный показатель приблизительно равен 3.

Доля не обнаруживаемых $S8(m,3)$ -кодами ошибок от общего их количества изменяется аналогично приведенным выше показателям для рассмотренных ранее кодов, однако стремится к предельной величине 1,5625 % ($2^{-6} \cdot 100\%$) с увеличением n (рис. 8).

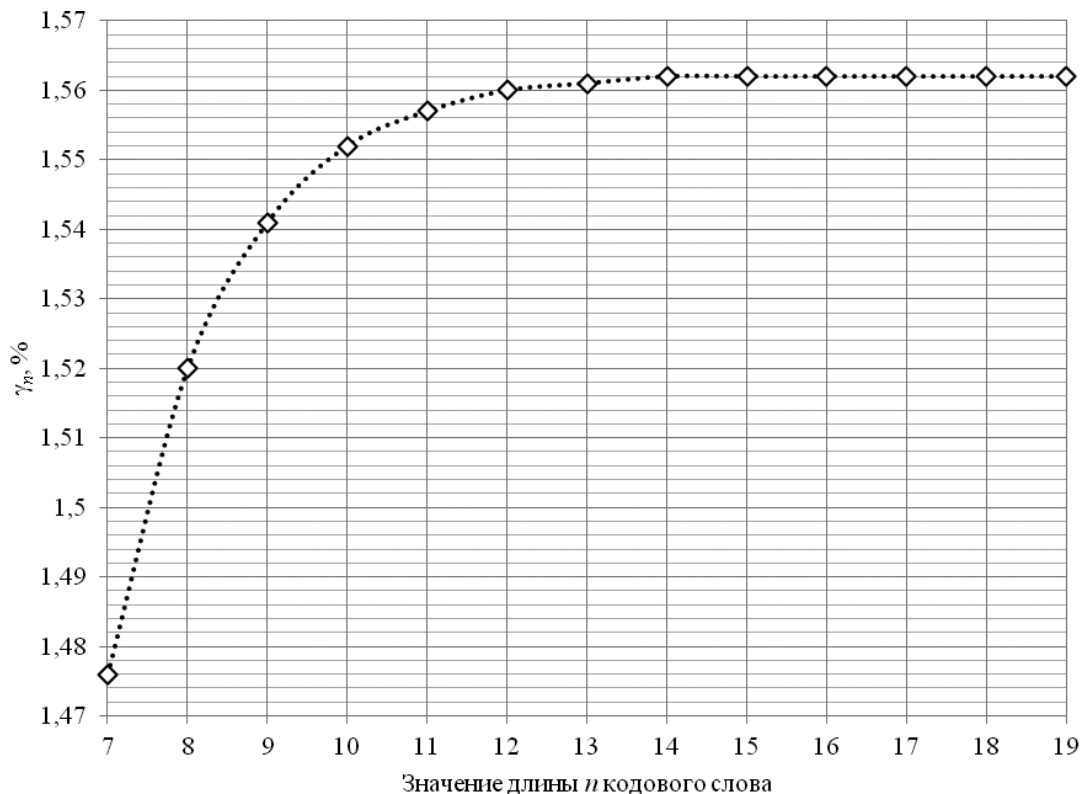


Рис. 8. Значение коэффициента γ_n для $S8(m,3)$ -кодов

Таблица 6. Характеристика не обнаруживаемых S8(m,3)-кодами ошибок

| m | k | n | N_m | N_n | $N_{m,k}^D$ | $N_{n,k}^{D+C}$ | $N_{n,k}$ | $\delta_n, \%$ | $\eta_n, \%$ | $\gamma_n, \%$ | $\varepsilon_n, \%$ | $\zeta_n, \%$ | $\phi_n, \%$ |
|-----|-----|-----|------------|--------------|-------------|-----------------|------------|----------------|--------------|----------------|---------------------|---------------|--------------|
| 4 | 3 | 7 | 240 | 16256 | 54 | 186 | 240 | 0,332 | 1,144 | 1,476 | 22,5 | 77,5 | 3,444 |
| 5 | 3 | 8 | 992 | 65280 | 220 | 772 | 992 | 0,337 | 1,183 | 1,52 | 22,177 | 77,823 | 3,509 |
| 6 | 3 | 9 | 4032 | 261632 | 860 | 3172 | 4032 | 0,329 | 1,212 | 1,541 | 21,329 | 78,671 | 3,688 |
| 7 | 3 | 10 | 16256 | 1047552 | 3304 | 12952 | 16256 | 0,315 | 1,236 | 1,552 | 20,325 | 79,675 | 3,92 |
| 8 | 3 | 11 | 65280 | 4192256 | 12616 | 52664 | 65280 | 0,301 | 1,256 | 1,557 | 19,326 | 80,674 | 4,174 |
| 9 | 3 | 12 | 261632 | 16773120 | 48144 | 213488 | 261632 | 0,287 | 1,273 | 1,56 | 18,401 | 81,599 | 4,434 |
| 10 | 3 | 13 | 1047552 | 67100672 | 184112 | 863440 | 1047552 | 0,274 | 1,287 | 1,561 | 17,575 | 82,425 | 4,69 |
| 11 | 3 | 14 | 4192256 | 268419072 | 706464 | 3485792 | 4192256 | 0,263 | 1,299 | 1,562 | 16,852 | 83,148 | 4,934 |
| 12 | 3 | 15 | 16773120 | 1073709056 | 2721312 | 14051808 | 16773120 | 0,253 | 1,309 | 1,562 | 16,224 | 83,776 | 5,164 |
| 13 | 3 | 16 | 67100672 | 4294901760 | 10523968 | 56576704 | 67100672 | 0,245 | 1,317 | 1,562 | 15,684 | 84,316 | 5,376 |
| 14 | 3 | 17 | 268419072 | 17179738112 | 40853696 | 227565376 | 268419072 | 0,238 | 1,325 | 1,562 | 15,22 | 84,78 | 5,57 |
| 15 | 3 | 18 | 1073709056 | 68719214592 | 159156352 | 914552704 | 1073709056 | 0,232 | 1,331 | 1,562 | 14,823 | 85,177 | 5,746 |
| 16 | 3 | 19 | 4294901760 | 274877382656 | 622051456 | 3672850304 | 4294901760 | 0,226 | 1,336 | 1,562 | 14,483 | 85,517 | 5,904 |

Интересно, что в диапазоне длин информационных векторов $m=4...7$ общее число монотонных необнаруживаемых ошибок в $S8(m,3)$ -кодах совпадает с аналогичным показателем для $S4(m,2)$ -кодов. При этом коды $S8(m,3)$ обнаруживают большее количество симметричных ошибок и, соответственно, меньшее — асимметричных ошибок (табл. 7). При $m \geq 8$ соотношения нарушаются: $S8(m,3)$ -кодами обнаруживается большее количество монотонных и асимметричных ошибок, но меньшее — симметричных.

На рис. 9 приводятся зависимости величин υ_n , σ_n и α_n от длины кодового слова для $S8(m,3)$ -кодов. Они не превосходят 3,5%, а характер изменения с ростом n отличается от характера изменения указанных величин для рассмотренных выше кодов. Наибольшей является величина σ_n . Ее значение меняется в диапазоне 1,8...3,2%. С увеличением n эта величина сначала возрастает, достигая максимума при $n=10$, затем начинает незначительно убывать, достигая минимума при $n=13$, затем вновь растет до максимума при $m=18$ и снова убывает. График зависимости величины σ_n от n напоминает график незатухающей синусоиды. Величина υ_n сначала уменьшается от величины примерно 1,8%, достигая минимума при $n=9$, затем вновь возрастает до максимума при $n=12$. Далее вновь убывает до минимума при $n=17$ (примерно 0,8%) и затем вновь возрастает. Показатель α_n незначительно меняется в диапазоне 1,1...1,4%.

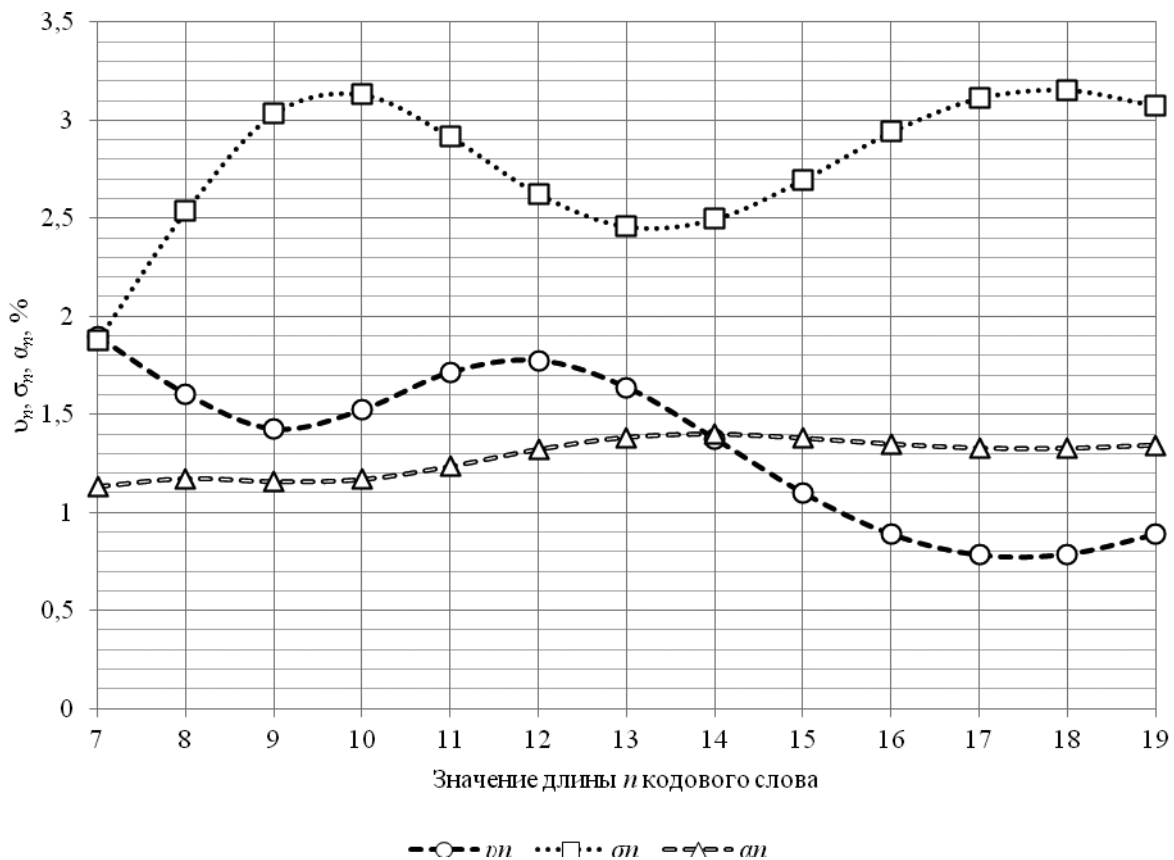


Рис. 9. Значение коэффициентов υ_n , σ_n и α_n для $S8(m,3)$ -кодов

Таблица 7. Характеристика не обнаруживаемых S8(m,3)-кодами ошибок по видам и кратностям

| m | k | n | Число необнаруживаемых ошибок | | | | | | | | $\beta_{n,2},\%$ | $\beta_{n,3},\%$ | $\beta_{n,4},\%$ |
|----|---|----|-------------------------------|------------|--------------|---------------|------------|-------------|----------------|-------|------------------|------------------|------------------|
| | | | Всего | Монотонных | Симметричных | Асимметричных | Двукратных | Трехкратных | Четырехкратных | | | | |
| 4 | 3 | 7 | 240 | 78 | 62 | 100 | 80 | 60 | 50 | 2,976 | 1,339 | 1,116 | |
| 5 | 3 | 8 | 992 | 202 | 320 | 470 | 240 | 120 | 300 | 3,348 | 0,837 | 1,674 | |
| 6 | 3 | 9 | 4032 | 546 | 1460 | 2026 | 672 | 252 | 1260 | 3,646 | 0,586 | 1,953 | |
| 7 | 3 | 10 | 16256 | 1766 | 5754 | 8736 | 1792 | 672 | 4480 | 3,889 | 0,547 | 2,083 | |
| 8 | 3 | 11 | 65280 | 5998 | 20510 | 38772 | 4608 | 2016 | 14688 | 4,091 | 0,597 | 2,173 | |
| 9 | 3 | 12 | 261632 | 18698 | 70860 | 172074 | 11520 | 5760 | 46080 | 4,261 | 0,639 | 2,273 | |
| 10 | 3 | 13 | 1047552 | 51906 | 255432 | 740214 | 28160 | 14960 | 139920 | 4,407 | 0,639 | 2,389 | |
| 11 | 3 | 14 | 4192256 | 131078 | 1001044 | 3060134 | 67584 | 35904 | 411840 | 4,533 | 0,602 | 2,511 | |
| 12 | 3 | 15 | 16773120 | 314562 | 4181124 | 12277434 | 159744 | 82368 | 1175616 | 4,643 | 0,552 | 2,628 | |
| 13 | 3 | 16 | 67100672 | 764038 | 17674280 | 48662354 | 372736 | 186368 | 3261440 | 4,74 | 0,508 | 2,734 | |
| 14 | 3 | 17 | 268419072 | 2020206 | 72672938 | 193725928 | 860160 | 423360 | 8823360 | 4,825 | 0,475 | 2,828 | |
| 15 | 3 | 18 | 1073709056 | 6093386 | 286397752 | 781217918 | 1966080 | 967680 | 23362560 | 4,902 | 0,452 | 2,912 | |
| 16 | 3 | 19 | 4294901760 | 20634874 | 1086826134 | 3187440752 | 4456448 | 2210816 | 60736512 | 4,971 | 0,435 | 2,989 | |

На рис. 10 показаны графики величин $\beta_{n,d}$ для $S8(m,3)$ -кодов. Характер изменения указанных величин отличается от характера изменения аналогичных величин для $S4(m,2)$ -кодов, но величины $\beta_{n,2}$ и $\beta_{n,4}$ возрастают с увеличением длины кодового слова. Значения величин $\beta_{n,2}$ и $\beta_{n,4}$ изменяются в диапазонах соответственно 3...5 % и 1...3 % на рассматриваемых длинах кодовых слов $S8(m,3)$ -кодов. Показатели $\beta_{n,3}$ и $\beta_{n,5}$ сначала убывают, затем незначительно возрастают и вновь убывают, не превосходя 1,5 % при $n \geq 8$ %.

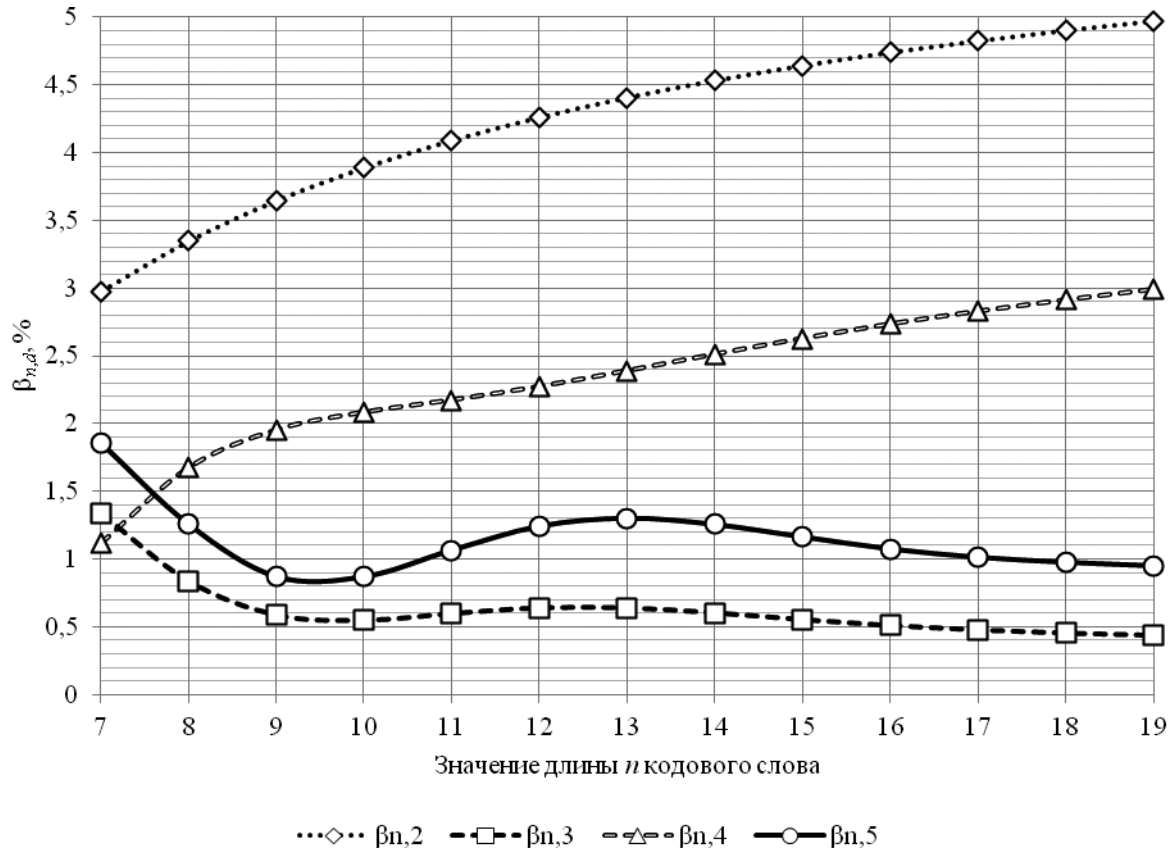


Рис. 10. Значение коэффициентов $\beta_{n,d}$ для $S8(m,3)$ -кодов

Заключение

Модульные коды с суммированием, эффективно применяемые при синтезе СВК по традиционной структуре без коррекции сигналов для контроля, могут эффективно применяться и в структуре логического дополнения, подразумевающей такую коррекцию. При этом становятся важными показатели обнаружения ошибок не только в информационных векторах кодовых слов, но и в информационном и контрольном векторе одновременно. Это справедливо, т. к. и информационные и контрольные векторы в СВК формируются

с участием исходного устройства, дефекты которого могут вызывать ошибки на преобразуемых и непреобразуемых выходах.

Все делимые коды, включая модульные коды со значениями модуля $M \in \{2^i\}, i = 1, 2, \dots$, не обнаруживают одинаковое общее количество ошибок в кодовых словах. Оно определяется числом $N_{n,k} = N_m = 2^m(2^m - 1)$ (4). При этом, в зависимости от характеристик обнаружения ошибок в информационных векторах, меняются и характеристики обнаружения ошибок при их одновременном возникновении в информационной и контрольной частях кодового слова. Для модульных кодов с суммированием со значениями модуля $M=2$ примерно половина необнаруживаемых ошибок относится к ошибкам, возникающим только в информационных векторах, и столько же — к возникающим в обоих векторах кодовых слов. Для кодов со значениями $M=4$ соотношение необнаруживаемых ошибок 1 к 3, для кодов со значениями $M=8$ разброс значительно выше. Такие особенности модульных кодов с суммированием говорят о том, что в структуре логического дополнения необходимо учитывать возможные искажения как в информационном, так и в контрольном векторах одновременно. Чем больше значение модуля, тем выше вероятность появления таких ошибок. Это обстоятельство влияет на процедуру синтеза самопроверяемых вычислительных устройств и систем. В [43], например, подобная задача при использовании $S4(m, 2)$ -кодов решается за счет выделения группы полностью независимых выходов. Среди них ищется пара корректируемых выходов в СВК, что гарантирует отсутствие одновременных искажений в информационном и контрольном векторах кодовых слов. Представленный подход легко обобщается на случай использования модульных кодов со значениями модуля $M \in \{2^i\}, i = 1, 2, \dots$.

Делимые двоичные коды, в т. ч. модульные с суммированием, могут быть использованы при реализации СВК по методу логического дополнения, однако при этом должны учитываться особенности обнаружения ими ошибок в кодовых словах. При низких интенсивностях сбоев элементов цифровых устройств вероятностные показатели обнаружения ошибок в СВК оказываются весьма высокими. Например, при расчетах вероятности необнаружения ошибки в кодовом слове $S8(8, 4)$ -кода с учетом вероятности безошибочности одного разряда $p=0,9$ (на практике данный показатель может оказаться еще выше) получена величина $P > 0,99$.

Библиографический список

1. Пархоменко П. П., Согомонян Е. С. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства). – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 320 с.
2. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Дискретные автоматы с обнаружением отказов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1984. – 112 с.
3. McCluskey E. J. Logic Design Principles: With Emphasis on Testable Semicustom Circuits. – N. J.: Prentice Hall PTR, 1986, 549 p.

4. Микони С. В. Общие диагностические базы знаний вычислительных систем. – СПб.: СПИИРАН, 1992, 234 с.
5. Fujiwara E. Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. – John Wiley & Sons, 2006, 720 p.
6. Гаврилов М. А., Остиану В. М., Потехин А. И. Надежность дискретных систем // Итоги науки и техники. Серия «Теория вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика». – 1969, 1970. – С. 7–104.
7. Согомонян Е. С., Слабаков Е. В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. – М.: Радио и связь, 1989, 208 с.
8. Кодирование информации (двоичные коды) / Березюк Н. Т., Андрущенко А. Г., Мошицкий С. С., Глушков В. И., Бенеша М. М., Гаврилов В. А.; под ред. Н. Т. Березюка. – Харьков: Издательское объединение «Вища школа», 1978. – 252 с.
9. Mitra S., McCluskey E. J. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? // Proceedings of International Test Conference, 2000, USA, Atlantic City, NJ, 03–05 October 2000, pp. 985–994, doi: 10.1109/TEST.2000.894311.
10. Piestrak S. J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. – Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995, 111 p.
11. Matrosova A. Yu., Levin I., Ostanin S. A. Self-Checking Synchronous FSM Network Design with Low Overhead // VLSI Design. – 2000. – Vol. 11. – Issue 1. – Pp. 47–58. – DOI: 10.1155/2000/46578.
12. Гаврилов С. В., Гуров С. И., Жукова Т. Д., Рыжова Д. И. Применение теории кодирования для повышения помехозащищенности комбинационных схем // Информационные технологии. – 2016. – Т. 22. – № 12. – С. 931–937.
13. Tshagharyan G., Harutyunyan G., Shoukourian S., Zorian Y. Experimental Study on Hamming and Hsiao Codes in the Context of Embedded Applications // Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017, pp. 25–28, doi: 10.1109/EWDTS.2017.8110065.
14. Ostanin S. Self-Checking Synchronous FSM Network Design for Path Delay Faults // Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017, pp. 696–699, doi: 10.1109/EWDTS.2017.8110129.
15. Тельпухов Д. В., Деменева А. И., Жукова Т. Д., Гуров С. И. Схема функционального контроля для комбинационных схем на основе R-кода // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2018. – № 4. – С. 98–104.
16. Стемпковский А. Л., Тельпухов Д. В., Жукова Т. Д., Деменева А. И., Надоленко В. В., Гуров С. И. Синтез схемы функционального контроля на основе спектрального R-кода с разбиением выходов на группы // Микроэлектроника. – 2019. – Т. 48. – № 4. – С. 284–294.
17. Жукова Т. Д. Разработка системы автоматизированного проектирования СФК на основе методов избыточного кодирования // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2020. – № 4. – С. 51–57.
18. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды Хэмминга в системах функционального контроля логических устройств. – СПб.: Наука, 2018. – 151 с.
19. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Том 1: Классические коды Бергера и их модификации. – М.: Наука, 2020. – 383 с.
20. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Том 2: Взвешенные коды с суммированием. – М.: Наука, 2021. – 455 с.

21. Слабаков Е. В. Построение полностью самопроверяемых комбинационных устройств с использованием остаточных кодов // Автоматика и телемеханика. – 1979. – № 10. – С. 133–141.
22. Das D., Toubia N. A. Synthesis of Circuits with Low-Cost Concurrent Error Detection Based on Bose-Lin Codes // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. – 1999. – Vol. 15. – Issue 1–2. – Pp. 145–155. – DOI: 10.1023/A:1008344603814.
23. Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D. Modular Sum Code in Building Testable Discrete Systems // Proceedings of 13th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2015), Batumi, Georgia, September 26–29, 2015, pp. 181–187, doi: 10.1109/EWDTS.2015.7493133.
24. Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Применение модульных кодов с суммированием для построения систем функционального контроля комбинационных логических схем // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 10. – С. 152–169.
25. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., Черепанова М. Р. Модульные коды с суммированием в системах функционального контроля. I. Свойства обнаружения ошибок кодами в информационных векторах // Электронное моделирование. – 2016. – Том 38. – № 2. – С. 27–48.
26. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., Черепанова М. Р. Модульные коды с суммированием в системах функционального контроля. II. Уменьшение структурной избыточности систем функционального контроля // Электронное моделирование. – 2016. – Том 38. – № 3. – С. 47–61.
27. Гессель М., Морозов А. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Логическое дополнение – новый метод контроля комбинационных схем // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 1. – С. 167–176.
28. Saposhnikov V. V., Saposhnikov Vl. V., Morozov A., Goessel M. Osadchy G. Design of totally self-checking combinational circuits by use of complementary circuits // Proceedings of 2th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2004), Crimea, Ukraine, September 15–17, 2004, pp. 83–87.
29. Гессель М., Морозов А. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Контроль комбинационных схем методом логического дополнения // Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 8. – С. 161–172.
30. Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. New Methods of Concurrent Checking: Edition 1. – Dordrecht: Springer Science+Business Media B. V., 2008, 184 p.
31. Sen S. K. A Self-Checking Circuit for Concurrent Checking by 1-out-of-4 code with Design Optimization using Constraint Don't Cares // National Conference on Emerging trends and advances in Electrical Engineering and Renewable Energy (NCEEERE 2010), Sikkim Manipal Institute of Technology, Sikkim, held during 22–24 December, 2010.
32. Das D. K., Roy S. S., Dmitiriev A., Morozov A., Gössel M. Constraint Don't Cares for Optimizing Designs for Concurrent Checking by 1-out-of-3 Codes // Proceedings of the 10th International Workshops on Boolean Problems, Freiberg, Germany, September, 2012, pp. 33–40.
33. Пивоваров Д. В. Организация систем функционального контроля комбинационных логических схем на основе метода логического дополнения по равновесному коду «1 из 5» // Автоматика на транспорте. – 2017. – Том 3. – № 4. – С. 605–624.
34. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Osadchy G., Pivovarov D. Self-Dual Complement Method up to Constant-Weight Codes for Arrangement of Combinational Logical Circuits Concurrent Error-Detection Systems // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, Georgia, September 13–16, 2019, pp. 136–143, doi: 10.1109/EWDTS.2019.8884398.

35. Saposhnikov Vl. V., Dmitriev A., Goessel M., Saposhnikov V. V. Self-Dual Parity Checking – a New Method for on Line Testing // Proceedings of 14th IEEE VLSI Test Symposium, USA, Princeton, 1996, pp. 162–168.
36. Berger J. M. A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels // Information and Control. – 1961. – Vol. 4. – Issue 1. – Pp. 68–73. – DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
37. Morozov A., Saposhnikov V. V., Saposhnikov Vl. V., Goessel M. New Self-Checking Circuits by Use of Berger-codes // Proceedings of 6th IEEE International On-Line Testing Workshop, Palma De Mallorca, Spain, 3–5 July 2000, pp. 171–176, doi: 10.1109/OLT.2000.856626.
38. Ghosh S., Basu S., Toubia N. A. Synthesis of Low Power CED Circuits Based on Parity Codes // Proceedings of 23rd IEEE VLSI Test Symposium (VTS'05), 2005, pp. 315–320.
39. Bose B., Lin D. J. Systematic Unidirectional Error-Detection Codes // IEEE Transaction on Computers. – Vol. C-34, Nov. 1985. – Pp. 1026–1032.
40. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Самопроверяемые дискретные устройства. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
41. Ефанов Д. В. Теория и методы функционального диагностирования логических устройств железнодорожной автоматики и телемеханики на основе использования помехоустойчивых кодов с суммированием: дис. ... докт. техн. наук: 05.13.06: защищена 16.11.17: утв. 11.04.18 / Ефанов Дмитрий Викторович; [Место защиты: Петерб. гос. ун-т путей сообщ.]. – СПб., 2017. – В 2 т. Т. 1: Основное содержание работы. – 316 с. – Библиогр.: с. 290–316; Т. 2: Приложения. – 112 с.
42. Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Условия обнаружения неисправности логического элемента в комбинационном устройстве при функциональном контроле на основе кода Бергера // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 5. – С. 152–165.
43. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. The Self-Checking Concurrent Error-Detection Systems Synthesis Based on the Boolean Complement to the Bose-Lin Codes with the Modulo Value $M=4$ // Electronic Modeling. – 2021. – Vol. 43. – Issue 1. – Pp. 28–45. – DOI: 10.15407/emodel.43.01.028.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Раймундом Убаром
Поступила в редакцию 03.11.2020, принята к публикации 28.12.2020*

ЕФАНОВ Дмитрий Викторович — д-р техн. наук, доцент, заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга», профессор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ Петра Великого), профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта (МИИТ)
e-mail: TrES-4b@yandex.ru

ОСАДЧИЙ Герман Владимирович — технический директор ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга»
e-mail: osgerman@mail.ru

ЗУЕВА Марина Владимировна — программист-аналитик ООО «Ф-ЛАЙН СОФТВЕР»
e-mail: marina-seo-media@yandex.ru

© Ефанов Д. В., Осадчий Г. В., Зуева М. В., 2021

THE CHARACTERISTICS OF ERROR DETECTION BY CODES WITH THE SUMMATION OF SINGLE INFORMATION BITS IN THE RING OF RESIDUES, ACCORDING TO A GIVEN MODULUS ARE ANALYZED, WHICH ARE MANIFESTED IN THE SYNTHESIS OF BUILT-IN CONTROL CIRCUITS USING THE BOOLEAN COMPLEMENT METHOD

Efanov D.V., Dr. Sci. in Engineering

LLC STC «Kompleksnyye sistemy monitoringa», Saint Petersburg
Higher School of Transport, The Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg
Department of Automation, Remote Control, and Communication in Railway Transport of Russian University of Transport, Moscow

Osadchiy G.V.

LLC STC «Kompleksnyye sistemy monitoringa», Saint Petersburg

Zueva M.V.

LLC «F-LINE SOFTWARE», Saint Petersburg

Errors occurring in the control vectors are always detected. Unlike previous studies in this subject area, the authors focus on the features of error detection by modular sum codes in all codewords, and not just in information vectors. Previously unknown properties of error detection by modular summation codes with their classification by types (unidirectional, symmetrical and asymmetrical errors) and multiplicities have been established. Catalogs of detailed characteristics of modular sum codes are provided. The key patterns inherent in this class of codes are described.

The research results can be used in organizing built-in control circuits using the Boolean complement method, in solving other problems of technical diagnostics, where it is important to know the properties of detecting errors in code words, as well as problems of data protection and transmission.

Built-in control circuitry, operational diagnostics, Boolean complement method, summation code, Berger code, modular summation code, error detection, undetectable error, error control

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-284-314

References

1. Parkhomenko P.P., Sogomonyan E. S. (1981) Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki (optimizatsiya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnyye sredstva [*Fundamentals of technical diagnostics (optimization of diagnostic algorithms, hardware)*]). Moscow, Energoatomizdat Publ., 320 p. (In Russian)
2. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov VI.V. (1984) Diskretnyye avtomaty s obnaruzheniyem otkazov [*Discrete automata with failure detection*]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 112 p. (In Russian)
3. McCluskey E.J. (1986) *Logic Design Principles: With Emphasis on Testable Semicustom Circuits*. N.J.: Prentice Hall PTR Publ., 549 p.
4. Mikoni S.V. (1992) *Obshchiye diagnosticheskiye bazy znaniy vychislitel'nykh sistem* [*General diagnostic knowledge base of computing systems*]. Saint Petersburg, SPIIRAN Publ., 234 p. (In Russian)

5. Fujiwara E. (2006) *Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications*. John Wiley & Sons Publ., 720 p.
6. Gavrilov M.A., Ostianu V.M., Potekhin A.I. (1969, 1970) Nadezhnost' diskretnykh system [Reliability of discrete systems]. *Itogi nauki i tekhniki. Seriya «Teoriya veroyatnostey. Matematicheskaya statistika. Teoreticheskaya kibernetika» [Results of Science and Technology. Series "Theory of Probability. Math statistics. Theoretical Cybernetics"]*, pp. 7–104. (In Russian)
7. Sogomonyan Y.S., Slabakov Y.V. (1989) *Samoproveryayemyye ustroystva i otkazoustoychivyye sistemy [Self-checking devices and fail-safe system]*. Moscow, Radio i svyaz Publ., 208 p. (In Russian)
8. Berezyuk N.T., Andrushchenko A.G., Moshchitskiy S.S., Glushkov V.I., Benesha M.M., Gavrilov V.A. (1978) *Kodirovaniye informatsii (dvoichnyye kody) [Information coding (binary codes)]*. Kharkov, publishing association "Visha shkola" Publ., 252 p. (In Russian)
9. Mitra S., McCluskey E.J. (2000) Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? *Procee-directional Error Detecting Codes*. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej Publ., 111 p.
11. Matrosova A.Y., Levin I., Ostanin S.A. (2000) Self-Checking Synchronous FSM Network Design with Low Overhead. *VLSI Design*, vol. 11, iss. 1, pp. 47–58. DOI: 10.1155/2000/46578.
12. Gavrilov S.V., Gurov S.I., Zhukova T.D., Ryzhova D.I. (2016) Primeneniye teorii kodirovaniya dlya povysheniya pomekhozashchishchennosti kombinatsionnykh skhem [Application of coding theory to improve noise immunity of combinational circuits]. *Informatsionnyye tekhnologii [Information technologies]*, vol. 22, no. 12, pp. 931–937. (In Russian)
13. Tshagharyan G., Harutyunyan G., Shoukourian S., Zorian Y. (2017) Experimental Study on Hamming and Hsiao Codes in the Context of Embedded Applications. *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTs'2017)*, Novi Sad, Serbia, 2017 September 29 – October 2, pp. 25–28. doi: 10.1109/EWDTs.2017.8110065.
14. Ostanin S. (2017) Self-Checking Synchronous FSM Network Design for Path Delay Faults. *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTs'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017, pp. 696–699. doi: 10.1109/EWDTs.2017.8110129.
15. Telpukhov D.V., Demeneva A.I., Zhukova T.D., Gurov S.I. (2018) Skhema funktsional'nogo kontrolya dlya kombinatsionnykh skhem na osnove R-koda [Functional control scheme for combinational circuits based on the R-code]. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) [Problems of the development of promising micro- and nanoelectronic systems (MES)]*, no. 4, pp. 98–104. (In Russian)
16. Stempkovsky A.L., Telpukhov D.V., Zhukova T.D., Demeneva A.I., Nadolenko V.V., Gurov S.I. (2019) Sintez skhemy funktsional'nogo kontrolya na osnove spektral'nogo R-koda s razbiyeniyyem vykhodov na gruppy [Synthesis of a functional control circuit based on a spectral R-code with a division of outputs into groups]. *Mikroelektronika [Microelectronics]*, vol. 48, no. 4, pp. 284–294. (In Russian)
17. Zhukova T.D. (2020) Razrabotka sistemy avtomatizirovannogo proyektirovaniya SFK na osnove metodov izbytochnogo kodirovaniya [Development of a computer-aided design system based on redundant coding methods]. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) [Problems of the development of promising micro- and nanoelectronic systems (MES)]*, no. 4, pp. 51–57. (In Russian)
18. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Yefanov D.V. (2018) *Kody Khemminga v sistemakh funktsional'nogo kontrolya logicheskikh ustroystv [Hamming codes in functional control systems of logical devices]*. Saint Petersburg, Nauka Publ., 151 p. (In Russian)
19. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Efanov D.V. (2020) Kody s summirovaniyyem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. Tom 1: Klassicheskiye kody Bergera i ikh modi-

- fikatsii. [*Summed codes for technical diagnostic systems. Vol. 1: Classic Berger codes and their modifications*]. Moscow, Nauka Publ., 383 p. (In Russian)
20. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V. (2021) *Kody s summirovaniyem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. Tom 2: Vzveshennyye kody s summirovaniyem* [*Summed codes for technical diagnostic systems. Vol. 2: Weighted codes with summation*]. Moscow, Nauka Publ., 455 p. (In Russian)
 21. Slabakov E. V. (1979) Postroyeniye polnost'yu samoproveryayemykh kombinatsionnykh ustroystv s ispol'zovaniyem ostatochnykh kodov [Construction of fully self-checking combinational devices using residual codes]. *Avtomatika i telemekhanika* [*Automation and Remote Control*], no. 10, pp. 133–141. (In Russian)
 22. Das D., Toubia N. A. (1999) Synthesis of Circuits with Low-Cost Concurrent Error Detection Based on Bose-Lin Codes. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, vol. 15, iss. 1–2, pp. 145–155. DOI: 10.1023/A:1008344603814.
 23. Sapozhnikov V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. (2015) Modular Sum Code in Building Testable Discrete Systems. *Proceedings of 13th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2015)*, Batumi, Georgia, September 26–29, 2015, pp. 181–187. doi: 10.1109/EWDTS.2015.7493133.
 24. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. (2015) Primeneniye modul'nykh kodov s summirovaniyem dlya postroyeniya sistem funktsional'nogo kontrolya kombinatsionnykh logicheskikh skhem [*The use of modular summation codes for the construction of functional control systems for combinational logic circuits*]. *Avtomatika i telemekhanika* [*Automation and Remote Control*], no. 10, pp. 152–169. (In Russian)
 25. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V., Cherepanova M. R. (2016) Modul'nyye kody s summirovaniyem v sistemakh funktsional'nogo kontrolya. I. Svoystva obnaruzheniya oshibok kodami v informatsionnykh vektorakh [Modular codes with summation in functional control systems. I. Properties of error detection by codes in information vectors]. *Elektronnoye modelirovaniye* [*Electronic simulation*], vol. 38, no. 2, pp. 27–48. (In Russian)
 26. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V., Cherepanova M. R. (2016) Modul'nyye kody s summirovaniyem v sistemakh funktsional'nogo kontrolya. II. Umen'sheniye strukturnoy izbytochnosti sistem funktsional'nogo kontrolya [Modular codes with summation in functional control systems. II. Reducing structural redundancy of functional control systems]. *Elektronnoye modelirovaniye* [*Electronic simulation*], vol. 38, no. 3, pp. 47–61 (In Russian)
 27. Gessel M., Morozov A. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. (2003) Logicheskoye dopolneniye – novyy metod kontrolya kombinatsionnykh skhem [Logic complement – a new method of control of combinational circuits]. *Avtomatika i telemekhanika* [*Automation and Remote Control*], no. 1, pp. 167–176. (In Russian)
 28. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Morozov A., Goessel M., Osadchy G. V. (2004) Design of totally self-checking combinational circuits by use of complementary circuits. *Proceedings of 2th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2004)*, Crimea, Ukraine, September 15–17, 2004, pp. 83–87.
 29. Goessel M., Morozov A., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. (2005) Kontrol' kombinatsionnykh skhem metodom logicheskogo dopolneniya [Control of combinational circuits by the logical complement method]. *Avtomatika i telemekhanika* [*Automation and Remote Control*], no. 8, 161–172. (In Russian)
 30. Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. (2008) *New Methods of Concurrent Checking*. 1st ed. Dordrecht, Springer Science+Business Media B. V. Publ., 184 p.
 31. Sen S. K. (2010) A Self-Checking Circuit for Concurrent Checking by 1-out-of-4 code with Design Optimization using Constraint Don't Cares. *National Conference on Emerging trends*

- and advances in Electrical Engineering and Renewable Energy (NCEEERE 2010)*, Sikkim Manipal Institute of Technology, Sikkim, held during 22–24 December, 2010.
32. Das D. K., Roy S. S., Dmitriev A., Morozov A., Gössel M. (2012) Constraint Don't Cares for Optimizing Designs for Concurrent Checking by 1-out-of-3 Codes. *Proceedings of the 10th International Workshops on Boolean Problems*, Freiberg, Germany, September, pp. 33–40.
 33. Pivovarov D. V. (2017) Organizatsiya sistem funktsional'nogo kontrolya kombinatsionnykh logicheskikh skhem na osnove metoda logicheskogo dopolneniya po ravnovesnomu kodu "1 iz 5" [Organization of systems of functional control of combinational logic circuits based on the method of logical complement according to the equilibrium code "1 out of 5"]. *Avtomatika na transporte [Automation on Transport]*, vol. 3, no. 4, pp. 605–624. (In Russian)
 34. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov V.I., Osadchy G., Pivovarov D. (2019) Self-Dual Complement Method up to Constant-Weight Codes for Arrangement of Combinational Logical Circuits Concurrent Error-Detection Systems. *Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019)*, Batumi, Georgia, September 13–16, 2019, pp. 136–143. doi: 10.1109/EWDTS.2019.8884398.
 35. Saposhnikov V.I., Dmitriev A., Goessel M., Saposhnikov V.V. (1996) Self-Dual Parity Checking – a New Method for on Line Testing. *Proceedings of 14th IEEE VLSI Test Symposium*, USA, Princeton, pp. 162–168.
 36. Berger J. M. (1961) A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels. *Information and Control*, vol. 4., iss. 1, pp. 68196173. DOI: 10.1016/S0019–9958 (61)80037–5.
 37. Morozov A., Saposhnikov V.V., Saposhnikov V.I., Goessel M. (2000) New Self-Checking Circuits by Use of Berger-codes. *Proceedings of 6th IEEE International On-Line Testing Workshop*, Palma De Mallorca, Spain, 3–5 July 2000, pp. 171–176. doi: 10.1109/OLT.2000.856626.
 38. Ghosh S., Basu S., Toubia N.A. (2005) Synthesis of Low Power CED Circuits Based on Parity Codes. *Proceedings of 23rd IEEE VLSI Test Symposium (VTS'05)*, pp. 315–320.
 39. Bose B., Lin D. J. (1985) Systematic Unidirectional Error-Detection Codes. *IEEE Transaction on Computers*, vol., C-34, November 1985, pp. 1026–1032.
 40. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. (1992) *Samoproveryayemyye diskretnyye ustroystva [Self-checking discrete devices]*. Saint Petersburg, Energoatomizdat Publ., 224 p. (In Russian)
 41. Efanov D. V. (2017) *Teoriya i metody funktsional'nogo diagnostirovaniya logicheskikh ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki na osnove ispol'zovaniya pomekhoustoychivyykh kodov s summirovaniyem [Theory and methods of functional diagnostics of logic devices in railway automation and telemechanics based on the use of noise-immune codes with summation]*. Dissertation of Doctor of Technical Sciences: 05.13.06, defended on 16.11.17, appr. 04.11.18. In two volumes: vol. 1: The main content of the work, 316 p., references pp. 290–316; vol. 2: Additions, 112 p. (In Russian)
 42. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V.I. (2017) Usloviya obnaruzheniya neispravnosti logicheskogo elementa v kombinatsionnom ustroystve pri funktsional'nom kontrole na osnove koda Bergera [Conditions for detecting a logical element fault in a combination device under concurrent checking based on Berger's code]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and Remote Control]*, no. 5, pp. 152–165. (In Russian)
 43. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V.I. (2021) The Self-Checking Concurrent Error-Detection Systems Synthesis Based on the Boolean Complement to the Bose-Lin Codes with the Modulo Value $M=4$. *Electronic Modeling*, vol. 43, iss. 1, pp. 28–45. DOI: 10.15407/emodel.43.01.028.

УДК 378:004.056

А. Е. Водясов

Д. М. Кирюхин

В. Г. Сидоренко, докт. техн. наук

ООО «СЕК-КОНСАЛТ СЕРВИСЕЗ»

Кафедра управления и защиты информации,

Российский университет транспорта, Москва

ОПЫТ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ

В условиях пандемии роль специалистов в области компьютерной безопасности при решении задач бесперебойной работы транспортных предприятий возросла многократно. Статья посвящена подведению итогов и анализу опыта, накопленного в РУТ (МИИТ) за 20 лет подготовки специалистов по специальности «Компьютерная безопасность», определению перспектив развития образовательной программы. Представлена методика использования свободно распространяемого программного обеспечения, созданного авторами статьи, в процессе обучения, когда оно невозможно или небезопасно на реальных объектах. Основное преимущество методики в том, что она учитывает опыт, полученный специалистами при решении реальных кейсов, позволяет воспроизводить без вреда для реальных систем в учебных целях уязвимости систем, дает возможность диагностировать эти уязвимости, эксплуатировать их, выбирать и сравнивать различные пути их удаления из системы. Статья содержит анализ публикаций, посвященных опыту подготовки кадров по специальности «Компьютерная безопасность» в разных странах с использованием различных инструментов. Дан обзор образовательной программы и сформулированы принципы, положенные в основу подготовки в Российском университете транспорта. Продемонстрированы примеры применения цифровых двойников в процессе обучения, сделан акцент на формировании междисциплинарных связей, навыков применения теоретических знаний для решения практических задач и анализа полученных результатов. Выполнен обзор тем дисциплины «Методы анализа управления рисками», статистический анализ результатов практической реализации разработанной авторами методики, их графическая интерпретация. Показаны варианты применения теории рисков к решению задач компьютерной безопасности. Статья содержит примеры участия обучающихся в исследовательской деятельности, создании методического обеспечения соответствующей образовательной программы, различных мероприятиях вне стен университета.

Компьютерная безопасность, подготовка кадров, цифровой двойник, уязвимость, риск

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-315-335

Введение

В настоящее время в соответствии со Стратегией развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы и программой «Цифровая экономика Российской Федерации» в государственных компаниях, в т. ч. ОАО «РЖД», активно внедряются новые информационные технологии, что повышает актуальность решения задач компьютерной безопасности (КБ).

Разработанные Минкомсвязи России методические рекомендации по переходу на отечественное программное обеспечение сейчас апробируются в ОАО «РЖД» и других ведущих госкомпаниях страны. Холдинг в тесном сотрудничестве с разработчиками тестирует созданные в рамках реализации стратегии импортозамещения программные продукты и платформы для ведения электронного документооборота, управления данными и т. д. Разработчики отечественного программного обеспечения должны при внедрении учитывать возможные риски, связанные с непрерывностью технологического цикла на сети, а также количество пользователей — сотрудников компании, партнеров и контрагентов «РЖД» [1]. В соответствии с концепцией «Цифровая железная дорога» в рамках создания Комплексной системы обеспечения безопасности населения на транспорте в условиях пандемии холдинг обеспечил бесперебойную удаленную работу тысячам сотрудников компании с помощью специальных средств защиты информации от несанкционированного доступа. Специалисты в области компьютерной безопасности, получившие соответствующее образование в стенах Российского университета транспорта, принимают активное участие в этой работе [2].

Обучение студентов по специальности «Компьютерная безопасность» началось в университете в 2001 году. Приближающееся 20-летие с начала подготовки по специальности требует подведения итогов и определения перспектив развития образовательной программы (ОП).

Целью статьи является представление уникальной методики использования для подготовки специалистов по компьютерной безопасности свободно распространяемого программного обеспечения (ПО), созданного авторами статьи, в случаях, когда это невозможно делать на реальных объектах. ПО позволяет симулировать уязвимости компьютерных систем и их реакцию на воздействие различных инструментов. Применение этого ПО в учебном процессе позволяет формировать навыки и умения тестирования безопасности компьютерных систем и повышения их защищенности. Основное преимущество методики в том, что она учитывает опыт, полученный специалистами при решении реальных кейсов, позволяет воспроизводить без вреда для реальных систем в учебных целях уязвимости систем, дает возможность диагностировать эти уязвимости, эксплуатировать их и выбирать пути их удаления из системы. В случае неудачи у учащихся всегда есть шанс испробовать другой путь и достичь цели. Многие задачи имеют несколько путей решения, что позволяет сравнить их и выбрать рациональный вариант. Делать это в реальных системах небезопасно.

Уникальность методики и ее отличие состоит в использовании постоянно обновляемого ПО, которое учитывает новейшую информацию об уязвимостях компьютерных систем и опыт разработчиков в их преодолении. Это программное обеспечение можно рассматривать в качестве тренажера для специалиста по КБ. Широкий спектр задач разного уровня сложности и направленности и необходимость подготовки развернутого отчета по результатам выполнения

заданий позволяют закрепить теоретические знания и выстроить логические связи. Это определяет положительный эффект от внедрения методики.

Множество работ посвящено анализу опыта подготовки специалистов по КБ на разных уровнях образования [3] — как в нашей стране [4], так и за рубежом [5–10]. В работах [11–16] рассматриваются методики организации обучения, в т. ч. на производстве [17]. Во многих из них показаны аспекты применения цифровых двойников для решения задач и эффективность такого подхода [18–21].

Принципы организации подготовки кадров для обеспечения КБ транспортной отрасли

В связи с изменением федеральных государственных образовательных стандартов и учетом накопленного опыта подготовки специалистов и требований работодателей учебный план по специальности неоднократно менялся. В настоящее время подготовка ведется в соответствии со стандартом высшего образования РУТ (МИИТ) (самостоятельно утверждаемым образовательным стандартом) по специальности 10.05.01 — «Компьютерная безопасность».

В основу создания ОП заложены принципы, направленные на формирование у учащихся следующих компетенций, знаний, навыков, умений и опыта:

- компетенций специалиста по КБ широкого профиля;
- знаний об особенностях организации технологических процессов и бизнес-процессов в транспортной отрасли, учитываемых при решении задач обеспечения КБ;
- навыков применения теоретических знаний и междисциплинарных связей;
- компетенций тестирования безопасности компьютерных систем и повышения их защищенности;
- навыков и умений с использованием технологий «виртуальных машин» и свободно распространяемого ПО — web-площадок для тестирования web-уязвимостей;
- опыта участия в олимпиадах, соревнованиях по КБ, в частности, формата *Capture the flag (CTF)*, международных проектах;
- опыта публикационной деятельности.

Эти принципы на протяжении многих лет доказали свою состоятельность и позволили нашим выпускникам реализовать себя в профессиональной сфере. Остановимся подробнее на каждом.

Формирование компетенций специалиста широкого профиля

Действующие образовательные стандарты в области КБ опираются на профессиональные стандарты в следующих областях: «Связь, информационные и ком-

муникационные технологии» и «Обеспечение безопасности». Это определяет требования к выпускникам — специалистам широкого профиля, обладающим компетенциями в области системного анализа, программирования, тестирования, информационных технологий, технической поддержки и администрирования информационно-коммуникационных систем, защиты информации в телекоммуникационных системах и сетях, автоматизации информационно-аналитической деятельности в сфере безопасности компьютерных систем и сетей, защиты информации в автоматизированных системах, технической защиты информации, обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак.

Формирование соответствующих компетенций возможно в ходе изучения широкого спектра дисциплин математического цикла, разносторонней подготовки в области информационных технологий, общей инженерной и узкоспециальной подготовки. Успешное решение задач КБ в транспортной отрасли базируется на знаниях о соответствующих объектах информатизации: автоматизированных информационно-управляющих системах, технологических процессах, бизнес-процессах. Эти разделы также нашли отражение в учебном плане. Выпускающая кафедра «Управление и защита информации» является одной из ведущих в университете в области автоматизации и цифровизации на транспорте. Предполагается расширение элементов образовательной программы, связанных с изучением математического аппарата и практической реализации систем машинного обучения и искусственного интеллекта для решения профессиональных задач.

Формированию междисциплинарных связей, навыков применения теоретических знаний, полученных в рамках одних дисциплин, для решения практических задач способствует реализация стратегии «виртуальной» кафедры, в соответствии с которой к подготовке кадров привлекаются ведущие специалисты с разных кафедр РУТ (МИИТ) и высококвалифицированные специалисты — руководители и (или) работники организаций в сфере КБ, в т. ч. наши выпускники.

Теоретическое обучение подкрепляется практическим в виде лабораторных и практических занятий, большого числа практик. При подготовке специалистов используется материально-техническое обеспечение как выпускающей, так и других кафедр университета.

Формирование компетенций тестирования безопасности компьютерных систем

Авторы подготовили программу дисциплины «Методы анализа управления рисками» и реализовали ее на практике. Программа включает в себя темы, связанные непосредственно с управлением рисками в области КБ, анализом защищенности информационных систем, а именно:

— этические аспекты решения задач обеспечения КБ, в рамках которой определяется взаимосвязь таких элементов КБ, как безопасность, удобство пользования и функциональность, даются классификации хакеров и атак, проводится сравнение таких процедур, как анализ защищенности, тестирование на проникновение, поиск уязвимостей [22];

— *web*-уязвимости — проводится анализ уязвимостей, входящих в список *OWASP TOP-10*, анализируется динамика изменения этого списка;

— рекогносцировка — дается определение понятия, определяются ее цели и роль в тестировании на проникновение, проводится классификация этого действия и средств его реализации;

— сканирование сайтов — определяется понятие «сканирование сайтов» и его роль в анализе защищенности, проводится классификация этого действия и средств его реализации;

— *SQL*-инъекции — рассматриваются методы несанкционированного получения информации из баз данных;

— эксплуатация уязвимостей — проводится классификация уязвимостей и средств их эксплуатации;

— закрепление доступа — определяются цели закрепления доступа, рассматриваются реальные кейсы и инструменты реализации закрепления доступа;

— повышение привилегий — рассматриваются методы и инструменты реализации повышения привилегий в различных операционных системах и их дальнейшая эксплуатация;

— сетевые атаки — классифицируются атаки — перехваты сеансов связи по уровням, рассматриваются методы реализации атак, инструменты перехвата трафика, меры противодействия и выявления;

— безопасность беспроводных сетей — рассматриваются основные способы компрометации таких сетей и методы защиты;

— безопасность мобильных приложений — анализируется безопасность мобильных приложений для операционных систем Android и iOS, изучаются механизмы защиты мобильных устройств;

— бинарные уязвимости — рассматриваются способы обнаружения и устранения уязвимостей программного обеспечения, связанных с переполнением буфера памяти;

— проприетарные протоколы и автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) — рассматриваются инструменты оценки безопасности АСУ ТП и их элементов;

— социальная инженерия — дается определение понятия «социальная инженерия», определяются ее цели, типы и роль в тестировании на проникновение, дается психологическое обоснование нейролингвистического программирования, раскрываются тактики и стратегии получения информации у «жертвы», реализация задач через социальные сети, определяются риски социальных се-

тей и кражи личности, демонстрируются методы противодействия социальной инженерии;

– введение в стеганографию, стеганоанализ и форензику (компьютерную криминалистику) — анализируются методы и инструменты сокрытия информации в файлах медиа-контента и других каналах связи;

– введение в криптографию — разбираются основные виды атак на современные алгоритмы хеширования и шифрования;

– подготовка отчетов — обучающиеся знакомятся с основными принципами подготовки отчетов о выполненной работе, позволяющих дать заказчику наиболее полную и хорошо структурированную информацию о действиях, выполненных в целях обеспечения КБ.

Темы, связанные с общей теорией управления рисками, а именно:

– анализ стандартов, регламентирующих управление рисками;

– анализ методов управления рисками, применяемых в различных отраслях экономики — обучающиеся выполняют кейсы по применению этих методов к анализу и управлению отдельными типами рисков КБ.

В ходе изучения дисциплины «Методы анализа управления рисками» выполняется большое количество практических заданий с использованием виртуальных машин и web-площадок (киберполигонов, цифровых двойников, тренажеров) для тестирования web-уязвимостей (например *itsecgames.com/*, *xss-game.appspot.com/*, *107.152.36.140:8000/*, *alexbers.com/sql/*). Выпускники университета принимают участие в создании этих инструментов. После решения поставленных задач обучающиеся оформляют отчеты, в которых подробно описывают алгоритм решения задач.

Таким образом, студенты учатся выявлять скрытую информацию, занимаются криптоанализом, анализируют вредоносное программное обеспечение, изучают архитектуру и функционирование компьютерных сетей, овладевают следующими навыками: сбор чувствительной информации о цели, поиск уязвимостей в программном обеспечении и web-сайтах, автоматизация процессов, проведение атаки на компьютерную систему.

Выполнение лабораторной работы «Рекогносцировка» включает в себя получение навыков по применению инструментов поиска поддоменов, определение структуры доменов ВУЗов и выявление уязвимостей, связанных с несовершенством этой структуры.

Выполнение лабораторной работы «Сканирование сайта» включает в себя формирование навыков по применению инструментов сканирования сайтов и выбору настроек этих инструментов в зависимости от поставленных задач с целью получения информации о настройках и состоянии его портов, об используемом программном обеспечении.

Выполнение лабораторной работы «XSS-games» включает в себя получение навыков XSS-инъекции, т. е. тестирования возможности несанкционированного доступа на сайты.

Выполнение лабораторной работы «SQL-инъекции» включает в себя получение навыков тестирования возможности несанкционированного доступа к информации, хранящейся в базах данных.

Выполнение лабораторных работ «Samba» и «Priv.Esc» включает в себя получение навыков тестирования возможности несанкционированного управления удаленной машиной, ее сканирования, выявления уязвимостей и доступа к информации, хранящейся на ней.

Выполнение лабораторной работы «Стеганография» включает в себя получение навыков обнаружения скрытой информации в стегоконтейнерах различной природы (графических, текстовых и аудиофайлах).

В настоящее время множество заданий лабораторного практикума расширяется путем включения задач по стегоанализу, анализу бинарных уязвимостей и безопасности мобильных приложений.

Анализ результатов лабораторного практикума, который предполагает выполнение лабораторных работ по нескольким направлениям и решение нескольких десятков задач по перечисленным темам, включает в себя классификацию результатов выполнения лабораторного практикума по различным признакам: типам выявленных уязвимостей (рис. 1), типам рисков, связанных с выявленными уязвимостями (рис. 2), способам преодоления выявленных уязвимостей и рисков (рис. 3).

В ходе выполнения заданий обучающиеся познакомились почти с 20 типами инструментов самого разного назначения, применяемых для решения задач обеспечения КБ (рис. 4).

Выбор инструментов учащимися был весьма разнообразным. В среднем для каждого типа инструментов рассматривались три конкретные реализации (рис. 5).

Интерес представляет выбор нескольких задач для выполнения из множества. Например, при решении задач сканирования из возможных 87 вариантов флагов 32 человека выбрали только 26 (рис. 3). В среднем каждый обучающийся рассмотрел 6 флагов, из них каждый рассматривался пятью обучающимися. Особой популярностью пользовались флаги, позволяющие исследовать открытые порты для определения информации о службе/версии, определить операционную систему, отслеживать путь к хосту.

Во время лабораторного практикума учащиеся интегрировали знания, полученные по дисциплинам различных циклов, работали с разными видами информации. Применение знаний, полученных в дисциплинах математического цикла, теории информации и управления позволяет находить логические связи между различными уязвимостями, инцидентами и рисками. Владение основными положениями теории управления рисками, а именно знание стандартов и умение применять на практике методы управления рисками, позволили решать задачи анализа и управления рисками КБ, выявленными в ходе выполнения лабораторного практикума (рис. 6).

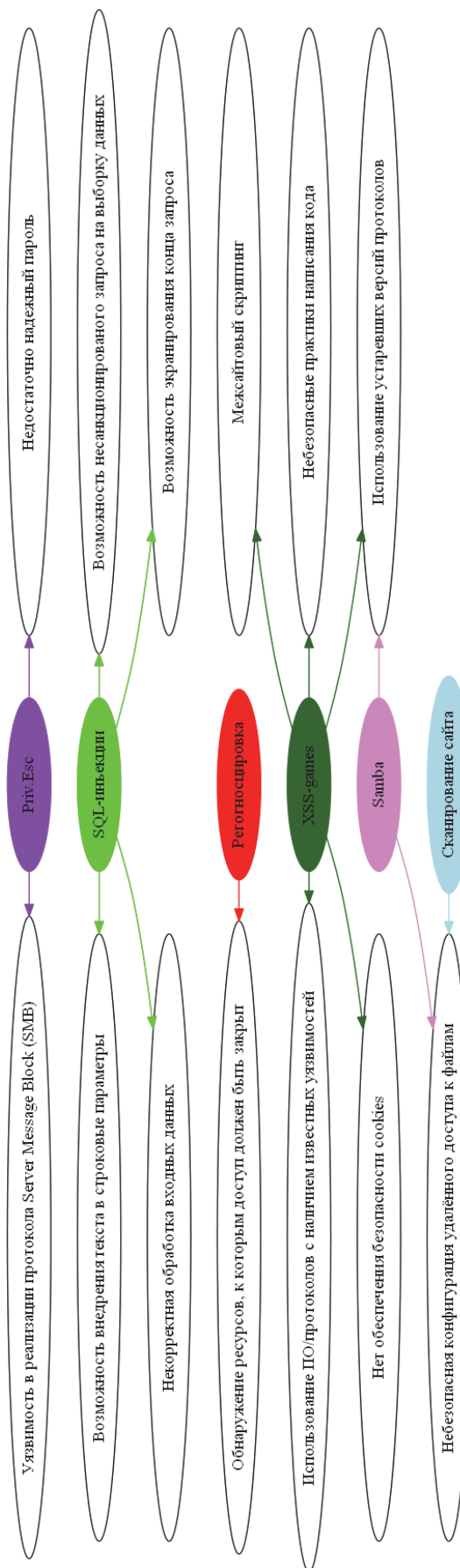


Рис. 1. Типы выявленных уязвимостей

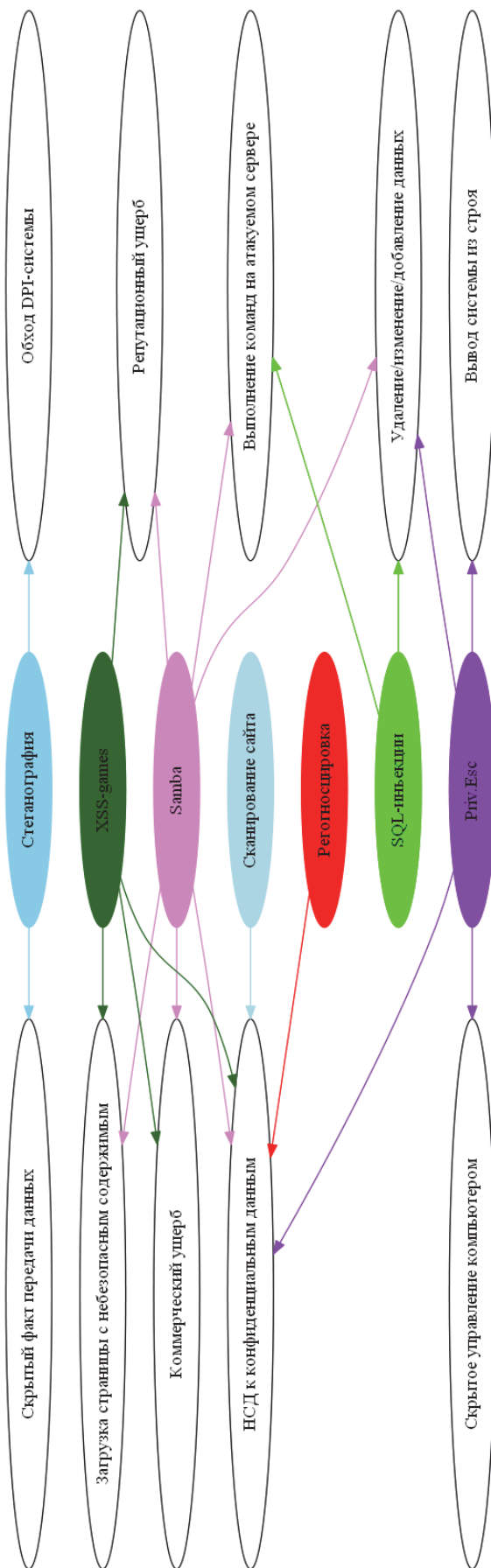


Рис. 2. Типы рисков, связанных с выявленными уязвимостями



Рис. 4. Применение различных типов инструментов в ходе лабораторного практикума



Рис. 5. Использование вариантов реализации инструментов различных типов в ходе лабораторного практикума (1 — язык программирования, 2 — база данных уязвимостей, 3 — криптоаналитический пакет, 4 — пакет для анализа стегоконтейнеров, 5 — эмулятор аппаратного обеспечения, 6 — инструменты *Windows*, 7 — *web*-площадка для тестирования *web*-уязвимостей, 8 — загрузчик текста, 9 — обработчик изображений, 10 — интерпретатор, 11 — видео- и аудиоплеер, 12 — компилятор, 13 — декодер, 14 — реверс текста, 15 — онлайн-ресурс, 16 — перебор паролей, 17 — создание, тестирование и использование эксплоитов, 18 — сканер *IP*-сетей, 19 — перечисление поддоменов *web*-сайта, 20 — тип «Поисковая система, 21 — *HEX*-редактор, 22 — анализатор спектра, 23 — операционная система)

Взаимодействие кафедры с компанией, которая напрямую решает задачи информационной безопасности, позволяет восполнить нехватку практического опыта у студентов. Они получают доступ к заданиям, которые моделируют реальные ситуации и кейсы.

Методика позволяет дать более широкое представление о направлениях КБ, выделить из них интересные для студентов и детально показать, чем занимается то или иное направление, решить множество задач, возникающих в повседневной жизни. Такой опыт поможет специалистам чувствовать себя более уверенно в своей области, находить решения в сложных ситуациях, даст хорошую базу для дальнейшего развития.

Среди прослушавших данный учебный курс проводились опросы. Было выявлено, что большинство теоретических знаний получило практическое под-

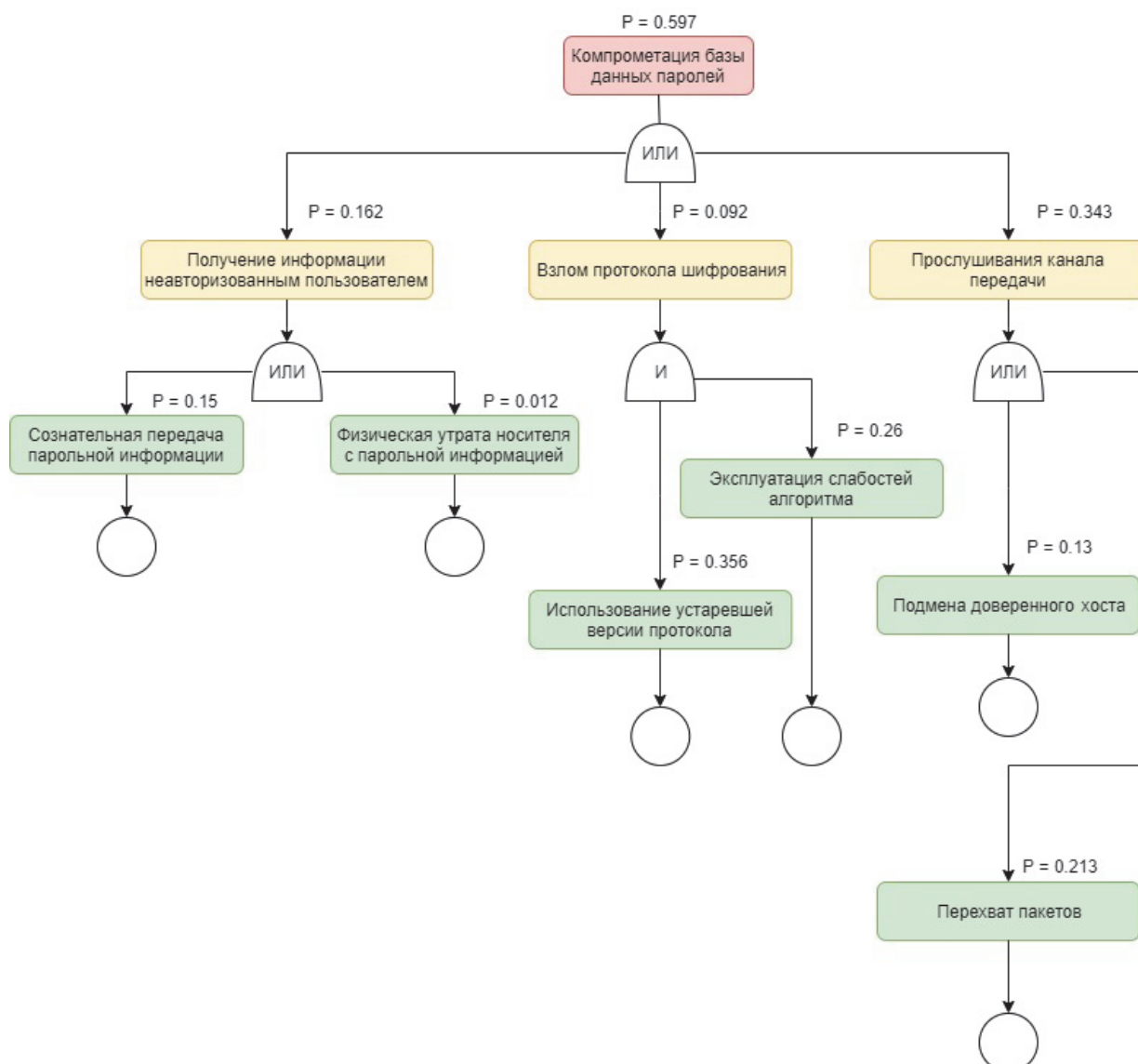


Рис. 6. Пример применения метода «Анализ дерева неисправности» (FTA) для анализа уязвимости «Разглашение конфиденциальных данных»

крепление в форме решения разнообразных задач. Обучающиеся смогли детально понять направления, на которые разделяется КБ, и впоследствии попасть на стажировки и курсы в компании, работающие в этой сфере.

Участие студентов в олимпиадах, соревнованиях, международных проектах и публикационной деятельности

Отчеты учащихся о результатах индивидуальных заданий по дисциплине «Методы анализа управления рисками», выполненных в весеннем семестре 2019–2020 учебного года и содержащие презентации, визуальные элементы и анализ статистики, нашли применение в учебном процессе. Они размещены на сервере

дистанционного обучения Института транспортной техники и систем управления РУТ (МИИТ), который дает доступ к широкому спектру методических материалов и электронных курсов, разработанных преподавателями университета.

Примерами такого эффективного использования результатов (в т. ч. выпускной квалификационной работы) стали издания, посвященные различным проблемам КБ [23–27].

Обучающиеся активно участвуют в олимпиадах по информационной и компьютерной безопасности, соревнованиях формата СТФ, конференциях и тематических форумах (рис. 7), печатаются в научных изданиях [28–31]. Студенты активно сотрудничают с Университетом прикладных наук в немецком городе Аугсбурге.

Заключение

Практическое воплощение сформулированных в статье принципов позволит реализовать подготовку востребованных на рынке труда специалистов КБ широкого профиля, которые:

— умеют применять фундаментальные знания, чтобы выявлять и выбирать пути решения профессиональных проблем и задач, анализировать результаты этого решения;



Рис. 7. Обучающиеся РУТ (МИИТ) на одном из форумов

— владеют навыками тестирования компьютерных систем с использованием современного программного, информационного и технического обеспечения в рамках правового поля и норм профессиональной этики;

— обладают знаниями об особенностях организации технологических процессов и бизнес-процессов в транспортной отрасли;

— имеют фундамент для профессионального роста и реализации концепции непрерывного образования, предполагающих развитие не только в прикладной, но и в научной, международной и педагогической сферах.

Эффективное использование всех возможностей университета с целью реализации крайне важной для транспортной отрасли образовательной программы по компьютерной безопасности, тесная связь с производством («предметной областью»), близкое знакомство с объектами информатизации, безопасность которых предстоит обеспечивать — вот отличительные черты подготовки кадров в РУТ (МИИТ).

В поддержку сказанного стоит отметить, что темы выпускных квалификационных работ учащихся отражают многообразие объектов информатизации не только в транспортной, но и в других отраслях экономики, и современных методов, применяемых для обеспечения информационной безопасности, а также технических и программных средств. Выполнение ВКР предполагает построение соответствующих математических моделей или применение методов системного анализа.

Выпускники востребованы в различных сферах экономики, проходят практику и трудоустраиваются в такие организации, как ГВЦ ОАО «РЖД», «Информзащита», «Лаборатория Касперского», ОАО «НИИАС», «ИБТранс», ООО «СЕК-Консалт Сервисез», другие коммерческие и государственные структуры.

По информации Всемирной организации здравоохранения, за время пандемии число кибератак возросло в несколько раз [32], что способствует повышению востребованности выпускников специальности КБ на рынке труда. Это подтверждают и данные сайтов по поиску работы и сотрудников (например *hh.ru*). Согласно этим данным, количество вакансий превышает число бюджетных мест, на которое осуществлялся набор в вузы в этом году на соответствующие специальности. Можно предполагать, что в предстоящие годы спрос на специалистов в области КБ будет расти. Требования к их квалификации будут становиться все более высокими. Следовательно, высшие учебные заведения должны соответствовать новым вызовам и постоянно совершенствовать ОП. Изложенные в статье принципы позволяют это воплотить, что подтверждается многолетней практикой подготовки кадров для обеспечения КБ транспортной отрасли.

Библиографический список

1. Огородников Е. Кибербезопасность «Российских железных дорог» обеспечат отечественные разработчики [Электронный ресурс]. – 2020. Режим доступа: <https://expert>.

- ru/2020/06/19/kiberbezopasnost-rossijskih-zheleznyih-dorog-obespechat-otchestvennyie-razrabotchiki/
2. Покровская И. Защитники информации [Электронный ресурс]. – 2020. Режим доступа: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1504600&archive=2020.05.21>
 3. Белова И. В. Совершенствование подготовки специалистов по прикладной информатике в области информационной безопасности (уровень среднего профессионального образования) // Казанская наука. – 2012. – № 9. – С. 191–193.
 4. Анурьева М. С. Современная система образования в области информационной безопасности в Российской Федерации // Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные науки. – 2018. – Т. 23. – № 173. – С. 111–120.
 5. Анурьева М. С. Научный базис сравнительного анализа программ подготовки специалистов по информационной безопасности в разных странах // Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные науки. – 2018. – Т. 23. – № 171. – С. 90–97.
 6. Crick T., Davenport J., Irons A., Prickett T. A UK Case Study on Cybersecurity Education and Accreditation // Conference: 2019 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE). – October 2019. – DOI: 10.1109/FIE43999.2019.9028407.
 7. Martti Lehto. Cyber security capacity building – cyber security education in Finnish universities // Proceedings of the 19th European Conference on Cyber Warfare and Security. – UK. – 2020. – DOI: 10.34190/EWS.20.112.
 8. Kessler G. C., Ramsay J. D. A Proposed Curriculum in Cybersecurity Education Targeting Homeland Security Students // Proceedings of the 47th Hawaii International Conference on System Sciences. – HI. – 2014. – Pp. 4932–4937. – DOI: 10.1109/HICSS.2014.605.
 9. Frankie E Catota, M Granger Morgan, Douglas C Sicker Cybersecurity education in a developing nation: the Ecuadorian environment // Journal of Cybersecurity, Volume 5, Issue 1, 2019, tyz001, [Электронный ресурс]. – 2020. Режим доступа: <https://doi.org/10.1093/cybsec/tyz001>.
 10. Furnell S., K M., Piper F., E C., H C., Ensor C. A National Certification Programme for Academic Degrees in Cyber Security // Information Security Education – Towards a Cybersecure Society. WISE 2018. IFIP Advances in Information and Communication Technology, Springer, Cham. – 2018. – Vol 531. [Электронный ресурс]. – 2020. Режим доступа: https://doi.org/10.1007/978-3-319-99734-6_11.
 11. Мовчан И. Н. Проблемы подготовки специалистов в области информационной безопасности // Открытое образование. – 2013. – № 5 (100). – С. 78–80.
 12. Козлов О. А., Симонова И. В., Бочаров М. И. Модели обучения информационной безопасности // Материалы международной научно-практической конференции «Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий». – 2013. – Т. 1. – С. 28–30.
 13. Huang Z., Shen C., Doshi S., Thomas N., Duong H. Cognitive Task Analysis Based Training for Cyber Situation Awareness // Information Security Education Across the Curriculum. WISE 2015. IFIP Advances in Information and Communication Technology. – Springer, Cham. – 2015. – Vol. 453. [Электронный ресурс]. – 2020. Режим доступа: https://doi.org/10.1007/978-3-319-18500-2_3.
 14. Fatcher L., Van Niekerk J. Towards a Pervasive Information Assurance Security Educational Model for Information Technology Curricula // Information Assurance and Security Education and Training. – Pp. 164–171.
 15. Švábenský V., Vykopal J., Celeda P. What Are Cybersecurity Education Papers About? – A Systematic Literature Review of SIGCSE and ITiCSE Conferences. – 2019. [Электронный ресурс]. – 2020. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1911.11675.pdf>

16. Moore E., Likarish D. (2015) A Cyber Security Multi Agency Collaboration for Rapid Response that Uses AGILE Methods on an Education Infrastructure. In: Bishop M., Miloslavskaya N., Theocharidou M. (eds) Information Security Education Across the Curriculum. WISE 2015. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 453. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-18500-2_4.
17. Bada M., Nurse J. R. C. Developing cybersecurity education and awareness programmes for small- and medium-sized enterprises (SMEs) // Information and Computer Security. – Vol. 27. № 3. – Pp. 393–410. – DOI: 10.1108/ICS-07-2018-0080.
18. Charalambos K. Cyber-Physical Systems Security Education Through Hands-on Lab Exercises // IEEE Design & Test. – 2020. – Pp. 1–1. – DOI: 10.1109/MDAT.2020.3005365.
19. Davidson A., Javier de La Puente Martinez, Huber M. A SWOT Analysis of Virtual Laboratories for Security Education // Information Assurance and Security Education and Training. – Pp. 233–240.
20. Sauer F., Niedermaier, M., Kießling S., Merli D. LICSTER – A Low-cost ICS Security Testbed for Education and Research.. (2019). [Электронный ресурс]. – 2020. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1910.00303.pdf>.
21. Киберучения на «цифровом двойнике» инфраструктуры: оценка реальных рисков для бизнеса [Электронный ресурс]. – 2020. Режим доступа: <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/knowledge-base/kiberucheniya-na-cifrovom-dvojnike-infrastruktury-ocenka-realnyh-riskov-dlya-biznesa>.
22. Bustard J. D. Improving Student Engagement in the Study of Professional Ethics: Concepts and an Example in Cyber Security // Sci Eng Ethics 24. – 2018. – Pp. 683–698. [Электронный ресурс]. – 2020. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s11948-017-9904-4>.
23. Изычева А. В., Сидоренко В. Г. Стеганографические методы защиты информации: учебное пособие. – М.: МИИТ, 2017. – 76 с.
24. Воронина Е. Г., Сидоренко В. Г. Генераторы случайных чисел: учебное пособие. – М.: РУТ (МИИТ), 2018. – 80 с.
25. Арцыбашева А. А., Козлов А. А., Сидоренко В. Г. Анализ подлинности изображения: учебное пособие. – М.: РУТ (МИИТ), 2018. – 106 с.
26. Скоробогатова Н. Н., Сидоренко В. Г. Аспекты информационной безопасности: учебное пособие. – М.: РУТ (МИИТ), 2018. – 80 с.
27. Замолоцких В. С., Сидоренко В. Г. Применение теории графов для анализа социальных сетей: учебное пособие. – М.: РУТ (МИИТ), 2020. – 74 с.
28. Замолоцких В. С., Сидоренко В. Г. Киберугрозы в социальных сетях // Информатизация образования и науки. – 2020. – № 4 (48). – С. 66–75.
29. Водясов А. Е., Сидоренко В. Г. Анализ проблемы обеспечения безопасности смарт-контрактов // Сборник материалов II международной научно-практической конференции «Цифровая трансформация в экономике транспортного комплекса. Развитие цифровых экосистем: наука, практика, образование». – М.: РУТ (МИИТ), 2020. – С. 66–70.
30. Кирюхин Д. М. Анализ проблематики реализации требований по информационной безопасности к объектам критической информационной инфраструктуры Российской Федерации в транспортной отрасли // Сборник материалов II международной научно-практической конференции «Цифровая трансформация в экономике транспортного комплекса. Развитие цифровых экосистем: наука, практика, образование». – М.: РУТ (МИИТ), 2020. – С. 148–151.
31. Павлов Н. А. Биометрические методы аутентификации: основные понятия, механизмы, надежность и актуальность в сфере транспорта // Сборник материалов II-ой международной научно-практической конференции «Цифровая трансформация в экономике

- транспортного комплекса. развитие цифровых экосистем: наука, практика, образование». – М.: РУТ (МИИТ), 2020. – С. 261–266.
32. ВОЗ сообщила о росте кибератак во время пандемии в пять раз [Электронный ресурс]. – 2020. Режим доступа: <https://lenta.ru/news/2020/04/24/cyber/>.

A. E. Vodyasov

D. M. Kiryukhin

G. V. Sidorenko, Dr. Sci. in Engineering

SEC-CONSULT SERVICES, LLC

Department of Control and Information Security,

Russian University of Transport, Moscow

EXPERIENCE IN TRAINING PERSONNEL TO ENSURE THE COMPUTER SECURITY OF THE TRANSPORT INDUSTRY

In the context of the pandemic, the role of computer security specialists in solving the problems of uninterrupted operation of transport enterprises has increased many times. The article is devoted to summing up and analyzing the experience accumulated in the RUT (MIIT) for 20 years of training specialists in the specialty "Computer Security", determining the prospects for the development of the educational program. The article presents a methodology for using freely distributed software created by the authors of the article in the learning process in cases where it is impossible or unsafe on real objects. The main advantage of this technique is that it takes into account the experience gained by specialists in solving real cases, allows you to reproduce real system vulnerabilities without harming real systems for training purposes, makes it possible to diagnose these vulnerabilities, exploit them, choose and compare different ways to remove them from the system. The article contains an analysis of publications devoted to the experience of training personnel in the specialty "Computer Security" in different countries using various tools. The article provides an overview of the educational program and formulates the principles that form the basis of training at our university, demonstrates examples of the use of digital doubles in the learning process, focuses on the formation of interdisciplinary connections, skills of applying theoretical knowledge to solve practical problems and analyze the results obtained. The review of the subjects of the discipline "Methods of risk management analysis", statistical analysis of the results of the implementation of the methodology developed by the authors in practice, and their graphical interpretation is carried out. Examples of the application of risk theory to solving computer security problems are given. The article contains examples of students' participation in research activities, the creation of methodological support for the relevant educational program, and various events outside the university.

Computer security, training, digital double, vulnerability, risk

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-315-335

References

1. Ogorodnikov E. Cybersecurity of "Russian Railways" will be provided by domestic developers – 2020. <https://expert.ru/2020/06/19/kiberbezopasnost-rossijskih-zheleznih-dorog-obespechat-otechestvennyie-razrabotchiki/>
2. Pokrovskaya, I. Defenders of the information. – 2020. <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1504600&archive=2020.05.21>

3. Belova I. V. Improving the training of specialists in applied computer science in information security (level of secondary vocational education) // *Kazan Science*. – 2012. – № 9. – Pp. 191–193.
4. Anureva M. S. Modern system of education in the field of information security in the Russian Federation // *Tambov university review: series humanities*. – 2018. – T. 23. – № 173. – Pp. 111–120.
5. Anureva M. S. Research basis of comparative analysis of specialists' preparation programs in information security in different countries // *Tambov university review: series humanities*. – 2018. – T. 23. – № 171. – Pp. 90–97.
6. Crick T., Davenport J., Irons A., Prickett T. A UK Case Study on Cybersecurity Education and Accreditation // *Conference: 2019 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*. – October 2019. – DOI: 10.1109/FIE43999.2019.9028407.
7. Martti Lehto. Cyber security capacity building -cyber security education in Finnish universities // *Proceedings of the 19th European Conference on Cyber Warfare and Security*. – UK. – 2020. – DOI: 10.34190/EWS.20.112.
8. Kessler G. C., Ramsay J. D. A Proposed Curriculum in Cybersecurity Education Targeting Homeland Security Students // *Proceedings of the 47th Hawaii International Conference on System Sciences*. – HI. – 2014. – Pp. 4932–4937. – DOI: 10.1109/HICSS.2014.605.
9. Frankie E. Catota, M. Granger Morgan, Douglas C. Sicker. Cybersecurity education in a developing nation: the Ecuadorian environment // *Journal of Cybersecurity*, Volume 5, Issue 1, 2019, tyz001. <https://doi.org/10.1093/cybsec/tyz001>.
10. Furnell S., K M., Piper F., E C., H C., Ensor C. A National Certification Programme for Academic Degrees in Cyber Security // *Information Security Education – Towards a Cybersecure Society*. WISE 2018. IFIP Advances in Information and Communication Technology, Springer, Cham. – 2018. – Vol 531. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99734-6_11.
11. Movchan I. N. Problems of training professionals in the field of information security // *Open education*. – 2013. – № 5 (100). – Pp. 78–80.
12. Kozlov O. A., Simonova I. V., Bocharov M. I. Models of information security training // *Proceedings of the international scientific and practical conference “Innovations based on Information and communication technologies»*. – 2013. – T. 1. – Pp. 28–30.
13. Huang Z., Shen CC., Doshi S., Thomas N., Duong H. Cognitive Task Analysis Based Training for Cyber Situation Awareness // *Information Security Education Across the Curriculum*. WISE 2015. IFIP Advances in Information and Communication Technology. – Springer, Cham. – 2015. – Vol. 453. – 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-319-18500-2_3.
14. Fatcher L., Van Niekerk J. Towards a Pervasive Information Assurance Security Educational Model for Information Technology Curricula // *Information Assurance and Security Education and Training*. – Pp 164–171.
15. Švábenský V., Vykopal J., Celeda P. What Are Cybersecurity Education Papers About? – A Systematic Literature Review of SIGCSE and ITiCSE Conferences. – 2019. – 2020. <https://arxiv.org/pdf/1911.11675.pdf>
16. Moore E., Likarish D. (2015) A Cyber Security Multi Agency Collaboration for Rapid Response that Uses AGILE Methods on an Education Infrastructure. In: Bishop M., Miloslavskaya N., Theocharidou M. (eds) *Information Security Education Across the Curriculum*. WISE 2015. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 453. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-18500-2_4.
17. Bada M., Nurse, J. R. C. Developing cybersecurity education and awareness programmes for small- and medium-sized enterprises (SMEs) // *Information and Computer Security*. – Vol. 27. № 3. – Pp. 393–410. – DOI: 10.1108/ICS-07-2018-0080.

18. Charalambos K. Cyber-Physical Systems Security Education Through Hands-on Lab Exercises // IEEE Design & Test. – 2020. – Pp. 1–1. – DOI: 10.1109/MDAT.2020.3005365.
19. Davidson A., Javier de La Puente Martinez, Huber M. A SWOT Analysis of Virtual Laboratories for Security Education // Information Assurance and Security Education and Training. – Pp. 233–240.
20. Sauer F., Niedermaier, M., Kießling S., Merli D. LICSTER – A Low-cost ICS Security Testbed for Education and Research. – 2019. <https://arxiv.org/pdf/1910.00303.pdf>.
21. Cyber-learning on the” digital twin “ of infrastructure: assessing real business risks. – 2020. <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/knowledge-base/kiberucheniya-na-cifrovom-dvojnike-infrastruktury-ocenka-realnyh-riskov-dlya-biznesa/>
22. Bustard, J.D. Improving Student Engagement in the Study of Professional Ethics: Concepts and an Example in Cyber Security // Sci Eng Ethics 24. – 2018. – Pp. 683–698. <https://doi.org/10.1007/s11948-017-9904-4>.
23. Izycheva A. V., Sidorenko V. G. Steganographic methods of information security: Training manual. – M.: RUT (MIIT), 2017. – 76 p.
24. Voronina E. G., Sidorenko V. G. Random number generators: Training manual. – M.: RUT (MIIT), 2018. – 80 p.
25. Artsybasheva A. A., Kozlov A. A., Sidorenko V. G. Analysis of image authenticity: Training manual. – M.: RUT (MIIT), 2018. – 106 p.
26. Skorobogatova N. N., Sidorenko V. G. Aspects of information security: Training manual. – M.: RUT (MIIT), 2018. – 80 p.
27. Zamolotskikh V. S., Sidorenko V. G. Application of graph theory for social network analysis: Training manual. – M.: RUT (MIIT), 2020. – 74 p.
28. Zamolotskikh V. S., Sidorenko V. G. Cyber threats in social networks // Informatization of education and science. – 2020. – № 4 (48). – Pp. 66–75.
29. Vodyasov A. E. Sidorenko G. V. Smart contract security problem review // Proceedings of the II-th International Scientific and Practical Conference «Digital transformation in the economy of the transport complex. Development of digital ecosystems: science, practice, education». – M.: RUT (MIIT), 2020. – 66–70 p.
30. Kiryukhin D. M. Analisis of the problem of implementation of requirements for information security to objects of critical information infrastructure of the russian federation in the transport industry // Proceedings of the II-th International Scientific and Practical Conference «Digital transformation in the economy of the transport complex. Development of digital ecosystems: science, practice, education». – M.: RUT (MIIT), 2020. – 148–151 p.
31. Pavlov N. A. Biometric methods of authentificaion: basic concepts, mechanisms, reliability and relevance in transport // Proceedings of the II-th International Scientific and Practical Conference «Digital transformation in the economy of the transport complex. Development of digital ecosystems: science, practice, education». – M.: RUT (MIIT), 2020. – 261–266 p.
32. WHO reported a five-fold increase in cyber attacks during the pandemic. – 2020. <https://lenta.ru/news/2020/04/24/cyber/>.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии
профессором Л. А. Барановым*

Поступила в редакцию 17.12.2020, принята к публикации 10.02.2021

ВОДЯСОВ Алексей Евгеньевич — технический директор ООО «СЕК-КОНСАЛТ СЕРВИСЭЗ»
lexadin@yandex.ru

КИРЮХИН Дмитрий Максимович — эксперт по информационной безопасности
ООО «СЕК-КОНСАЛТ СЕРВИСЕЗ»
dimonkm4red@gmail.com

СИДОРЕНКО Валентина Геннадьевна — доктор технических наук, профессор
кафедры «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ)
valenfalk@mail.ru

© Водясов А. Е., Кирюхин Д. М., Сидоренко В. Г., 2021

Подписано в печать с оригинал-макета 25.06.2021.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 21,0. Уч.-изд. л. 10,5.
Установочный тираж 300 экз. Заказ .

Отпечатано в типографии ООО «Издательство ОМ-Пресс»,
190031, СПб., наб. реки Фонтанки, 117.