



Автоматика на транспорте

Automation on Transport

№ 2

Том 5

Июнь, 2019

June, 2019



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»

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 редакции

190031, РФ, Санкт-Петербург,
Московский пр., 9, кафедра «Автоматика
и телемеханика на железных дорогах»,
+7(812) 457-8579
at.pgups@gmail.com

Редакция журнала

Перевод на английский язык
А. А. Блюдова
Литературное редактирование
и корректура *Н. В. Фроловой*
Верстка *М. С. Савастеевой*

Электронное сопровождение
Д. В. Пивоварова

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2019

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

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

ISSN 2412-9186

Rospachat Index 80525

Address

190031, Russia, St. Petersburg,
Moskovskiy ave., 9, «Automation and Remote
Control on Railways» department,
+7(812) 457-8579
at.pgups@gmail.com

Journal staff

English translation
Anton A. Blyudov
Editing and proofreading
Natalia V. Frolova
Layout *Maria S. Savasteeva*

Electronic maintenance
Dmitry V. Pivovarov

© PSTU, 2019

Международный редакционный совет

Валерий Сапожников
доктор техн. наук, профессор, ПГУПС,
главный редактор журнала
«Автоматика на транспорте»,
Санкт-Петербург, Россия

Константин Бочков
доктор техн. наук, профессор,
Белорусский государственный
университет транспорта,
Гомель, Белоруссия

Сергей Власенко
кандидат техн. наук, доцент,
Сименс, Брауншвейг, Германия

Александр Дундуа
доктор наук, профессор,
Грузинский технический университет,
Тбилиси, Грузия

Марек Мезитис
доктор наук, доцент,
Рижский технический университет,
Рига, Латвия

Йохен Тринкауф
доктор наук, профессор,
Технический университет Дрездена,
Дрезден, Германия

Раймунд Убар
доктор техн. наук, академик
Эстонской академии наук,
Таллинский технический университет,
Таллин, Эстония

Владимир Хаханов
доктор технических наук, профессор,
Харьковский национальный
университет радиоэлектроники,
Харьков, Украина

Фуниан Ху
доктор наук, профессор,
Школа электротехники педагогического
университета Цзянсу,
Сюйчжоу, Китай

Христо Христов
доктор техн. наук, профессор,
Технический университет,
София, Болгария

Редакционная коллегия

Никитин Александр Борисович
доктор техн. наук, профессор, заместитель
главного редактора журнала «Автоматика
на транспорте»,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Соколов Вадим Борисович
кандидат техн. наук, доцент, научный редактор
журнала «Автоматика на транспорте»,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Баранов Леонид Аврамович
доктор техн. наук, профессор,
РУТ, Москва

Бестемьянов Петр Филимонович
доктор техн. наук, профессор,
РУТ, Москва

Бушуев Сергей Валентинович
кандидат техн. наук, доцент,
УрГУПС, Екатеринбург

Василенко Михаил Николаевич
доктор техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Долгий Игорь Давидович
доктор техн. наук, профессор,
РГУПС, Ростов-на-Дону

Ефанов Дмитрий Викторович
доктор техн. наук, доцент,
ООО «ЛокоТех-Сигнал», Москва

Кокурин Иосиф Михайлович
доктор техн. наук, профессор,
ИПТ РАН, Санкт-Петербург

Марков Дмитрий Спиридонович
кандидат техн. наук, доцент,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Наседкин Олег Андреевич
кандидат техн. наук, доцент,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Никищенок Сергей Алексеевич
доктор техн. наук, профессор,
СамГУПС, Самара

Пыркин Антон Александрович
доктор техн. наук, профессор,
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

Розенберг Ефим Наумович
доктор техн. наук, профессор,
НИИАС, Москва

Сапожников Владимир Владимирович
доктор техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Шаманов Виктор Иннокентьевич
доктор техн. наук, профессор,
РУТ, Москва

Ходаковский Валентин Аветикович
доктор 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 Mezitis

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

Vadim B. Sokolov

Ph. D., Associate professor, executive 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. Bestemiyanov

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,
«LocoTech-Signal» LLC, 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

Vladimir Vl. Sapozhnikov

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

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

Живучесть, надежность, безопасность

Смагин В. А., Бубнов В. П.

Математическая модель детерминированных и случайных процессов в виде последовательного гиперфрактального распределения 145

Системы управления на транспорте

Шаманов В. И.

Проблемы электромагнитной совместимости рельсовых цепей с тяговой сетью..... 160

Никитин А. Б., Ковкин А. Н., Соколов В. А., Журавлева Н. А.

Принципы безопасного сопряжения с объектами в микропроцессорных системах железнодорожной автоматики..... 186

Эксплуатация транспортных систем

Бушуев С. В., Попов А. Н., Попова М. Л.

Оценка экономической эффективности средств контроля свободности участков пути..... 202

Методы мониторинга в транспортных системах

Зимовец А. И., Хомоненко А. Д.

Обоснование выбора модели хранения данных для системы мониторинга космического пространства..... 221

Никитин А. Б., Шатохин В. А., Порошин А. А.

Диагностика и мониторинг аккумуляторной батареи в устройствах электропитания железнодорожной автоматики и телемеханики 233

Техническая диагностика и контролепригодные системы

Мухомад Ю. Ф., Мухомад А. Ю., Пунсык-Намжилов Д. Ц.

Структурная организация управляющих автоматов нового типа для технических систем железнодорожной автоматики 244

Щагина В. А.

Двухмодульные коды с суммированием для организации систем автоматики с обнаружением неисправностей..... 256

Contents

Vitality, reliability, safety

Smagin V. A., Bubnov V. P.

Mathematical model of determinated and random processes in the form of consistent hyperfractal distribution 145

Transport control systems

Shamanov V. I.

Problems of electromagnetic compatibility rail circuits with traction network 160

Nikitin A. B., Kovkin A. N., Sokolov V. A., Zhuravleva N. A.

Principles of safe interface with objects in microprocessor systems railway automation 186

Operation of transport systems

Bushuev S. V., Popov A. N., Popova M. L.

Cost-effectiveness assessment of means monitoring track vacancy 202

Monitoring methods in transport

Zimovets A. I., Khomonenko A. D.

The rationale for choosing a data storage model for a space monitoring system 221

Nikitin A. B., Shatokhin V. A., Poroshin A. A.

Diagnostics and monitoring battery in power supply devices of railway automation and remote control 233

Technical diagnostics and controllable systems

Mukhopad Yu. F., Mukhopad A. Yu., Punsik-Namzhilov D. C.

Structural organization of control automata a new type of technical systems of railway automatics 244

Schagina V. A.

Two-modulus sum code for automatic systems organization with errors detection 256

Живучесть, надежность, безопасность

УДК 681.3.06-192

В. А. Смагин, д-р техн. наук

Кафедра метрологического обеспечения, вооружения, военной и специальной техники
Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург

В. П. Бубнов, д-р техн. наук

Кафедра «Информационные и вычислительные системы»
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, Санкт-Петербург

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ И СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВИДЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ГИПЕРФРАКТАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Предложена математическая модель представления детерминированных и случайных процессов в виде последовательности фракталов. Она базируется на модели квантования информации и гипердельтном распределении вероятностей. Для формирования последовательности предложено нелинейное интегральное уравнение с целочисленным ядром. По нему находятся базовый фрактал и субфракталы (кластеры). Рассмотрен пример для равномерного распределения. Произведено оценивание вероятностных и энтропийных свойств компонентов разложения. Определяется влияние пороговой константы в нелинейном интегральном уравнении, предназначенном для нахождения величины базового фрактала, на величину его протяженности. Величина протяженности фрактала является важной характеристикой, от которой зависит количество информации, помещаемой во фрактале при известном законе ее распределения. Дается ответ на поставленный вопрос на примерах с двумя распределениями вероятностей. Результаты исследования рекомендованы для применения в метрологии, теории информации и теории эффективности.

нелинейное интегральное уравнение, базовый фрактал, константа и ее величина, графическое и численное решение, распределение количества информации, протяженность фрактала.

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-2-145-159

Введение

Одним из актуальных направлений развития теории динамических систем и их многочисленных приложений является группа практических задач, связанных с нестационарной и хаотической динамикой управляемых процессов. Важнейшими представителями данного научного тренда явля-

ются прикладная теория хаотических процессов и методы фрактального анализа наблюдений [1–5].

В книге известного норвежского физика дается ясное и простое изложение математических свойств фракталов, описываются приложения теории фракталов в гидродинамике, океанологии, гидрологии, в исследовании перколяционных процессов и пр. [6]. Кроме того, приводятся методы компьютерной графики.

Фрактал (от лат. fractus – дробленный, сломанный, разбитый) – это множество, обладающее свойством самоподобия (объект, в точности или приближенно совпадающий с частью самого себя, т. е. целое имеет ту же форму). Создание теории фракталов и методов ее применения принадлежит известному ученому – автору большого цикла работ Б. Мандельброту [7].

Целью данной статьи является попытка предложить один из возможных математических методов моделирования детерминированных и случайных процессов, идея которого восходит как к работам авторов [8, 9], так и к идее применения фракталов, изложенной в [6, 8]. Она состоит в том, чтобы разработать приближенный метод исследования детерминированных и случайных процессов, с которыми тесно связаны прикладные методы современной науки технического и информационного профиля. В более простом понимании – связать науку о фракталах с теорией вероятностей и теорией информации. При этом авторы не претендуют на создание научной теории, а излагают свое понимание на простых прикладных примерах.

1. Математическая модель

В статье [8], посвященной разработке одной из моделей исследования немарковских процессов в теории надежности и массовом обслуживании, была предложена марковская модель гипердельтного распределения (см. также [9]). Она основана на методе равенства начальных моментов теоретического и аппроксимирующего распределения теории вероятностей. Здесь эту идею предлагается применить к построению приближенного последовательного распределения, построенного на выделении базового, основного фрактала и совокупности субфракталов более низкого ранга по сравнению с базовым фракталом. Затем на основе дельта-функций Дирака строится плотность вероятности фрактального распределения. С ее помощью оцениваются вероятностно интересные исследователя показатели объекта. Кроме того, если необходимо, предлагается применять функцию распределения энтропии для дополнительного оценивания качества объекта [10].

Математическая модель основывается на идее оптимального в смысле заполнения квантования информации [11]. Точнее, она использует запись авторами величины математического ожидания квантованной случайной величины:

$$M(x) = (x + c) \int_0^{\infty} \left(E\left(\frac{z}{x}\right) + 1 \right) f(z) dz, \quad (1)$$

где c – установленный постоянный пробел между квантами; x – величина кванта; E – наибольшая целая часть числа с недостатком; $f(x)$ – плотность вероятности случайного количества квантуемой информации Z .

Пусть задана плотность вероятности $f(x)$ на полуинтервале $[0, \infty)$, требуется представить ее в виде убывающей фрактальной последовательности, составленной базовым, основным фракталом Φ_0 и множеством субфракталов $\text{СФ}i, i = 1, 2, 3 \dots$. Тогда можно принять следующую формулу для производства фрактализации:

$$\int_0^{\infty} E\left(\frac{z}{x}\right) f(z) dz - 1 = 0. \quad (2)$$

Содержательный смысл формулы (2) состоит в том, что математическое ожидание E не должно превышать единичного значения, но и не быть отрицательным. Нужно принять равенство $x = \Phi_0$ и решить полученное нелинейное уравнение относительно неизвестной величины Φ_0 . При этом нужно как можно точнее вычислить эту величину. А затем проверить правильность достаточно строгого решения уравнения (2). Эта численная величина и будет представлять базовый, основной факториал. Можно убедиться, что точное решение уравнения (2) достигается при $\max \Phi_0$ и оно будет единственным.

Следующим шагом процесса будет вычисление значения величины первого субфрактала Φ_1 . Этот процесс будет аналогичен процессу вычисления Φ_0 . Но нелинейное уравнение необходимо изменить таким образом, чтобы оно приняло следующую форму:

$$\frac{1}{\int_{\Phi_0}^{\infty} f(u) du} \int_{\Phi_0}^{\infty} E\left(\frac{z - \Phi_0}{\Phi_1}\right) f(z) dz - 1 = 0. \quad (3)$$

При известном определенном значении Φ_0 уравнение (3) нужно решить относительно Φ_1 с достаточной строгостью и проверить точность полученного решения. Множитель с внутренним интегралом в уравнении (3) определяет условную вероятность того, что предшествующий интервал базового фрактала был успешно завершен.

Следующим шагом процесса становится вычисление значения величины второго субфрактала Φ_2 . Для этого необходимо использовать следующее нелинейное интегральное уравнение:

$$\frac{1}{\int_{\Phi_0+\Phi_1}^{\infty} f(u)du} \int_{\Phi_0+\Phi_1}^{\infty} E\left(\frac{z-\Phi_0-\Phi_1}{\Phi_2}\right) f(z) dz - 1 = 0. \quad (4)$$

Сомножитель с внутренним интегралом в уравнении (4) определяет условную вероятность того, что предшествующий интервал до Φ_2 , включающий базовый фрактал и первый субфрактал, был успешно завершён. После выполнения процедуры следует также обеспечить и проверить точность полученного решения.

Далее следует производить процесс вычисления следующих субфракталов по аналогичным, но видоизменённым уравнениям до тех пор, пока величина последнего фрактала не будет пренебрежимо малой.

Авторы данной статьи не смогли найти метода решения рассматриваемого нелинейного уравнения в замкнутом, аналитическом виде. Поэтому решение находилось способом непосредственной замены искомой величины таким образом, чтобы высокая точность решения достаточно строго соответствовала максимальному значению искомого фрактала или субфрактала.

2. Пример выполнения процедур вычислений для заданного распределения вероятностей

Задано равномерное распределение, его плотность вероятности записывается в виде

$$f(x) = \text{dunif}(x, a, b), \quad a = 0, b = 100 \text{ ед.} \quad (5)$$

Для определения значения величины базового фрактала требуется решить уравнение

$$\int_0^{\infty} E\left(\frac{z}{\Phi_0}\right) f(z) dz - 1 = 0. \quad (6)$$

В результате решения путем простого подбора определяем $\Phi_0 = 33,33$ ед. с точностью $1,819 \cdot 10^{-4}$. Число фракталов равно единице, а интервал временной занятости составит 33,33 ед.

Определяем значение величины первого субфрактала путем решения уравнения относительно Φ_1 :

$$\frac{1}{\int_{\Phi_0}^{\infty} f(u)du} \int_{\Phi_0}^{\infty} E\left(\frac{z-\Phi_0}{\Phi_1}\right) f(z) dz - 1 = 0. \quad (7)$$

Значение величины $\int_{\Phi_0}^{\infty} f(u)du = 0,667$. А значение величины Φ_1 будет равно 14,21 ед. с точностью $2,367 \cdot 10^{-5}$. Число субфракталов Φ_1 равно единице, поэтому интервал временной занятости составит 14,21 ед.

Определяем значение величины второго субфрактала путем решения уравнения относительно Φ_2 :

$$\frac{1}{\int_{\Phi_0+\Phi_1}^{\infty} f(u)du} \int_{\Phi_0+\Phi_1}^{\infty} E\left(\frac{z - \Phi_0 - \Phi_1}{\Phi_2}\right) f(z) dz - 1 = 0. \quad (8)$$

Значение величины $\int_{\Phi_0+\Phi_1}^{\infty} f(u)du = 0,524$. А значение величины Φ_2 будет равно 2,3996 ед. с точностью $6,177 \cdot 10^{-5}$. Число Φ_2 субфракталов равно единице, поэтому временной интервал занятости составит 2,3996 ед.

Определяем значение величины третьего субфрактала путем решения уравнения относительно Φ_3 :

$$\frac{1}{\int_{\Phi_0+\Phi_1+\Phi_2}^{\infty} f(u)du} \int_{\Phi_0+\Phi_1+\Phi_2}^{\infty} E\left(\frac{z - \Phi_0 - \Phi_1 - \Phi_2}{\Phi_3}\right) f(z) dz - 1 = 0; \quad (9)$$

$$\int_{\Phi_0+\Phi_1}^{\infty} f(u)du = 0,501.$$

А значение величины Φ_3 будет равно 0,1195 ед. с точностью $4,889 \cdot 10^{-5}$. Число Φ_3 субфракталов равно единице, поэтому временной интервал занятости составит 0,1195 ед.

Этим ограничимся, считая, что величина четвертого субфрактала будет достаточно близка к нулю.

Анализ результатов примера. В примере были получены следующие продолжительности времени занятости фрактала и субфракталов:

$$t_0 = 33,33 \text{ ед.}, t_1 = 14,21 \text{ ед.}, t_2 = 2,9963 \text{ ед.}, t_3 = 0,1195 \text{ ед.}$$

Обозначим соответствующие вероятности нахождения процесса в периодах времени занятости:

$$P_0(t_0) = 0,667, P_1(t_1) = 0,519, P_2(t_2) = 0,316, P_3(t_3) = 0.$$

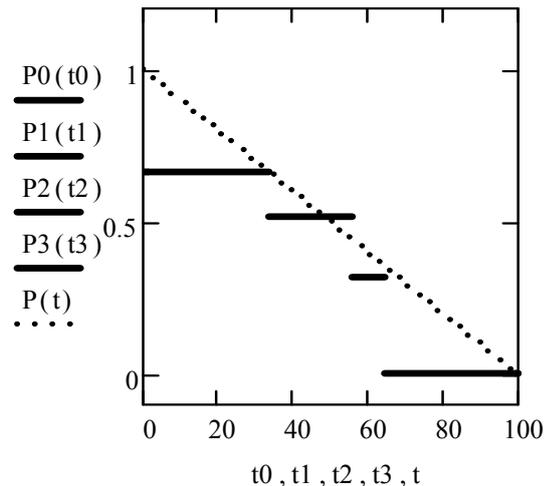


Рис. 1. Вероятность процесса занятости

На рисунке 1 графически показано изменение вероятностей процесса занятости по времени. Каждый отрезок прямой на рисунке соответствует вычисленной вероятности на конец отрезка. И если мы хотим сгладить контур кривой непрерывной линией вероятности, то должны соединить плавной линией точку 1 на оси ординат с правыми концами всех отрезков, исключая самый нижний отрезок. При достаточном количестве отрезков эта линия должна плавно переходить в нулевую линию – линию абсцисс. На данном рисунке при учете только двух субфракталов выполнить плавное со-

единение с осью абсцисс невозможно и кривую приходится обрывать, не достигая оси. На рисунке прямой пунктирной линией представлен график вероятности того, что событие, определяемое заданным равномерным распределением в примере с плотностью вероятности $f(t) = \text{dunif}(x, a, b)$, $a = 0$,

$b = 100$ ед. и формулой $P(t) = 1 - \int_0^t f(z) dz$, не может произойти. Эта линия до-

статочно хорошо аппроксимируется концами отрезков вероятностей базового фрактала и второго субфрактала. Это подтверждает корректность выполненной фрактальной аппроксимации заданного распределения вероятностей на основе последовательного гиперфрактального распределения.

Оценку эффективности фрактального прогноза можно произвести по ресурсу Н. М. Седякина. Здесь величина ресурса – это критерий важности, или веса, фрактала. Ресурс за время t определяется по формуле $r(t) =$

$= \int_0^t \lambda(z) dz$, $\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}$. Временные интервалы занятости $t_0 = 0$; $t_1 = 33,33$; $t_2 =$

$= 55,5$; $t_3 = 64,2$. Остаточный временной интервал $t > 64,2$. Фрактальные

(прогнозируемые) ресурсы $r_0(t_0) = 0$; $r_1(t_1) = 0,334$; $r_2(t_2) = 0,555$; $r_3(t_3) =$

$= 0,642$. Суммарный фрактальный ресурс $1,531$. Остаточный ресурс $r(t > 64,2) = 0,358$. Полный ресурс $1,889$. Доля фрактальных ресурсов $1,532 / 1,889 = 81,048 \%$. Доля остаточного ресурса $0,358 / 1,889 = 18,952 \%$.

Таким образом, определение базового фрактала и двух субфракталов для рассмотренного распределения вероятности оценивается $81,048 \%$, т. е. уровнем эффективности. Это, на наш взгляд, достаточно хорошая оценка.

Выполним оценивание важности фракталов примера по критерию плотности вероятности случайной величины энтропии [11]. Для этого по

вычисленным вероятностям для фракталов найдем средние значения энтропии H , ее второй начальный момент α и среднеквадратическое отклонение σ . Значения указанных величин приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристика фракталов

P	H	α	δ
0,667	0,636	0,512	0,328
0,519	0,692	0,481	0,046
0,316	0,624	0,518	0,484
0	0	0,008	0,092

Выполним аппроксимацию плотности энтропии нормальным распределением:

$$g(x) = \frac{C}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-H)^2}{2\sigma^2}}, \quad (10)$$

где C – константа нормирования плотности.

На рисунке 2 приведены графики трех плотностей вероятностей для первых трех строк таблицы 1. Из рисунка следует, что первый субфрактал примера имеет самую большую значимость, или вес. Действительно, грубое оценивание значений показателя концентрации величины энтропии (информации) фракталов I по данным таблицы 1 и рисунка 2 приводит к следующим результатам: фрактал Φ (первая строка таблицы и нулевой график плотности рисунка 2) – $I = 5,21$; первый субфрактал Φ_1 (вторая строка таблицы и первый график плотности рисунка 2) – $I = 9,031$; второй субфрактал Φ_2 (третья строка таблицы и второй график плотности рисунка 2) – $I = 4,502$.

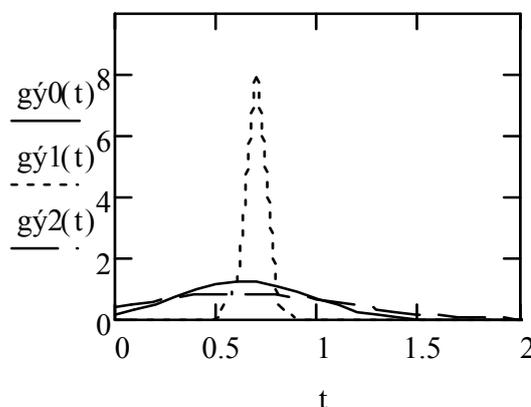


Рис. 2. Плотность вероятностей строк таблицы

3. Влияние величины пороговой константы в интегральном уравнении для нахождения фракталов последовательного гиперфрактального распределения

Из интегральных уравнений (2)–(4) следует, что длительность таким образом определенных фракталов (непрерывных кластеров) в исследовании информационных процессов должна иметь определенную содержа-

тельную весомость, или важность, а вероятность их появления на оси абсцисс говорит о шансах влияния на другие связанные с ними процессы. Поэтому знание протяженностей этих фракталов и вероятностей их появления важно для исследователя при решении поставленных им задач.

Значит целесообразно ставить вопрос о том, какие базовые фракталы по их параметрам следует предпочитать и как пытаться достичь этого.

Формализация поставленной задачи. В интегральных уравнениях (3), (4) при условии, что плотность вероятности исследуемого процесса $f(x)$ известна, можно ответить на поставленный вопрос изменением только единственной пороговой константы – единицы. Попробуем заменить ее константой D , изменяемой в некоторых пределах. Для простоты решения задачи введем $D = 0,5; 1,0; 1,5$. Далее зададимся некоторым конкретным распределением вероятности с плотностью $f(x)$ и графически получим решения только для базового фрактала.

Пример 1. Пусть приходящая информация распределена по нормальному закону и задана плотностью вероятности $f(x) = \text{dnorm}(x, m, \sigma)$, $m = 100$ ед., $\sigma = 20$ ед. Обозначим пороговую константу D , которая может принимать три значения: 0,5; 1,0; 1,5. Тогда уравнение (2) можно представить системой уравнений:

$$\begin{aligned} A0(x) &= \int_0^{\infty} \text{trunc}\left(\frac{z}{x}\right) f(z) dz - D0(x) = 0, D0(x) = 0,5; \\ A1(x) &= \int_0^{\infty} \text{trunc}\left(\frac{z}{x}\right) f(z) dz - D1(x) = 0, D1(x) = 1,0; \\ A2(x) &= \int_0^{\infty} \text{trunc}\left(\frac{z}{x}\right) f(z) dz - D2(x) = 0, D2(x) = 1,5. \end{aligned} \quad (11)$$

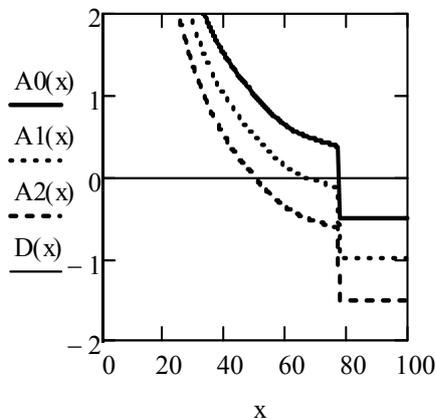


Рис. 3. Графическое решение

К системе (11) добавим еще уравнение нулевой линии $D(x) = 0$. Далее найдем графическое решения (11), которое представлено на рисунке 3.

На пересечении всех трех графиков с нулевой линией рисунка 3 найдем искомые решения для величин базовых фракталов при ограничениях $Di(x)$, $i = 1 - 3$, $\Phi0 = 77,6$ ед., $\Phi1 = 66,5$ ед., $\Phi2 = 49,8$ ед. При этом все $Ai(\Phi i) = 0$, $i = 0 - 2$ определены практически с достаточно высокой точностью. Из рисунка

ка 3 следует, что наиболее результативным по длительности является базовый фрактал, полученный при самом низком значении порога $D = 0,5$, а наименее результативным – базовый фрактал при наибольшем значении порога $D = 1,5$.

Оценим величину энтропии базового фрактала при тех же значениях порога ограничения. Для этого сначала определим вероятность охвата протяженности каждого фрактала по формуле $Q(x) = \int_0^x f(z)dz$. Затем по найденным вероятностям найдем среднюю величину, второй начальный момент и среднеквадратическое значение энтропии каждого фрактала. По этим характеристикам и при априорно принятом условии о нормальном распределении случайной величины энтропии найдем законы распределения энтропии для определенных базовых фракталов. Численные значения указанных характеристик представлены в таблице 2.

Таблица 2. Численные значения характеристик фракталов

D	Q	H	α	δ
0,5	0,31	0,388	0,558	0,666
1,0	0,047	0,190	0,442	0,637
1,5	0,006	0,037	0,157	0,395

На основании этих значений составлены графики плотностей вероятностей и функций распределения случайной величины энтропии для трех базовых фракталов при различных пороговых величинах D (рис. 4, 5). Можно заключить, что наиболее информативным (менее значимым по величине энтропии) является значение порогового ограничения $D = 0,5$, которому уступают $D = 1, D = 1,5$. Это следует принимать во внимание для получения наилучшего результата.

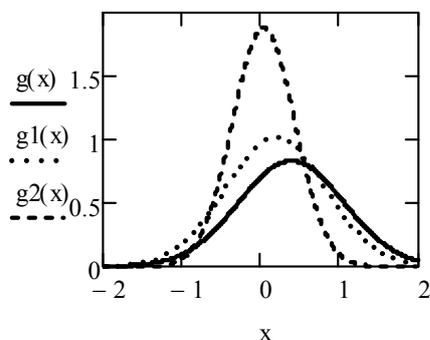


Рис. 4. Плотность вероятностей

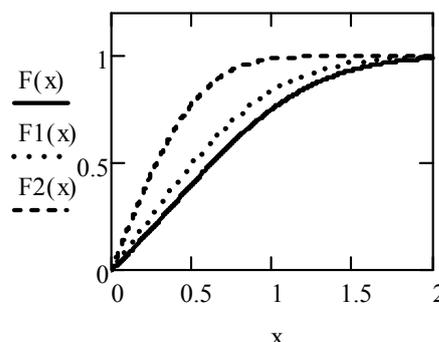


Рис. 5. Функция распределения вероятностей

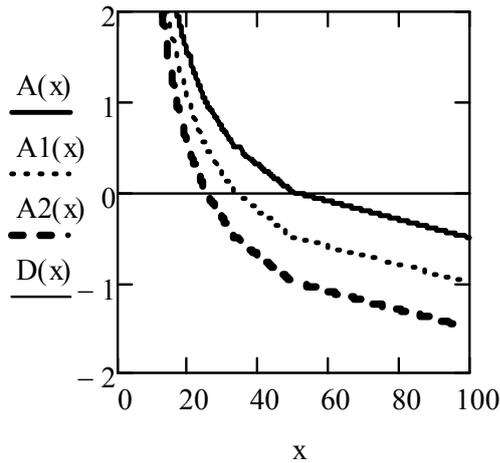


Рис. 6. Графическое решение

Пример 2. Определение величины базового фрактала с равномерным распределением $f(x) = \text{dunif}(x, a, b)$, $a = 0$ ед., $b = 100$ ед. при тех же пороговых ограничениях $D = 0,5; 1,0; 1,5$. Проведя выкладки, аналогичные примеру 1, получим графические характеристики, приведенные на рисунке 6.

Численные значения указанных характеристик представлены в таблице 3. Они получены по тем же выражениям, которые были использованы в примере 1.

Таблица 3. Численные значения характеристик фракталов

D	Q	H	α	δ
0,5	0,50	0,693	0,48	0,50
1,0	0,34	0,641	0,51	0,314
1,5	0,25	0,562	0,543	0,476

Рисунки 7 и 8 показывают, что наиболее информативным (менее значимым по величине энтропии) является значение порогового ограничения $D = 0,5$, которому уступают $D = 1, D = 1,5$. Однако по сравнению с графиками примера 1 все три кривые располагаются более близко друг к другу. Вторые функции плотности и распределения на рисунках 7 и 8 располагаются более выпукло по сравнению с аналогичными функциями на рисунках 4 и 5. Это можно объяснить тем, что нормальный закон распределения по сравнению с равномерным законом распределения является более «тяжелым».

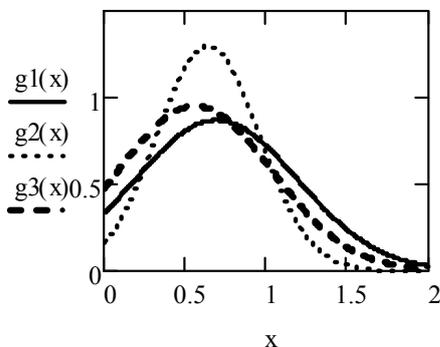


Рис. 7. Плотность вероятностей

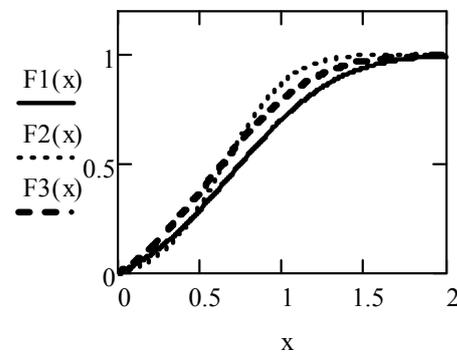


Рис. 8. Функция распределения вероятностей

Заключение

Математическая модель, предложенная в статье, может найти применение в различных прикладных научных исследованиях. Например, гиперфрактальное распределение позволяет представлять современные системы счисления в виде совокупности фракталов, вводить новые системы счисления для моделирования процессов и применять их в изучении проблем теории информации. Фактически оно приложимо к моделированию процессов любой физической природы – материальной или информационной. Оно позволяет изучать различные случайные процессы с целью увеличения точности их познания. Является достаточно привлекательным для метрологии [12], теории эффективности.

Фракталы, теория фракталов в настоящее время применяются при описании различных явлений – от биологических до квантово-механических [13–18]. На основании знакомства с отдельными трудами этой теории в статье предложена математическая модель предоставления процессов на основе последовательного гиперфрактального распределения. Она опирается на элементы теории квантования информации и на гипердельтное распределение вероятностей, ранее предложенной авторами. Для моделирования последовательности фракталов распределений вероятностей предложено нелинейное интегральное уравнение. Ядро этого уравнения представлено в целочисленном виде. В результате последовательного решения уравнения находятся базовый фрактал и производные от него субфракталы (кластеры). Величина и содержание каждого фрактала могут изучаться для оценивания его важности, информативности и т. д.

В статье был поставлен вопрос о влиянии изменения пороговой константы в интегральном нелинейном уравнении, применяемом для нахождения базового фрактала при заданной функции распределения количества поступающей информации. Принимались значения пороговой константы 0,5; 1,0; 1,5. Показано, что меньшее значение константы приводит к увеличению протяженности базового фрактала, большее значение – к ее уменьшению. Если протяженность фрактала связывать с количеством информации, зависящей от нее, это может представлять интерес для исследователя. В случае противоборства двух сторон интерес их различен. И он оправдывает выбор базового фрактала и субфракталов по-разному. Данный вопрос в статье не рассматривался. Рассмотрены два примера с нормальным и равномерным распределением количества поступающей информации. Установлено, что при нормальном распределении указанный эффект по протяженности базового фрактала более выражен, чем при равномерном распределении, так как нормальное распределение является более «тяжелым» и значимым для определения неопределенности количества информации.

Величина базового фрактала может служить основой для определения протяженностей субфракталов последовательного гиперфрактального распределения при решении прикладных задач. При этом при построении определенной стратегии действия с целью достижения успеха оператор может даже в одном разложении по своему усмотрению менять величину пороговой константы. Простейший пример – в игровой ситуации двух противодействующих друг другу сторон. Модель может найти применение в метрологии, теории информации, теории эффективности и в решении конкретных прикладных задач детерминированной или случайной направленности; на ее основе могут быть получены и новые результаты в теории фракталов.

Библиографический список

1. Ахметханов Р. С. Применение теории фракталов и вейвлет-анализа для выявления особенностей временных рядов при диагностике систем // Вестник научно-технического развития. – № 1 (17). – 2009. – С. 26–31.
2. Антонов В. И., Загайнов А. И., Ву ван Куанг. Автоматизированное программное обеспечение для численных мультифрактальных исследований // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2013. – № 2 (169). – С. 71–77.
3. Безручко Б. П., Смирнов Д. А. Математическое моделирование и хаотические временные ряды. – Саратов : ГосУНЦ «Колледж», 2005. – С. 320.
4. Кратчфилд Д. П., Фармер Д. Д., Паккард Н. Х., Шоу Р. С. Хаос // В мире науки. – № 2. – 1987. – С. 16–28.
5. Шустер Г. Детерминированный хаос: введение // пер. с нем. – М. : Мир, 1988. – 253 с.
6. Feder J. Fractals. – N. Y. : Springer, 1988. – 254 p.
7. Mandelbrot B. V. Les Objets Fractals: Forme, Hasard et Dimension. – Paris : Flammarion, 1975. – 190 p.
8. Смагин В. А. Моделирование случайных процессов на основе гипердельтного распределения / В. А. Смагин, Г. В. Филимоныхин // Автоматика и вычислительная техника. – 1990. – № 5. – С. 25–31.
9. Бубнов В. П. Применение гипердельтного распределения в имитационных моделях микропроцессорных систем управления и диагностики электровозов / В. П. Бубнов, В. И. Сафонов, С. А. Сергеев // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2015. – № 1 (69). – С. 39–47.
10. Смагин В. А. Техническая синергетика. Вероятностные модели сложных систем. – СПб., 2004. – 171 с.
11. Андронов А. М., Бокоев Т. Н. Оптимальное в смысле заполнения квантование информации // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1979. – № 3. – С. 154–158.
12. Дорохов А. Н. Метрологическое обеспечение эксплуатации вооружения и военной техники : учебник / 10 авт. ; под ред. А. Н. Миронова. – СПб., 2009. – 755 с.
13. Захаров А. И., Загайнов А. И. Реализация программного комплекса для вычисления фрактальных параметров сложных систем // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2015. – № 2. – С. 47–53.
14. Falconer K. Fractal geometry. – UK : Univ. St. Andrews, 2003. – 335 p.
15. Потапов А. А. Фракталы и дробные операторы в обработке информации фундаментальное направление синергетики // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 6. – С. 30–40.

16. Li H. Fractal analysis of side channels for breakdown structures in XLPE cable insulation // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron. Springer Sci.* 2013. – No 24. – Pp. 1640–1643.
17. Martínez C. A. T., Fuentes C. Chapter 1. Applications of Radial Basis Function Schemes to Fractional Partial Differential Equations // *Mathematics Fractal Analysis – Applications in Physics, Engineering and Technology* / ed. F. Brambila, 2017.
18. Agboola O., Onyango M. S., Popoola P., Oyewo O. A. Chapter 10. Fractal Geometry and Porosity // *Mathematics Fractal Analysis – Applications in Physics, Engineering and Technology* / ed. F. Brambila. – 2017.

Vladimir A. Smagin

A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Metrological Support

Vladimir P. Bubnov

«Information Technology Systems» department
Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university

Mathematical model of determinated and random processes in the form of consistent hyperfractal distribution

A mathematical model for representing deterministic and random processes in the form of a sequence of fractals is proposed. It is based on a information quantization model and a hyperdelta probability distribution. To form a sequence, a nonlinear integral equation with an integer kernel is proposed. It is used to determine basic fractal and subfractals (clusters). An example for uniform distribution is considered. The probabilistic and entropy properties of the decomposition components are evaluated. The influence of the threshold constant in the nonlinear integral equation, which is used to find the value of the base fractal, on its extent is determined. The fractal length is an important characteristic on which the amount of information placed in the fractal on the known law of its distribution depends. The answer to this question is given by examples with two probability distributions. The research results are recommended for use in metrology, information theory and efficiency theory.

nonlinear integral equation, basic fractal, constant and its value, graphical and numerical solution, distribution of the amount of information, the length of the fractal.

References

1. Ahmethanov R. S. (2009) Application of fractal theory and wavelet analysis to identify the characteristics of the time series in the diagnosis of systems [Primenenie teorii fraktalov i veyvlet-analiza dlya vyyavleniya osobennostej vremennyh ryadov pri diagnostike system]. *Bulletin of scientifictechnical development [Vestnik nauchnotekhnicheskogo razvitiya]*. – No 1 (17). – Pp. 26–31.
2. Antonov V. I., Zagajnov A. I., Vu van Kuang. (2013) Automated software for numerical multifractal research [Avtomatizirovannoe programmnoe obespechenie dlya chislennyh multifraktalnyh issledovanij]. *Scientific and technical Bulletin of St. Petersburg state technical University [Nauchnotekhnicheskie vedomosti Sankt Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta]*. – No 2 (169). – Pp. 71–77.

3. Bezruchko B. P., Smirnov D. A. (2005) Mathematical modeling and chaotic time series [Matematicheskoe modelirovanie i haoticheskie vremennye ryady]. Saratov : Gosunts «College» [Saratov : GosUNTS. Kolledzh]. – Pp. 320.
4. Kratchfeld D. P., Farmer D. D., Pakkard N. H., SHou R. S. (1987) Chaos [Haos] (1987) World of Science [V mire nauki]. No 2. – Pp. 16–28.
5. SHuster G. (1988) Deterministic chaos: an introduction [Determinirovannyj haos vvedenie], per. s nem. – Moscow : Mir. – 253 p.
6. Feder J. Fractals. – N. Y. : Springer, 1988. – 254 p.
7. Mandelbrot B. B. Les Objets Fractals: Forme, Hasard et Dimension. – Paris: Flammarion, 1975. – 190 p.
8. Smagin V. A., Filimonihin G. V. (1990) Simulation of random processes on the basis of hyperculture distribution [Modelirovanie sluchajnyh protsessov na osnove giperdeltnogo raspredeleniya]. ED [AVT]. – No 5. – Pp. 25–31.
9. Bubnov V. P., Bubnov V. P., Safonov V. I., Sergeev S. A. (2015) Application hyperculture distribution of simulation models of microprocessor control systems and diagnostics of the electric [Primenenie giperdeltnogo raspredeleniya v imitatsionnyh modelyah mikroprotsessornyh sistem upravleniya i diagnostiki ehlektrovozov]. Bulletin of all-Russian scientific research and design Institute of electric locomotive engineering [Vestnik Vserossijskogo nauchno issledovatel'skogo i proektnokonstruktorskogo instituta ehlektrovozostroeniya]. – No 1 (69). – Pp. 39–47.
10. Smagin V. A. (2004) Technical synergy. Probabilistic models of complex systems [Tekhnicheskaya sinergetika. Veroyatnostnye modeli slozhnyh system]. – St. Petersburg. – 171 p.
11. Andronov A. M., Bokojev T. N. (1979) Optimal in the sense of filling information quantization [Optimalnoe v smysle zapolneniya kvantovanie informatsii]. WPI. USSR Academy of Sciences. Technical cybernetics [Izv. AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika]. – No 3. – Pp. 154–158.
12. Dorohov A. N. (2009) Metrological support of the operation of weapons and military equipment [Metrologicheskoe obespechenie ehkspluatatsii vooruzheniya i voennoj tekhniki uchebnik], 10 auth., ed. A. N. Mironova. – St. Petersburg. – 755 p.
13. Zaharov A. I., Zagaynov A. I. (2015) Implementation of programstion of the complex to calculate the fractal parameters complex systems [Realizatsiya programmno kompleksa dlya vychisleniya fraktalnyh parametrov slozhnyh system]. Intelligent technologies for TRANSPORT [Intellektualnye tekhnologii na transporte]. – No 2. – Pp. 47–53.
14. Falconer K. Fractal geometry. – UK : Univ. St. Andrews, 2003. – 335 p.
15. Potapov A. A. (2011) The fractals and fractional operators in the developing information fundamental direction sinergitiki [Fraktaly i drobnye operatory v obrabotke informatsii fundamentalnoe napravlenie sinergetiki]. Izvestiya SFedU. Engineering science [Izv. YUFU. Tekhnicheskie nauki]. – No 6. – Pp. 30–40.
16. Li H. Fractal analysis of side channels for breakdown structures in XLPE cable insulation, J. Mater. Sci.: Mater. Electron. Springer Sci. 2013. – No 24. – Pp. 1640–1643.
17. Martínez C. A. T., Fuentes C. Chapter 1. Applications of Radial Basis Function Schemes to Fractional Partial Differential Equations, Mathematics Fractal Analysis – Applications in Physics, Engineering and Technology, ed. F. Brambila, 2017.

18. Agboola O., Onyango M. S., Popoola P., Oyewo O. A. Chapter 10. Fractal Geometry and Porosity, Mathematics Fractal Analysis – Applications in Physics, Engineering and Technology ed. F. Brambila. – 2017.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии В. А. Ходаковским
Поступила в редакцию 30.01.2019, принята к публикации 22.02.2019*

СМАГИН Владимир Александрович – заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор кафедры метрологического обеспечения, вооружения, военной и специальной техники Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского;

e-mail: va_smagin@mail.ru

БУБНОВ Владимир Петрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные и вычислительные системы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I;

e-mail: bubnov1950@yandex.ru

© Смагин В. А., Бубнов В. П., 2019

УДК 656.256.3(088.8)

В. И. Шаманов, д-р техн. наукКафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»
Российский университет транспорта, Москва

ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ С ТЯГОВОЙ СЕТЬЮ

Рассмотрены опросы повышения устойчивости работы рельсовых цепей при действии помех от переменного тягового тока. Рельсовые цепи в настоящее время используются на железных дорогах всего мира для контроля свободности от подвижного состава и контроля целостности рельсов на участке железной дороги. В современных многоуровневых системах интервального регулирования движения поездов с использованием цифровых радиоканалов и спутниковой навигации рельсовые цепи также применяются.

Найдено, что появление асимметрии продольных и/или поперечных сопротивлений рельсовых нитей является только первопричиной появления асимметрии тягового тока. Взаимная индуктивность рельсовых нитей в рельсовой линии увеличивает величину асимметрии тягового тока в несколько раз. Степень этого увеличения зависит от температуры рельсов и величины тягового тока в них.

Взаимная индуктивность рельсовых нитей рельсовой линии с параллельными рельсовыми нитями других рельсовых цепей может как увеличивать, так и уменьшать асимметрию тягового тока в зависимости от характера распределения тягового тока по рельсовым нитям близлежащих рельсовых цепей. На величину асимметрии может заметно влиять и взаимная индуктивность рельсовых нитей с линиями продольного электроснабжения, расположенными на опорах контактной сети.

Степень искажения синусоидальности сигнального тока определяется гармониками тока асимметрии. Гармонический состав помех от тягового тока может быстро изменяться во времени и зависит от количества, серии и режимов работы тягового оборудования электропоездов, движущихся в зоне между тяговыми подстанциями. Показано, что применяемые в рельсовых цепях электрические фильтры не всегда обеспечивают требуемую эффективность фильтрации помех.

рельсовые цепи, рельсовые нити, взаимная индуктивность, тяговый ток, асимметрия, помехи, гармонический состав, устойчивость работы.

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-2-160-185

Введение

Главным источником помех, оказывающих воздействие на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики, на электрифицированных участках железных дорог являются тяговые токи и их гармоники. От действия этих помех на железных дорогах России каждый час происходит

в среднем до трех десятков сбоев автоматической локомотивной сигнализации (АЛС). А сбои в работе рельсовых цепей (РЦ) от действия этих помех приводят к ложным перекрытиям показаний светофоров на более запрещающие показания. В результате ухудшается безопасность движения поездов и уменьшается пропускная способность участков железных дорог.

Несущая частота сигнальных токов выбирается так, чтобы она отличалась от частоты тягового тока и его гармоник, что позволяет повысить устойчивость работы этих устройств за счет повышения качества фильтрации помех [1]. Но величина тягового тока может на один-два порядка превышать величину сигнальных токов, что затрудняет защиту от них в слаботочной аппаратуре простым использованием электрических фильтров.

Обеспечить решение рассматриваемой задачи можно за счет применения более помехоустойчивых сигналов или совершенствования применяемых способов кодирования [2]. Эти способы перспективны при разработке новых систем.

Эффективным является применение способов снижения уровня помех при их зарождении, что требует более глубокого изучения процессов формирования помех. Многочисленные измерения в условиях эксплуатации показали, что асимметрия тягового тока в рельсовых нитях рельсовой линии всегда больше асимметрии сопротивлений этих нитей, а рост величины переменного тягового тока в рельсовой линии не приводит к пропорциональному увеличению его асимметрии.

При неизменном состоянии электрических параметров рельсовой линии величина асимметрии тягового тока в ней растет при уменьшении температуры окружающей среды. Изменения гармонического состава тяговых токов приводят к изменению степени искажения синусоидальности сигнального напряжения (тока) [3].

Некоторым результатам выяснения особенностей этих процессов посвящена настоящая статья.

1. Рельсовые цепи в современных системах железнодорожной автоматики и телемеханики

До недавнего времени контроль свободности ограниченных по длине участков железнодорожного пути и передача информации на локомотив о количестве свободных таких участков за напольным светофором обеспечивался с использованием только рельсовых цепей (РЦ).

РЦ требуют относительно высоких вложений в инфраструктуру при строительстве и относительно больших затрат на их эксплуатацию. Одним из направлений по созданию систем интервального регулирования движения поездов без РЦ является использование радиоканалов [4]. Такие системы для отечественных магистральных железных дорог начали разрабатываться

относительно давно [5, 6]. Реальное их использование сдерживалось недостаточной надежностью и защищенностью от помех поездной радиосвязи.

Появление цифровой радиосвязи сняло эти ограничения. В Германии, например, на линии Эрфурт – Лейпциг при скоростях движения до 300 км/ч работает система без светофоров, в которой используется цифровая передача данных по радиоканалу со стандартом GSM-R [7]. Используются радиоканалы и в системе управления движением поездов РТС (Positive Train Control) на железных дорогах Северной Америки [8]. Подобные системы применяются и на отечественных железных дорогах [9].

Внедрение Европейских систем обеспечения безопасности и управления движением поездов ERTMS (European Rail Traffic Management System) требует установки путевых бализ и строительства радиоблокцентров. В то же время есть три системы спутниковой связи – GPS (США), GLONASS (Россия) и Galileo (Европа), которые с относительно высокой точностью определяют местоположение транспортной единицы. Первые исследования по использованию спутниковой навигации для интервального регулирования движения поездов выполнялись еще в конце прошлого века.

Совершенствование этих систем обеспечило, например, то, что в конце февраля 2017 г. на опытном участке острова Сардиния (Италия) успешно завершился проект ERSAT EAV (ERTMS on SATELLITE – Enabling Application Validation). В этой системе обеспечена интеграция европейской системы управления движением поездов ETCS/ERTMS (European Train Control System) с системой спутниковой навигации Galileo и общедоступными сетями радиосвязи. Применение этих технологий позволяет существенно снизить стоимость внедрения ETCS на линиях с низкой интенсивностью движения поездов.

Спутниковая навигация в этой системе используется для определения местоположения поездов вместо путевых приемопередатчиков, формируя виртуальные приемопередатчики с интервалом 50 м. В проекте используются виртуальные бализы и спутниковая связь без установки путевых бализ и напольных сигналов [10].

Однако системы спутниковой навигации не обеспечивают пока требуемой точности контроля границ подвижного состава на станциях.

Контроль свободности участков пути обеспечивают также счетчики осей. Они заняли определенную нишу в выполнении этой функции на магистральных и промышленных железных дорогах, но пока существенно не потеснили РЦ [11].

На магистральных железных дорогах России, стран постсоветского пространства и развитых стран мира продолжается широкое использование РЦ для контроля свободности от подвижного состава участков пути и контроля излома рельсов. Например, на железных дорогах Германии РЦ используются для контроля участков пути примерно в половине действу-

ющих систем железнодорожной автоматики и телемеханики [12]. Используются они на железных дорогах и США [13], и, в соответствии с отчетами Железнодорожного научно-исследовательского института RTRI (Railway Technical Research Institute), в Японии [14].

Таким образом, в обозримом будущем РЦ останутся одним из основных технических средств контроля свободности участков пути в системах интервального регулирования движения поездов, что требует разработки способов повышения их надежности, помехозащищенности и совершенствования методов их технического обслуживания.

2. Источники помех, воздействующих на рельсовые цепи

Сигнальные токи РЦ величиной несколько ампер передаются от источника сигналов (путевого генератора) к путевому или локомотивному приемнику по рельсовым линиям. Эти линии используются как специфические электрические воздушные линии связи, которые подвержены температурным, механическим, электрическим и электромагнитным воздействиям, изменяющим условия передачи сигнальных токов.

Источниками помех на РЦ могут быть смежные РЦ, линии электропередач, устройства электропитания, радиочастотные электромагнитные поля, электростатические разряды, разряды молний, контактная и рельсовая линии тягового электроснабжения,

На электрифицированных железных дорогах по рельсовым линиям на тяговые подстанции текут тяговые токи электровозов, величина которых в каждой рельсовой нити может превышать при электротяге постоянного тока 1000 А, а при электротяге переменного тока – 500 А, что существенно усложняет электромагнитную обстановку для РЦ. В результате на таких участках сбоев в работе РЦ происходит в десятки раз больше, чем на участках с автономной тягой. На участках с электротягой переменного тока сбоев в работе этой аппаратуры фиксируется в среднем 1,5 раза больше, чем на участках с электротягой постоянного тока.

В РЦ с дроссель-трансформаторами (ДТ) секции их основных обмоток включены встречно. Поэтому ЭДС помех, наводимых в дополнительной обмотке ДТ, при одинаковой величине тяговых токов в ее секциях равны по величине и направлены встречно. В результате в таких случаях помех от тяговых токов на входах путевых приемников РЦ нет.

Если величины продольных и/или поперечных сопротивлений рельсовой линии в пределах РЦ становятся неодинаковыми, величины тяговых токов в рельсовых нитях различаются в местах подключения к рельсам путевых приемников РЦ и на входах этих приемников появляются помехи.

Уровни и гармонический состав помех изменяются во времени случайным образом, а нарушения нормальной работы приемников РЦ (сбои)

от их действия обычно непродолжительны. Эти сбои (самовосстанавливающиеся отказы) отрицательно влияют на бесперебойность и безопасность движения поездов. Кратковременность превышения уровнями и гармоническим составом помех допускаемых пределов, а также многочисленность причин изменения во времени этих параметров существенно усложняет выявление и устранение причин появления сбоев.

Неустойчивая работа аппаратуры РЦ вызывает ложную смену показаний напольных светофоров на более запрещающее показание. В результате поезда ложно уменьшают скорость движения, отчего уменьшается пропускная способность участков железных дорог.

Перекрытие показаний путевого светофора перед движущимся поездом вызывает автостопное торможение. Пассажиры в таких случаях испытывают дискомфорт и могут получать травмы различной тяжести от падений. В грузовом движении на колесах появляются «ползуны», а при неудачном формировании поезда легкие вагоны могут выдавливаться из него. В таких случаях ухудшается и безопасность движения.

Помехозащищенность аппаратуры РЦ от мешающего влияния тяговых токов обеспечивают разделением сигнальных и тяговых токов по частоте, кодированием сигнальных токов, а также использованием электрических фильтров и различных схемных решений [1, 3]. Достоверное выяснение причин возникновения асимметрии тягового тока в рельсовой линии и исследование процессов ее влияния на величину и гармонический состав помех обеспечивает разработку эффективных средств защиты от них.

3. Пути растекания тяговых токов по рельсовой цепи

Рельсовые линии в рельсовой сети электрифицированных железных дорог используются для пропуска тяговых и сигнальных токов по рельсовым нитям, включающим в себя рельсы, соединители на их стыках, а также различные тяговые соединители. В обход изолирующих стыков, ограничивающих РЦ, тяговый ток пропускается через ДТ.

Схема замещения неразветвленной РЦ, оборудованной ДТ, со всеми возможными путями протекания по ее элементам тягового тока показана на рис. 1. Каждая рельсовая нить представлена в виде трехполюсника.

На схеме приняты следующие условные обозначения: $Z_{рн1}$, $Z_{рн2}$ – распределенные по длине РЦ сопротивления первой и второй рельсовых нитей; $R_{рз1}$, $R_{рз2}$ – распределенные по длине РЦ сопротивления рельсов по отношению к земле в первой и второй рельсовых нитях; R_0 – распределенные по длине РЦ входные сопротивления подключаемых к рельсам цепей заземления опор контактной сети; $Z_{дт}$ – сопротивления основных обмоток ДТ; $Z_{п1н}$, $Z_{п1к}$, $Z_{п2н}$, $Z_{п2к}$ – сопротивления дроссельных перемычек в

начале и в конце РЦ соответственно в первой и второй рельсовых нитях; $R_{ис1}, R_{ис2}, R_{ис3}, R_{ис4}$ – сопротивления изолирующих стыков, ограничивающих РЦ; $Z_{вхТ1}, Z_{вхТ2}$ – входные сопротивления соответственно первой и второй рельсовых нитей для тягового тока; $Z_{п1}, Z_{п2}, Z_{п3}, Z_{п4}$ – сопротивления дроссельных перемычек в смежных РЦ; M_{12} – взаимная индуктивность между рельсовыми нитями РЦ; $\dot{I}_{тн}, \dot{I}_{тк}$ – тяговые токи, втекающие в РЦ и вытекающие из нее; $\dot{I}_{тн1}, \dot{I}_{тк1}, \dot{I}_{тн2}, \dot{I}_{тк2}$ – тяговые токи в начале и в конце соответственно первой и второй рельсовых нитей; $\dot{I}'_{Т1}, \dot{I}''_{Т1}$ – тяговые токи в рельсах в начале и в конце трехполосника, замещающего первую рельсовую нить; $\dot{I}'_{Т2}, \dot{I}''_{Т2}$ – тяговые токи в рельсах в начале и в конце трехполосника, замещающего вторую рельсовую нить; $\dot{I}_{тр3}$ – тяговый ток, утекающий из рельсов в землю; $\dot{I}_{ис1}, \dot{I}_{ис}, \dot{I}_{ис3}, \dot{I}_{ис4}$ – тяговые токи соответственно в первом, втором, третьем и четвертом изолирующих стыках; $\dot{I}_{ТПр1}, \dot{I}_{ТПр2}, \dot{I}_{ТПр2}, \dot{I}_{ТПр2}$ – тяговые токи в рельсовых нитях смежных РЦ.

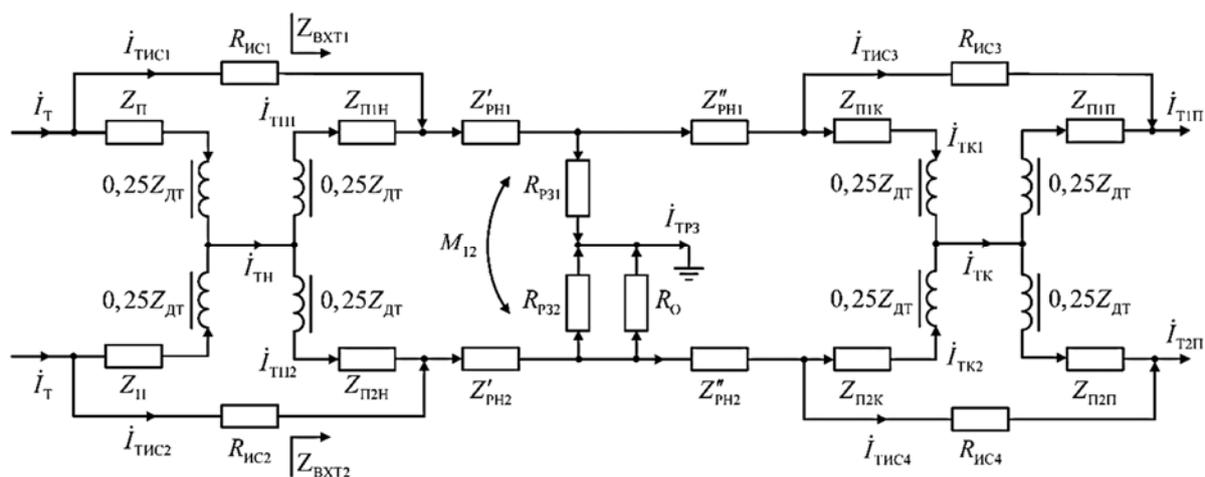


Рис. 1. Схема растекания тягового тока по неразветвленной РЦ

Продольные сопротивления рельсовых нитей могут изменяться по их длине. В таких случаях $Z'_{рн} \neq Z''_{рн}$.

Расчеты показывают, что при замещении рельсовой нити Т-образным трехполосником можно не учитывать с погрешностью 5 % распределенность ее продольного и поперечного сопротивления на частоте 50 Гц до длины, равной 0,4 км [15]. С ростом частоты гармоники тягового тока эта длина уменьшается. Поэтому при повышении частоты гармоники и/или длины РЦ в схеме замещения каждая рельсовая нить представляется последовательным соединением Т-образных схем.

Разность величин тяговых токов в рельсовых нитях в определенной точке рельсовой линии $\dot{I}_{AI}(x) = \dot{I}_{T1}(x) - \dot{I}_{T2}(x)$, где $\dot{I}_{T1}(x)$ и $\dot{I}_{T2}(x)$ – тяговые токи в соответствующей точке x первой и второй рельсовых нитей, называют асимметрией тягового тока.

Относительную величину этого параметра количественно оценивают коэффициентом асимметрии тягового тока

$$k_{AI}(x) = \frac{\dot{I}_{T1}(x) - \dot{I}_{T2}(x)}{\dot{I}_{T1}(x) + \dot{I}_{T2}(x)}. \quad (1)$$

Для РЦ интересна асимметрия тягового тока на ее концах, где к рельсам подключается передающая или приемная аппаратура.

При электротяге постоянного тока утечку тягового тока из рельсов в землю минимизируют из-за его коррозионного действия на подземные сооружения увеличением сопротивления между рельсовыми линиями и землей [16].

В тяговых сетях переменного тока удельное сопротивление рельсов по отношению к земле меняется от минимальной величины, равной 0,5 Ом/км, до максимально возможного его значения 18,0 Ом/км [17]. Для переменного тягового тока частотой 50 Гц сопротивление рельсов примерно в 4 раза больше, чем для тягового постоянного тока. Эта разница увеличивается с ростом частоты гармоники тягового тока.

Продольное сопротивление рельсовых нитей с течением времени увеличивается вследствие роста электрического сопротивления элементов в стыках рельсовых звеньев. Несимметричное изменение продольных сопротивлений $Z_{рн1}$ и $Z_{рн2}$ является одной из основных причин появления асимметрии тягового тока.

Переменный тяговый ток активно стекает в землю так, что при талом грунте в рельсах остается примерно 10 % тягового тока электровоза на расстоянии 4–5 км от него. И чем больше продольное сопротивление рельсовой нити $Z_{рн1}$ или $Z_{рн2}$, тем сильнее тяговый ток стекает из нее в землю при том же сопротивлении рельсов по отношению к земле соответственно $R_{рз1}$ или $R_{рз2}$, что увеличивает влияние асимметрии поперечных сопротивлений рельсовой линии на величину асимметрии тягового тока в ней.

В цепях заземления опор контактной сети, подключаемых к рельсам, для увеличения их сопротивлений R_0 устанавливаются искровые промежутки ИПМ-56М [18]. Надежность их относительно невысока, а проверка их состояния трудоемка [19]. Практически проверку состояния искровых промежутков проводят обычно только на участках, где растет интенсивность сбоев РЦ и/или автоматической локомотивной сигнализации (АЛС). Поэтому данные цепи заземления могут быть в течение достаточно долго-

го времени дополнительными цепями утечки тягового тока из рельсов в землю, увеличивая его асимметрию.

Изолирующие стыки относятся к самым ненадежным элементам из элементов РЦ [20]. При ухудшении их электроизолирующих свойств тяговый ток через них растет. Несимметричное уменьшение сопротивления изолирующих стыков $R_{ис1}$ и $R_{ис2}$ или $R_{ис3}$ и $R_{ис4}$ вызывает изменение асимметрии тягового тока в рельсовой линии.

Разветвленные РЦ могут быть оборудованными несколькими ДТ [21], поэтому схема растекания тяговых токов в них сложнее. В зоне подключения к рельсовой тяговой сети отсасывающих линий тяговых подстанций тяговый ток может втекать из земли в рельсовые нити [22].

Устойчивость работы и РЦ, и АЛС определяется соотношением «сигнал:помеха» на входе их приемников. При уменьшении сопротивлений рельсов по отношению к земле $R_{рз1}$ и $R_{рз2}$ растет утечка сигнального тока по длине рельсовой линии и уменьшается его величина на входе путевого приемника и в рельсах под приемными катушками АЛС. Увеличение продольного сопротивления рельсовых нитей приводит к росту падения сигнального напряжения на них, что также ухудшает соотношение «сигнал:помеха» на входе приемников. В результате приемники становятся более чувствительными к помехам.

3. Первопричина возникновения асимметрии тягового тока

Несимметричное увеличение в рельсовых нитях сопротивлений токопроводящих, изолирующих стыков и/или дроссельных перемычек вызывает продольную асимметрию сопротивления рельсовой линии.

Поперечная асимметрия сопротивления рельсовой линии возникает при несимметричности изменения сопротивления рельсовых нитей по отношению к земле. Появляется она обычно при отказах в цепях заземления опор контактной сети и других конструкций, подключаемых к внешней рельсовой нити как к распределенному заземлителю. В рельсовых линиях с железобетонными шпалами поперечная асимметрия может быть также следствием несимметричного уменьшения электрического сопротивления изолирующих элементов шпал.

При анализе особенностей протекания тяговых токов по рельсовой линии рельсовые нити рассматриваются как две однопроводные электрические линии рельсы – земля, которые обладают взаимной индуктивностью, вызываемой их внешней индуктивностью [23–25]. Удельное сопротивление взаимной индуктивности этих линий $z_M = j\omega M_{12}$, где M_{12} – величина взаимной индуктивности рельсовых нитей, ω – частота тягового тока или его соответствующей гармоники.

Для стационарных РЦ наиболее характерна продольная асимметрия сопротивлений рельсовых нитей, поэтому в первом приближении поперечную асимметрию можно не учитывать. В перегонных РЦ с поперечной асимметрией сопротивлений рельсовых нитей можно не считаться при замершем балласте и отсутствии цепей заземления на рельсы опор контактной сети.

В таких случаях распределение падения напряжения \dot{U}_{T1} и \dot{U}_{T2} по элементам рельсовых нитей рельсовой линии длиной l , в которых протекают тяговые токи соответственно \dot{I}_{T1} и \dot{I}_{T2} ,

$$\dot{U}_{T1} = \dot{I}_{T1}z_{P1}l + \dot{I}_{T2}z_Ml + \dot{I}_{T1}nz_{ДТ}; \quad (2)$$

$$\dot{U}_{T2} = \dot{I}_{T2}z_{P2}l + \dot{I}_{T1}z_Ml + \dot{I}_{T2}nz_{ДТ}, \quad (3)$$

где z_{P1} , z_{P2} – удельные сопротивления рельсов с учетом сопротивлений рельсовых стыковых соединителей в рельсовых нитях соответственно 1 и 2, z_M – удельное сопротивление взаимной индуктивности рельсов в рельсовых нитях как однопроводных линий при протекании по ним тяговых токов, $z_{ДТ}$ – сопротивление секции основной обмотки ДТ для тягового тока, n – коэффициент, принимаемый равным единице при анализе рассматриваемых помех в аппаратуре АЛС и равным количеству ДТ в РЦ – при анализе помех в ее аппаратуре.

При анализе помех в РЦ за длину l принимается полная ее длина, а при исследовании помех под катушками АЛС – это длина от первой колесной пары головного локомотива до места подключения к рельсам передатчика сигнальных токов.

Уравнения (2) и (3) справедливы при отсутствии асимметрии тягового тока в рельсовой линии, т. е. когда $\dot{I}_{T1} = \dot{I}_{T2}$. Если это равенство не выполняется и, например, $\dot{I}_{T1} > \dot{I}_{T2}$, то эти уравнения можно записать в следующем виде [26]:

$$\dot{U}_{T1} = \dot{I}_{T1} \left(z_{P1}l + \frac{1 - k_{AI}}{1 + k_{AI}} z_Ml + nz_{ДТ} \right); \quad (4)$$

$$\dot{U}_{T2} = \dot{I}_{T2} \left(z_{P2}l + \frac{1 + k_{AI}}{1 - k_{AI}} z_Ml + nz_{ДТ} \right). \quad (5)$$

Из уравнений (4) и (5) удельные сопротивления рельсовых нитей в рассматриваемых условиях при наличии асимметрии тягового тока

$$\frac{\dot{U}_{T1}}{\dot{I}_{T1}l} = z_{ph1} = z_{P1} + \frac{1 - k_{AI}}{1 + k_{AI}} z_M + nz_{ДТ} / l; \quad (6)$$

$$\frac{\dot{U}_{T2}}{\dot{I}_{T2}l} = z_{ph2} = z_{P2} + \frac{1 + k_{AI}}{1 - k_{AI}} z_M + nz_{ДТ} / l. \quad (7)$$

Сопротивления рельсовых нитей зависят от частоты тока ω , протекающего по ним. С учетом этого формулы (6) и (7) можно записать в следующем виде:

$$z_{ph1} = r_{P1} + j\omega L_{P1} + \frac{1 - k_{AI}}{1 + k_{AI}} j\omega M_{12} + nj\omega L_{ДТ} / l; \quad (8)$$

$$z_{ph2} = r_{P2} + j\omega L_{P2} + \frac{1 + k_{AI}}{1 - k_{AI}} j\omega M_{12} + nj\omega L_{ДТ} / l, \quad (9)$$

где r_{P1}, r_{P2} – суммарные удельные активные сопротивления рельсов с учетом сопротивлений рельсовых стыковых соединителей в рельсовых нитях соответственно 1 и 2; L_{P1}, L_{P2} – удельные индуктивности рельсов с учетом индуктивностей рельсовых стыковых соединителей в рельсовых нитях соответственно 1 и 2; $L_{ДТ}$ – индуктивность секции основной обмотки ДТ.

Из уравнений (8) и (9) видно, что с ростом частоты тока в рельсовой линии все члены этих уравнений, кроме первых, растут пропорционально частоте тока. Это необходимо учитывать при анализе уровней помех, создаваемых разными гармониками тяговых токов.

4. Влияние взаимной индуктивности рельсовых нитей на асимметрию тягового тока

Как видно из формул (6) и (7), на продольную асимметрию сопротивления рельсовой линии влияет не только асимметрия удельных сопротивлений рельсов и рельсовых стыковых соединителей сопротивлений рельсовых нитей, но и возникающая асимметрия взаимной индуктивности рельсовых нитей. В случаях, когда контролируемым (выходным) параметром рельсовой линии как объекта контроля является асимметрия тягового тока, необходимо учитывать, что рельсовая линия обладает своеобразной положительной обратной связью, создаваемой взаимной индуктивностью рельсовых нитей [26].

Для более четкого разделения составляющих асимметрии тягового тока в рельсовой линии по факторам, ее вызывающим, введем понятие дей-

ствующего удельного сопротивления взаимной индуктивности рельсовых нитей, обозначив его z'_M . Из формул (6) и (7) для рельсовых нитей 1 и 2 при $\dot{I}_{T1} > \dot{I}_{T2}$

$$z'_{M1} = \frac{1 - k_{AI}}{1 + k_{AI}} z_M; \quad z'_{M2} = \frac{1 + k_{AI}}{1 - k_{AI}} z_M. \quad (10)$$

Введем также следующие термины: коэффициент асимметрии удельных сопротивлений рельсов в рельсовых нитях k_{AP} и коэффициент асимметрии действующих удельных сопротивлений от взаимной индуктивности рельсовых нитей k_{AM} . Тогда с учетом принятого соотношения тяговых токов в рельсовых нитях $\dot{I}_{T1} > \dot{I}_{T2}$

$$k_{AP} = \frac{z_{P2} - z_{P1}}{z_{P1} + z_{P2}}, \quad k_{AM} = \frac{z'_{M2} - z'_{M1}}{z'_M + z'_{M2}} = \frac{2k_{AI}}{1 + k_{AI}^2}. \quad (11)$$

В пределах РЦ или отрезков рельсовых линий от первой колесной пары головного электровоза до конца РЦ падение тягового напряжения на рельсовых нитях $\dot{U}_{T1} = \dot{U}_{T2}$. Следовательно, $\dot{I}_{T1} z_{PH1} = \dot{I}_{T2} z_{PH2}$. Отсюда $\dot{I}_{T1} / \dot{I}_{T2} = z_{PH2} / z_{PH1}$ и $k_{AI} = k_{AP}$. Таким образом, тяговые токи в рельсовых нитях в общем случае обратно пропорциональны входным сопротивлениям рельсовых нитей в РЦ или входным сопротивлениям отрезков рельсовых нитей, лежащих впереди головного электровоза поезда.

На рис. 2 показаны найденные зависимости соотношения k_{AM} / k_{AP} от абсолютного значения удельного сопротивления рельсов $|z_P|$ при разных значениях коэффициента асимметрии тягового тока k_{AI} в рельсовой линии. Видно, что при малых значениях удельного сопротивления рельсов асимметрия тягового тока формируется в основном под действием асимметрии сопротивления взаимной индуктивности рельсовых нитей. Рост удельного сопротивления рельсов и увеличение асимметрии тягового тока вызывают уменьшение влияния асимметрии взаимной индуктивности рельсов на величину асимметрии тягового тока.

При низких температурах окружающей среды и невысоких значениях тягового тока в рельсах асимметрия сопротивления рельсовых нитей k_{AP} является причиной появления не более 20 % асимметрии тягового тока в рельсовой линии, измеряемой относительной величиной – коэффициентом асимметрии тягового тока k_{AI} .

С ростом температуры и/или величины тягового тока влияние асимметрии сопротивления рельсовых нитей на асимметрию тягового тока рас-

тет. При движении тяжеловесных поездов, когда температура окружающей среды составляет около $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, асимметрией сопротивления рельсовых нитей вызывается рост коэффициента асимметрии тягового тока до 30 %.

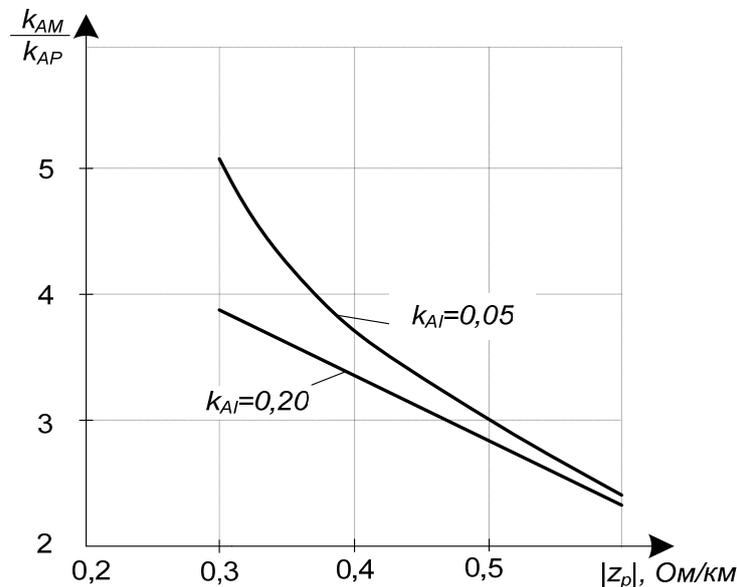


Рис. 2. Влияние величины сопротивления рельсов на зависимость асимметрии тягового тока от асимметрии взаимной индуктивности рельсов

Рассмотрим случай, когда поперечная асимметрия отсутствует и в рассматриваемый момент времени t тяговый ток в первой рельсовой нити \dot{I}_{T1} больше тягового тока во второй рельсовой нити \dot{I}_{T2} , т. е. соотношения сопротивления рельсовых нитей $z_{\rho n2} > z_{\rho n1}$, а сопротивления рассматриваемых переходов $r_{n2} > r_{n1}$. Тогда выражения для вычисления удельных сопротивлений рельсовых нитей с учетом [6] и формул (6), (7) можно записать в следующем виде:

$$z_{\rho n1} = z_{\rho n}(0) + r_{n1} + \frac{1 - k_{AI}}{1 + k_{AI}} z_M; \quad (12)$$

$$z_{\rho n2} = z_{\rho n}(0) + r_{n2} + \frac{1 + k_{AI}}{1 - k_{AI}} z_M, \quad (13)$$

где $z_{\rho n}(0)$ — удельное расчетное сопротивление рельсовой нити в начальный момент времени сразу после проведения капитального ремонта пути.

Из формул (12) и (13) выражение для вычисления коэффициента асимметрии сопротивлений рельсовых нитей в рассматриваемый момент времени

$$k_{AZ} = \frac{z_{pH2} - z_{pH1}}{z_{pH2} + z_{pH1}} = \frac{r_{n2} - r_{n1} + 4 \frac{k_{AI}}{1 - k_{AI}^2} z_M}{2z_{pH}(0) + r_{n2} + r_{n1} + 2 \frac{1 + k_{AI}^2}{1 - k_{AI}^2} z_M}. \quad (14)$$

Из формулы (14) видно, что процесс формирования асимметрии тягового тока в рельсовых линиях обладает своеобразной положительной обратной связью. Действительно, асимметрия сопротивлений рельсовых нитей k_{AZ} вызывает появление асимметрии тягового тока k_{AI} . Но величина асимметрии тягового тока влияет в свою очередь на величину асимметрии сопротивления рельсовых нитей. Вызвано это действием взаимной индуктивности рельсовых нитей.

Таким образом, процесс формирования асимметрии тягового тока в рельсовой линии можно представить в виде системы с положительной обратной связью, схема которой показана на рис. 3.

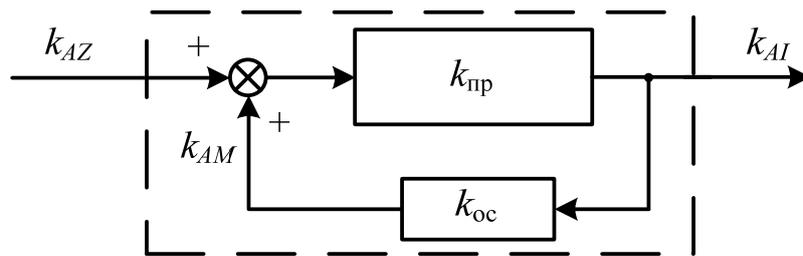


Рис. 3. Модель процесса формирования асимметрии тягового тока в рельсовой линии

Коэффициент передачи у этого процесса k_{IZ} по каналу *коэффициент асимметрии сопротивлений рельсовых нитей – коэффициент асимметрии тягового тока* можно найти по формуле

$$k_{IZ} = \frac{k_{AI}}{k_{AZ}} = \frac{k_{пр}}{1 - k_{ос} k_{пр}}, \quad (15)$$

где $k_{пр} = k_{AI} / (k_{AZ} + k_{AM})$ – коэффициент передачи в прямом канале; $k_{ос} = k_{AM} / k_{AI}$ – коэффициент обратной связи.

Проведенные исследования показали, что в рельсовой линии с рельсами типа Р65 при токе частотой 50 Гц коэффициент обратной связи в системе мало зависит от электрических параметров рельсовых нитей и его среднее значение $k_{ос} = 1,96$. Коэффициент передачи в прямом канале $k_{пр}$ является функцией сопротивления рельсов. Величина этого коэффициента

изменяется в диапазоне от 0,423 до 0,357 при изменении удельного сопротивления рельсов в диапазоне от 0,3 до 0,6 Ом/км [27].

При отсутствии утечки тяговых токов из рельсов в землю тяговые токи распределяются по рельсовым нитям РЦ обратно пропорционально их сопротивлениям. Асимметрия тягового тока под катушками АЛС вызывается разницей тяговых токов, утекающих вперед от головного электровоза поезда, поэтому значения этих токов обратно пропорциональны величинам входных для них сопротивлений лежащих впереди отрезков рельсовых нитей.

Следовательно, коэффициент асимметрии сопротивлений рельсовых нитей в обоих рассматриваемых случаях в определенный момент времени рассчитывается по формуле $k_{AZ} = \left| \frac{z_{рн1} - z_{рн2}}{z_{рн1} + z_{рн2}} \right|$. Поэтому для данных случаев при $r_{п2} > r_{п1}$ можно записать:

$$k_{AI} = \frac{r_{п2} - r_{п1} + 4 \frac{k_{AI}}{1 - k_{AI}^2} z_M}{2z_{рн}(0) + r_{п2} + r_{п1} + 2 \frac{1 + k_{AI}^2}{1 - k_{AI}^2} z_M}. \quad (16)$$

Уравнение для вычисления коэффициента асимметрии тягового тока в рельсовой линии в требуемый момент времени для рассматриваемых случаев с учетом формулы (16)

$$a_3 k_{AI}^3 + a_2 k_{AI}^2 - a_1 k_{AI} - a_0 = 0, \quad (17)$$

где $a_3 = a_1 = 2z_M - 2z_{рн}(0) - r_{п2} - r_{п1}$; $a_2 = a_0 = r_{п2} - r_{п1}$.

Представляется интересным исследование вклада взаимной индуктивности рельсовых нитей в величину асимметрии тягового тока. На рис. 4 показаны графики найденных зависимостей отношения асимметрии тягового тока в рельсовой линии k_{AI} к величине продольной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей в ней k_{AZ} от величины модуля их расчетного удельного сопротивления $z_{рн}$. Поскольку процесс формирования асимметрии тягового тока в рельсовой линии обладает обратной связью (см. рис. 1), исследования проводились при разных значениях коэффициента асимметрии тягового тока k_{AI} .

Из графиков на рис. 4 видно, что за счет действия внешней индуктивности рельсов асимметрия тягового тока в рельсовых линиях может возрасти в 2,5 раза. С ростом удельного сопротивления рельсовых нитей и с увеличением коэффициента асимметрии тягового тока влияние взаимной индуктивности рельсовых нитей на величину асимметрии тягового тока ослабляется.

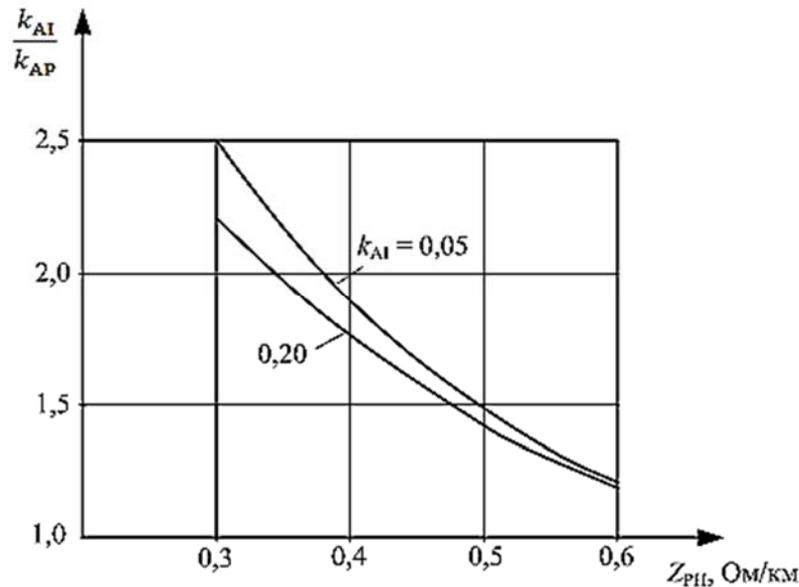


Рис. 4. Зависимость степени действия внешней индуктивности рельсов на асимметрию тягового тока от величины удельного сопротивления рельсовых нитей

Первое определяется тем, что с ростом удельного электрического сопротивления эксплуатируемых рельсовых нитей $z_{рн}(0)$ растет его численное значение в знаменателе формулы (16) при неизменном численном значении соотношении $(r_{п2} - r_{п1}) / (r_{п2} + r_{п1})$. Второе вызвано тем, что с ростом коэффициента асимметрии тягового тока k_{AI} уменьшается в определенной степени действие положительной обратной связи.

При исследовании распределения асимметрии тягового тока по длине РЦ следует учитывать, что если есть утечка тяговых токов из рельсов в землю, то коэффициент асимметрии тягового тока изменяется по длине рельсовой линии. Поэтому вычисление в таких условиях коэффициента асимметрии тягового тока на выходном для этого тока конце рельсовой линии в месте установки аппаратуры РЦ представляет более сложную задачу.

Таким образом, первопричиной возникновения асимметрии тягового тока в рельсовой линии является появление продольной и/или поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей. Действие взаимной индуктивности рельсовых нитей усиливает этот процесс, и при наличии только продольной асимметрии сопротивления рельсовой линии может привести к увеличению коэффициента асимметрии тягового тока в 1,2–2,5 раза в зависимости от величины текущего значения сопротивлений рельсовых нитей.

С ростом сопротивления рельсов влияние асимметрии сопротивлений рельсовых нитей на асимметрию тягового тока уменьшается. Поэтому увеличение тягового тока в рельсах при движении тяжеловесных поездов и в

районах тяговых подстанций не приводит к пропорциональному росту количества сбоев в работе РЦ и АЛС.

Полученные результаты обеспечивают возможность разработки технических мер, обеспечивающих снижение уровня помех на РЦ и АЛС, создаваемых тяговыми токами в рельсах.

5. Влияние взаимных индуктивностей с другими электрическими линиями

Магнитные связи рельсовых нитей с рельсовыми нитями других РЦ, с контактными проводами и высоковольтными линиями электроснабжения обусловлены влиянием магнитных полей. Конечно, взаимные влияния вызываются в действительности действием единого электромагнитного поля, а такое раздельное рассмотрение действия только магнитного поля используется только из соображений удобства исследования.

Магнитная связь определяется отношением электродвижущей силы, наведенной в соответствующей точке рельсовой нити, к току во влияющей цепи с обратным знаком. Магнитные связи содержат активную и реактивную составляющие. Активная составляющая магнитных связей на рассматриваемых частотах в тяговой рельсовой сети по аналогии с воздушными линиями связи находится в диапазоне до десяти миллиомов [28]. Поэтому данные связи можно считать чисто индуктивными.

Рассмотрим магнитные связи для рельсовых нитей РЦ двухпутного перегона на участке с электротягой переменного тока. РЦ длиной $l_{\text{РЦ}}$ ограничены изолирующими стыками с ДТ. На рис. 5 для такого случая показаны взаимные индуктивности между рельсовыми нитями, контактными проводами и линиями продольного электроснабжения (ЛЭП), размещенными на опорах контактной сети [29]. Там же показано распределение тяговых токов по этим элементам. Рельсовые линии и контактные провода нумеруются слева направо.

Сопrotивления рельсовых нитей Z_{1x} , Z_{2x} , Z_{3x} и Z_{4x} включают в себя продольные и поперечные электрические сопротивления, которые в общем случае не остаются неизменными по длине x рельсовых линий. Продольные сопротивления РН включают в себя сопротивления сплошных рельсов, стыковых соединителей, дроссельных перемычек и секций основных обмоток ДТ. Причинами изменения во времени продольных сопротивлений РН являются повреждения и старение стыковых соединителей и дроссельных перемычек.

Поперечные сопротивления рельсовой линии включают в себя сопротивления шпал и поверхностного слоя балласта R_{12x} , R_{34x} , сопротивления рельсов по отношению к земле R_{13x} , R_{23x} , R_{33x} , R_{43x} и входные сопротивления цепей заземления опор контактной сети R_{10x} , R_{40x} . Для уменьшения

потерь мощности в рельсовой тяговой сети и выравнивания тяговых токов в рельсовых линиях вдоль перегона устанавливаются междупутные перемычки, не показанные на рис. 5.

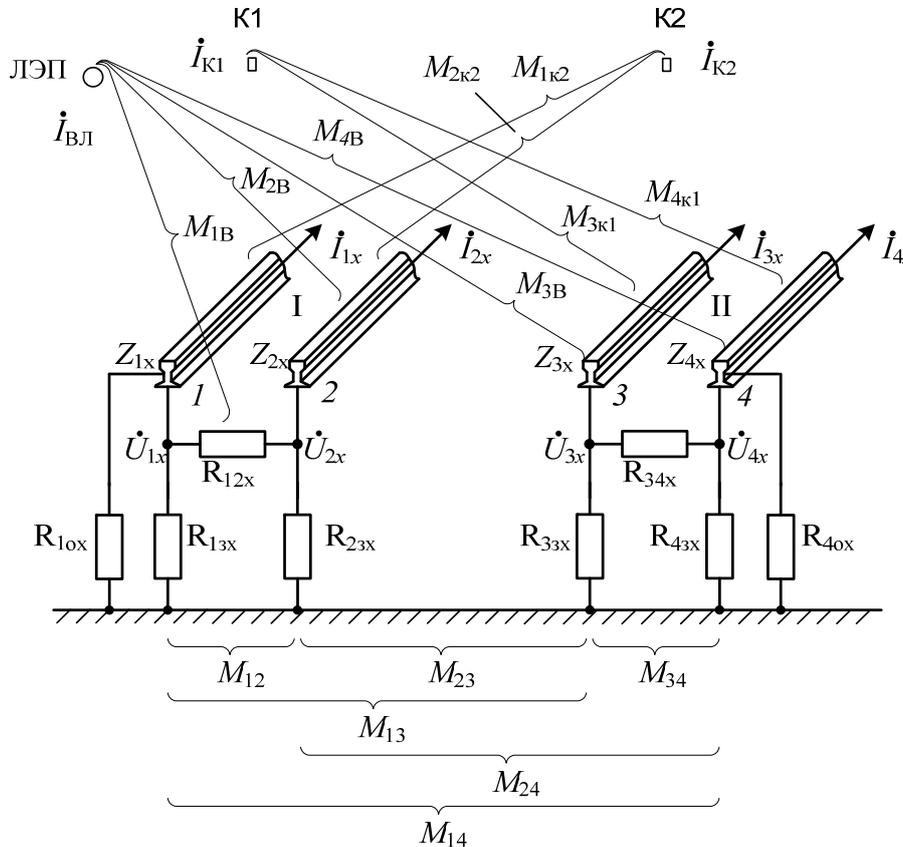


Рис. 5. Электрические и магнитные параметры рельсовых линий двухпутного электрифицированного участка железной дороги

Величины сопротивлений R_{12x} и R_{34x} изменяются при ухудшении состояния электроизолирующих элементов железобетонных шпал или при увлажнении поверхности загрязненных деревянных шпал. Величины сопротивлений R_{13x} , R_{23x} , R_{33x} и R_{43x} зависят от состояния балласта. Величины сопротивлений R_{10x} и R_{40x} уменьшаются при ухудшении состояния электроизолирующих элементов в цепях заземления опор контактной сети.

Величины тяговых токов в рельсовых нитях i_{1x} , i_{2x} , i_{3x} и i_{4x} изменяются по длине РН, если меняется интенсивность стекания тяговых токов из рельсов в землю. Происходит это при изменении соотношения величин продольного и поперечного сопротивлений РН ее длине. Тяговые токи в контактных проводах К1 и К2 обозначены i_{K1} и i_{K2} , а ток в линии продольного электроснабжения ЛЭП обозначен $i_{ВЛ}$. Все эти токи изменяются во времени.

Взаимные индуктивности обозначены: между рельсовыми нитями своего и соседнего путей $M_{12}, M_{13}, M_{14}, M_{13}, M_{14}, M_{34}$; между РН и контактными проводами соседних путей $M_{1К2}, M_{2К2}, M_{3К1}, M_{4К1}$; между соответствующими РН и проводами ЛЭП $M_{1В}, M_{2В}, M_{3В}, M_{4В}$. Симметричные взаимные индуктивности между контактными проводами $M_{1К1}, M_{2К1}$ и РН собственных рельсовых линий $M_{3К2}, M_{4К2}$ на рис. 5 не показаны, чтобы не загромождать схему.

Если пренебречь радиусами эквивалентных проводов, равных периметру сечения рельсов, контактных проводов или проводов ЛЭП ввиду их относительной малости по сравнению с учитываемыми расстояниями, то удельные взаимные индуктивности между электрическими линиями можно вычислять с учетом [25] по формуле, Гн/км,

$$M_{12} = \left[1 + 2 \ln \frac{2}{1,78 l_{ij} \sqrt{4\pi\sigma f}} - j \frac{\pi}{2} \right] \cdot 10^{-4},$$

где f – частота соответствующей гармоники тягового тока; l_{ij} – расстояние между осями i -й влияющей и j -й электрическими линиями, обладающими взаимной индуктивностью; σ – удельная проводимость земли, См/м.

Величина удельной взаимной индуктивности между электрическими линиями обратно пропорциональна расстоянию между ними. Однако темп уменьшения этой индуктивности заметно меньше темпа увеличения рассматриваемого расстояния.

Например, на частоте тягового тока 50 Гц при расстоянии между рельсовыми нитями с рельсами типа Р50, равном 1,52 м, величина удельной взаимной индуктивности РН равна $1,35 e^{-j7^\circ}$ мГн/км [8]. При высоте подвески контактного провода над верхом головки рельса 6,55 м удельная взаимная индуктивность контактного провода и рельсовой нити в тех же условиях составляет $1,07 e^{-j9^\circ}$ мГн/км [23]. Следовательно, при увеличении расстояния между однопроводными электрическими линиями в 4,31 раза взаимная индуктивность между ними на частоте 50 Гц уменьшается только в 1,26 раза.

Удельные сопротивления взаимной индуктивности i -й и j -й электрических линий $z_{Mij} = j\omega M_{ij}$, где ω – частота соответствующей гармоники тягового тока. Расстояния между РН соседних путей и от контактных проводов и ЛЭП до каждой из РН соответствующей рельсовой линии различны. Поэтому различны и соответствующие удельные сопротивления взаимной индуктивности $z_{M13} \neq z_{M14}, z_{M23} \neq z_{M24}, z_{M1К2} \neq z_{2К2}, z_{M1В} \neq z_{M2В}, z_{M3К1} \neq z_{M4К1}, z_{M3В} \neq z_{M4В}$.

Взаимные индуктивности рельсовых нитей конкретной РЦ с другими электрическими линиями могут как увеличивать, так и уменьшать асимметрию тягового тока в рассматриваемой РЦ. Это зависит от соотношения величин тягового тока во влияющей линии и подверженных влиянию рельсовых нитей, а также от соотношения расстояний между ними.

6. Влияние гармонического состава тягового тока на рельсовые цепи

Форма сигнального тока может существенно искажаться от действия помех [3]. Гармонический состав помех от тягового тока может существенно влиять на устойчивость работы РЦ и АЛС.

Искажения синусоидальности кривой напряжения (тока) в соответствии с ГОСТ [30] характеризуются коэффициентом этих искажений, равным отношению действующего значения суммы гармонических составляющих к действующему значению основной составляющей переменного напряжения. Другим показателем служит коэффициент нелинейных искажений, определяющий вес высших гармоник переменного напряжения по отношению к напряжению основной гармоники.

Чем меньше коэффициент нелинейных искажений, тем ближе форма кривой напряжения к чистой синусоиде. Если коэффициент нелинейных искажений меньше 3 %, то искажения почти незаметны.

Для электроподвижного состава в качестве показателя степени этого искажения используют коэффициент гармонической составляющей тока, вычисляемый как отношение действительного значения n -й гармонической составляющей тягового тока к действительному значению первой гармонической составляющей тягового тока одной секции электровоза или одиночного электровоза [24].

При электротяге переменного тока в тяговом токе обычно присутствуют нечетные гармоники частоты 50 Гц. На участках с электротягой постоянного тока в тяговом токе появляются четные гармоники этой частоты от пульсаций выпрямленного тока и при нарушениях нормальной работы выпрямительных установок на тяговой подстанции [31].

Степень искажения формы тягового тока зависит от серии электровоза, степени нагрузки на него, количества электровозов в зоне между тяговыми подстанциями [24, 32]. Если на электровозах в качестве тяговых используются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором при частотном регулировании их скорости вращения, то в тяговом токе может присутствовать весь спектр рабочих частот РЦ и АЛС [33].

Насыщения сердечников ДТ при больших токах асимметрии также вызывают искажения формы кривой сигнального тока или напряжения [15].

На рис. 6 показано, как изменялась форма напряжения на дополнительной обмотке ДТ в фазочувствительной РЦ с реле типа ДСШ-13 при

приближении поезда к горловине станции Половина Восточно-Сибирской железной дороги, электрифицированной на переменном токе. В этой горловине расположена тяговая подстанция, сбои в работе РЦ были относительно часты.

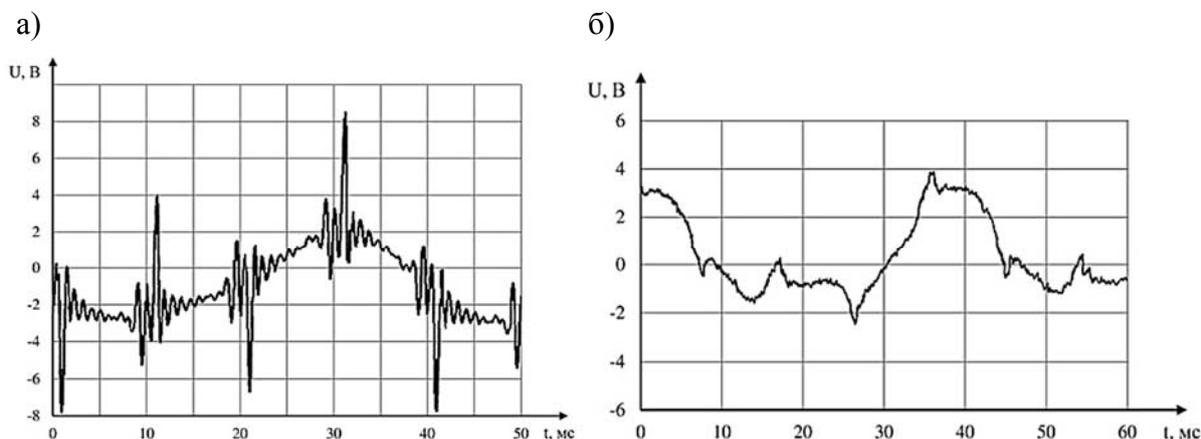


Рис. 6. Напряжения на дополнительной обмотке ДТ

Изменения режимов работы тяговых двигателей на приближающемся электровозе и одновременные изменения поездной ситуации в зонах между тяговыми подстанциями существенно влияли на степень искажения синусоидальности кривой сигнального напряжения. Например, в записанной цифровым осциллографом кривой напряжения на рис. 6,а видны импульсы с частотой 450 Гц. На рис. 6,б основное искажение синусоидальности сигнального тока происходит из-за первой гармоники тягового тока.

Используемые в таких РЦ защитные блоки типа ЗБ-ДСШ эффективны только для ослабления тока помехи частотой 50 Гц через путевую обмотку реле ДСШ. Поэтому помехи, содержащие в своем составе достаточно большие токи других гармоник тягового тока, вызывают ложное отпадание секторов этих реле [1].

Тональные РЦ наименее чувствительны к помехам. Однако на перевальном участке через Северобайкальский хребет фиксировались сбои в работе и этих РЦ при движении тяжеловесных поездов [3]. На рис. 7 приведен фрагмент записи сигнального напряжения с частотой 480 Гц и частотой модуляции 8 Гц на входе путевого приемника ППЗ. Осциллограмма на рис. 7,а записана при величине переменного тягового тока в рельсах 57 А и его асимметрии в месте подключения путевого приемника 2,8 А. На рис. 7,б приведена осциллограмма, записанная при движении тяжеловесного поезда, когда ток в рельсовой линии был 473 А, а ток асимметрии составлял 20,0 А.

Уровень помех от тягового тока, соответствующий их амплитудам в интервалах между импульсами сигнального тока, в обоих случаях примерно одинаков. Однако разный частотный спектр этих помех определил го-

раздо большее искажение формы сигнальных импульсов, зафиксированных на рис. 7,б.

Следовательно, даже многократная фильтрация сигнальных токов в приемниках тональных РЦ не гарантирует их устойчивой работы при повышенном уровне помех. Таким образом, вопрос о повышении эффективности фильтров, используемых в РЦ, остается актуальным.

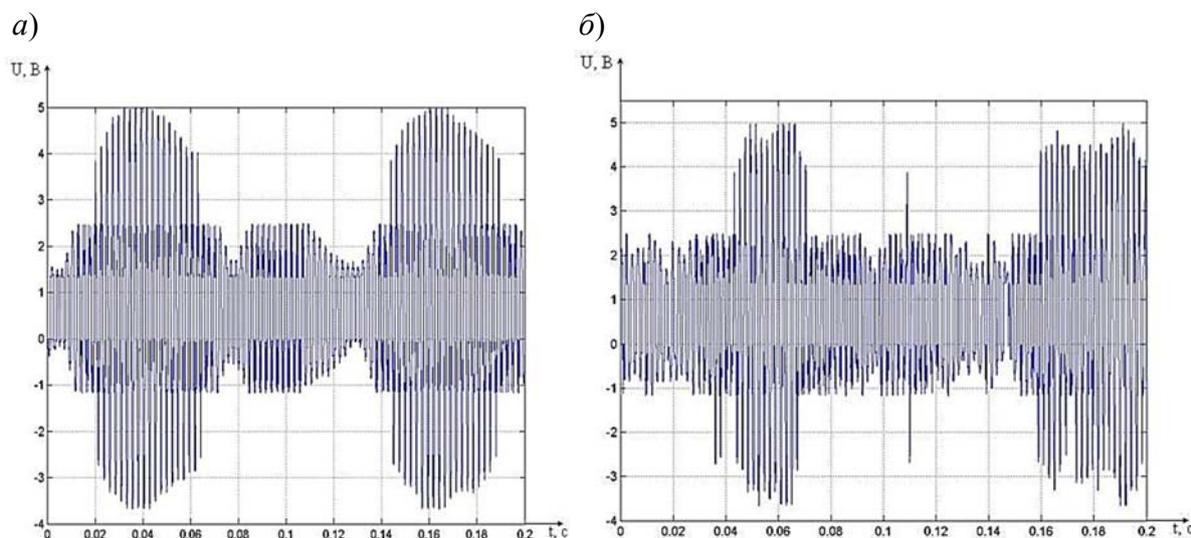


Рис. 7. Напряжение на путевом приемнике тональной РЦ

Заключение

Определено, что первоисточником появления асимметрии тягового тока в рельсовых линиях является возникновение асимметрии продольных и/или поперечных сопротивлений рельсовых нитей в них.

Найдено, что влияние взаимной индуктивности между рельсовыми нитями приводит к увеличению асимметрии переменного тягового тока, причем степень этого увеличения зависит от величины продольного сопротивления рельсовых нитей и частоты гармоники тягового тока.

Взаимные индуктивности с рельсовыми нитями других близлежащих рельсовых цепей могут как увеличивать, так и уменьшать асимметрию тягового тока в рельсовой линии в зависимости от соотношения расстояний между влияющими и подверженными влиянию рельсовыми нитями, величин и гармонического состава тяговых токов в них.

Токи в продольных линиях электроснабжения, подвешенных на опорах контактной сети, могут оказывать заметное влияние на величину асимметрии тягового тока в перегонных рельсовых цепях.

Гармонический состав тягового тока определяет степень искажения синусоидальности сигнального тока, причем это искажение может быстро изменяться в зависимости от серии электровозов, режимов их ведения, их

количества на близком расстоянии от рассматриваемой РЦ и/или в зоне между тяговыми подстанциями.

Найденные особенности процесса формирования помех от тягового тока на рельсовые цепи обеспечивают возможность обоснованной разработки мер по повышению устойчивости их работы на электрифицированных участках железных дорог.

Библиографический список

1. Шаманов В. И. Эффективность фильтров в аппаратуре рельсовых цепей / В. И. Шаманов // Автоматика, связь, информатика. – 2017. – № 1. – С. 2–5.
2. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды Хэмминга в системах функционального контроля логических устройств : монография. – СПб. : Наука, 2018. – 151 с.
3. Шаманов В. И. Электромагнитная совместимость систем железнодорожной автоматики и телемеханики цепей / В. И. Шаманов – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. – 244 с.
4. Болотский Д. Н. Опыт внедрения систем интервального регулирования движения поездов на базе радиоканала на железных дорогах пространства 1520 / Д. Н. Болотский // Известия Академии электротехнических наук РФ. – 2015. – № 1. – С. 72–76.
5. Розенберг Е. Н. Техничко-экономическая эффективность многоуровневой системы управления и обеспечения безопасности движения поездов / Е. Н. Розенберг, В. И. Талалаев, В. И. Шаманов. – М. : Изд-во ВНИИАС, 2004. – 121 с.
6. Шаманов В. И. Системы интервального регулирования движения поездов с цифровыми радиоканалами цепей / В. И. Шаманов // Автоматика на транспорте. – 2018. – Том 4. – № 2. – С. 223–240.
7. Erste signalfreie Fernverkehrsstrecke // Signal und Draht. – 2016. – 108. – No 2. – S. 68.
8. Внедрение системы РТС завершается в 2020 году // Железные дороги мира. – 2016. – № 3. – С. 10.
9. Розенберг Е. Н. Инновационные технологии управления движением поездов / Е. Н. Розенберг // Автоматика, связь, информатика. – 2017. – № 10. – С. 2–4.
10. Büßmann F. Wirtschaftlichkeit eines satellitenge stützten ERTMS für deutsche Regionalstrecken / F. Büßmann, B. Scheier, F. Brinkmann, B. Jäder // Signal und Draht. – 2016. – 108. – No 10. – S. 6–11.
11. Rosenbergen M. Hochverfügbarkeit: Definition, Einflussfaktoren und Lösungen / M. Rosenbergen, F. Pointer // Signal und Draht. – 2015. – 107. – No 6. – S. 6–8.
12. Sauer C. Gleisstromkreise – ein veraltetes oder aktuelles Mittel zur Gleisfreimtding / C. Sauer // Eisenbahningenieur. – 2014. – 65. – No 7. – S. 25–30.
13. Railway Operation and Control. 3rd edition. – Washington : VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace. – 2014. – 284 p.
14. Watanabe I. Moving Bloc System with Continuous Train Detection Utilizing Train Shutting Impedance of Track Circuit / I. Watanabe, T. Takashige // Quarterly Reports of RTRI. – 1989. – No 4. – Pp. 9–11.
15. Шаманов В. И. Помехи и помехоустойчивость автоматической локомотивной сигнализации цепей / В. И. Шаманов. – Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2005. – 236 с.
16. Лунев С. А. Исследование переходного сопротивления «рельсы – земля» на бесстыковом пути / С. А. Лунев, А. Г. Ходкевич, С. С. Сероштанов // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – № 5. – С. 35–36.

17. Карякин Р. Н. Тяговые сети переменного тока / Р. Н. Карякин. – М. : Транспорт, 1987. – 168 с.
18. Инструкция по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах. № ЦЭ-191 / МПС РФ. – М., 1993. – 68 с.
19. Контактная сеть и воздушные линии. Нормативно-техническая документация по эксплуатации контактной сети и высоковольтным воздушным линиям : справочник. – М. : Трансиздат, 2001. – 532 с.
20. Сапожников Вл. В. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи : учеб. пособие / Вл. В. Сапожников, В. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, В. И. Шаманов ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : ФГПУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017. – 318 с.
21. Аркатов В. С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог : справочник / В. С. Аркатов, Ю. В. Аркатов, В. С. Казеев, Ю. В. Ободовский. – М. : ООО «Миссия-М», 2006. – 496 с.
22. Котельников А. В. Рельсовые цепи в условиях влияния заземляющих устройств / А. В. Котельников, А. В. Наумов, А. П. Слободянюк. – М. : Транспорт, 1990. – 215 с.
23. Вахнин М. И. Устройства СЦБ при электротяге переменного тока / М. И. Вахнин, Н. Ф. Пенкин, М. А. Покровский, Д. К. Пугин, А. А. Талыков // Тр. ВНИИЖТ. – Вып. 126. – М. : Трансжелдориздат, 1956. – 220 с.
24. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М. : Транспорт, 1982. – 528 с.
25. Аркатов В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – М. : Транспорт, 1990. – 295 с.
26. Shamanov V. I. The process of traction-current asymmetry generation in rail lines / V. I. Shamanov // Russian Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 85. – No 8. – Pp. 509–512.
27. Shamanov V. I. Magnetic properties of rails and the noise level in the hardware of railway automation and remote control / V. I. Shamanov // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86. – No 8. – Pp. 509–512.
28. Акульшин П. К. Взаимные влияния на воздушных линиях связи / П. К. Акульшин. – М. : Связь, 1977. – 144 с.
29. Shamanov V. I. Alternating Traction Current Dynamics in Track Lines on Double-Track Hauls / V. I. Shamanov // Russian Electrical Engineering. – 2016. – Vol. 87. – No 10. – Pp. 566–571.
30. ГОСТ Р 54130–2010. Качество электрической энергии. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2012. – 36 с.
31. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость / М. П. Бадер. – М. : УМК МПС, 2002. – 638 с.
32. Bestem'yanov P. F. A method of statistical modeling of electromagnetic interference in automatics and telemechanics channels in railway transport / P. F. Bestem'yanov // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86. – No 9. – Pp. 503–508.
33. Ogunsola A. Electromagnetic. Compatibility in Railways: Analysis and Management / A. Ogunsola, A. Mariscotti. – Berlin : Springer, 2013. – 600 p.

Victor I. Shamanov

«Automation, Remote Control and Communication on Railway Transport» department
Russian University of Transport

Problems of electromagnetic compatibility of track circuits and traction network

The article is devoted to the issues of increasing the stability of the operation of track circuits under the influence of interference from alternating traction current. Track circuits are widely used on railways around the world to monitor the occupation by rolling stock and the integrity of rails on a railway section. In modern multilevel systems of interval regulation of train traffic using digital radio channels and satellite navigation, track circuits are also used.

It was found that the appearance of asymmetry of the longitudinal and / or transverse resistances of the rails is only the root cause of the asymmetry of the traction current. The mutual inductance of the rails in the rail line increases the value of the asymmetry of the traction current by several times. The degree of this increase depends on the temperature of the rails and the value of the traction current in them.

The mutual inductance of the rails of the rail line with the parallel rails of other track circuits can both increase and decrease the asymmetry of the traction current depending on the nature of the distribution of the traction current along the rails of the adjacent track circuits. The mutual inductance of rails with longitudinal power supply lines located on the supports of the contact network can noticeably affect the value of the asymmetry.

The degree of distortion of the signal current sinusoidality is determined by the harmonics of the asymmetry current. The harmonic composition of interference from traction current can quickly change over time and depends on the number, series and operating modes of traction equipment of electric locomotives moving in the area between traction substations. It is shown that electric filters used in track circuits do not always provide the required interference filtering efficiency.

track circuits, rail lines, mutual inductance, traction current, asymmetry, interference, harmonic composition, operation stability.

References

1. Shamanov V. I. (2017). The effectiveness of filters in the equipment rail circuits [Effektivnost' fil'trov v apparature rel'sovykh tsepey], Automation, communication, informatics [Avtomatika, svyaz', informatika], issue 1. – Pp. 2–5.
2. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V., Efanov D. V. (2018) Hamming Codes in Concurrent Error Detection Systems of Logic Devices [Kody Hemminga v sistemakh funktsional'nogo kontrolya logicheskikh ustroystv]. – St. Petersburg : Nauka, 2018. – 151 p.
3. Shamanov V. I. (2013). Electromagnetic Compatibility of Systems of Railway Automatics and Telemechanics [Elektromagnitnaya sovместimost' sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki tsepey]. Moscow, Educational and methodical center for education on the railway transport [Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte], 2013. – 244 p.
4. Bolotsky D. N. (2015). Experience in the implementation of interval traffic control systems on the basis of radio channel on the Railways of 1520 [Opyt vnedreniya sistem interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poyezdov na baze radiokanala na

- zheleznikh dorogakh prostranstva 1520], News of the Academy of electrotechnical Sciences [Izvestiya Akademii elektrotekhnicheskikh nauk], issue 1. – Pp. 72–76.
5. Rosenberg E. N., Talalaev V. I., Shamanov V. I. (2004). Technical and economic efficiency of multi-level control system and train safety [Tekhniko-ekonomicheskaya effektivnost' mnogourovnevnoy sistemy upravleniya i obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poyezdov]. – Moscow, VNIIS [ВНИИАС]. – 121 p.
 6. Shamanov V. I. (2018) Train interval control systems with digital radio channels [Sistemy interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poyezdov s tsifrovymi radiokanalami], Automation on transport [Avtomatika na transporte], vol. 4, issue 2. – Pp. 223–240.
 7. Erste signalfreie Fernverkehrsstrecke (2016). Signal und Draht, vol. 108, issue 2. – S. 68.8. The implementation of the PTC system is completed in 2020 (2016) [Vnedreniye sistemy PTC zavershayetsya v 2020 godu], Railways of the world [Zheleznyye dorogi mira], issue 3. – Pp. 10.
 8. Rosenberg E. N. (2017). Of innovative technology for train traffic control [Innovatsionnyye tekhnologii upravleniya dvizheniyem poyezdov], Automation, communication, informatics [Avtomatika, svyaz', informatika], issue 10. – Pp. 2–4.
 9. Bu. ssmann F., Scheier B., Brinkmann F., Ja der B. (2016). Wirtschaftlichkeit eines satellitenge stu. zten ERTMS fu. r deutsche Regionalstrecken. Signal und Draht, vol. 108, issue 10. – S. 6–11.
 10. Rosenbergen M., Pointer F. (2015). Hochverfu. gbarkeit: Definition, Einflussfaktoren und Lo.. sungen. Signal und Draht, vol. 107, issue 6. – S. 6–8.
 11. Sauer C. (2014). Gleisstromkreise – ein veraltetes oder aktuelles Mittel zur. Eisenbahningenieur, vol. 65, issue 7. – Pp. 25–30.
 12. Railway Operation and Control. 3rd edition. – Washington, VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace, 2014. – 284 p.
 13. Watanabe I., Takashige T. (1989). Moving Bloc Train Shutting Impedance of the Track Circuit. Quarterly Reports of RTRI, issue 4. – Pp. 9–11.
 14. Shamanov V. I. (2005). Interference and interference immunity of automatic locomotive signaling circuits [Pomekhi i pomekhoustoychivost' avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii tsepey]. Irkutsk, IRGUPS [ИрГУПС]. – 236 p.
 15. Lunev S. A., Chodkiewicz A. G., Seroshtanov S. S. (2008). Study of the transition resistance «rails – to-earth» in seamless way [Issledovaniye perekhodnogo soprotivleniya «rel'sy – zemlya» na besстыkovom puti]. Automation, communication, informatics [Avtomatika, svyaz', informatika], issue 5. – Pp. 35–36.
 16. Karyakin R. N. (1987). Traction network of alternating current [Tyagovyye seti peremennogo toka]. Moscow, Transport Publ., 1987. – 168 p. 18. Instructions for grounding power supply devices on electrified Railways No TSE-191 / Ministry of railways Russian Federation [Instruktsiya po zazemleniyu ustroystv elektrosnabzheniya na elektrifitsirovannykh zheleznikh dorogakh. No TSE-191. Ministerstvo putey soobshcheniya]. Moscow, MPS, 1993. – 68 p.
 17. Contact network and air lines. Normative and technical documentation for the operation of the contact network and high-voltage air lines: Reference. [Kontaknfya set'i vozdushnyye linii. Normativno-tekhnicheskaya dokumentatsiya po ekspluatatsii kontaktnoy seti i vysokovol'tnym vozdushnym liniyam: Spravochnik]. Moscow, Transizdat, 2001. – 532 p.
 18. Sapozhnikov Vl. V., Sapozhnikov Val. V., Efanov D. V., Shamanov V. I. (2017). Reliability of railway automation, and remote control and communication systems [Nadezhnost' sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki, telemekhaniki i svyazi]. Ed by

- VI. V. Sapozhnikov, Moscow, Educational and methodical center for education on the railroad transport [Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte], 2017. – 318 p.
19. Arkatov V. S., Arkatov Yu. V., Kazeev V. S., Obodovsky Yu. V. (2006). Rail circuits under the influence of grounding devices [Rel'sovyye tsepi magistral'nykh zheleznykh dorog: Spravochnik]. Moscow, Publishing OOO Missiya-M, 2006. – 496 p.
 20. Kotelnikov A. V., Naumov A. V., Slobodyanyuk A. P. (1990). Rail circuits under the influence of grounding devices [Rel'sovyye tsepi v usloviyakh vliyaniya zazemlyayushchikh ustroystv]. Moscow, Transport Publ., 1990. – 215 p.
 21. Vakhnin M. I., Penkin N. F., Pokrovsky M. F., Pugin D. K., Talykov A. A. (1956). The devices of the SCB for electric alternating current traction [Ustroystva STSB pri elektrotzyage peremennogo toka]. Moscow, Transzheldorizdat, 1956 – 220 p.
 22. Markvardt K. G. (1982). Power Supply of electrified Railways [Markvardt K. G. Elektropitaniye zheleznykh dorog]. Moscow, Transport Publ., 1982. – 528 p.
 23. Arkatov V. S., Kravtsov Yu. A., Stepensky B. M. (1990). Rail circuits. Analysis of work and maintenance [Rel'sovyye tsepi. Analiz raboty i tekhnicheskoye obsluzhivaniye]. Moscow, Transport Publ., 1990. – 295 p.
 24. Shamanov V. I. (2014). The process of traction-current asymmetry generation in rail lines, Russian Electrical Engineering, vol. 85, issue 8. – Pp. 509–512.
 25. Shamanov V. I. (2015). Magnetic properties of rails and the noise level in the hardware of railway automation and remote control, Russian Electrical Engineering, vol. 86, issue 8. – Pp. 509–512.
 26. Akulshin P. K. (1977). Mutual influences on air communication lines [Vzaimnyye vliyaniya na vozdushnykh liniyakh svyazi]. Moscow, Svyaz' Publ., 1977. – 144 p.
 27. Shamanov V. I. (2016). Alternating Traction Current Dynamics in Track Lines on Double-Track Hauls, Russian Electrical Engineering, vol. 8, issue 10. – Pp. 566–571.
 28. Bader M. P. (2002). Electromagnetic compatibility [Elektromagnitnaya sovместимость]. Moscow, Educational and methodical center for education on the railway transport [Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte], 2002. – 638 p.
 29. Ogunsola A., Mariscotti A. (2013). Electromagnetic. Compatibility in Railways: Analysis and Management, Berlin, Springer, 2013. – 600 p.
 30. Bestem'yanov P. F. A method of statistical modeling of electromagnetic interference in automatics and telemechanics channels in railway transport, Russian Electrical Engineering, vol. 86, issue 9. – Pp. 503–508.
 31. GOST R 54130–2010. Quality of electrical energy. Terms and definitions [GOST R 54130–2010. Kachestvo elektricheskoy energii. Terminy i opredeleniya]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. – 36 p.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии М. Н. Василенко
Поступила в редакцию 04.12.2018, принята к публикации 21.02.2019*

ШАМАНОВ Виктор Иннокентьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта;

e-mail: shamanov_vi@mail.ru

© Шаманов В. И., 2019

УДК 681.518.5:004.052.32

А. Б. Никитин, д-р техн. наук
А. Н. Ковкин, канд. техн. наук
В. А. Соколов

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, Санкт-Петербург

Н. А. Журавлева, д-р экон. наук

Кафедра «Экономика транспорта»
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, Санкт-Петербург

ПРИНЦИПЫ БЕЗОПАСНОГО СОПРЯЖЕНИЯ С ОБЪЕКТАМИ В МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ

Рассмотрены методы построения устройств сопряжения для микропроцессорных систем железнодорожной автоматики с использованием различной элементной базы и принципов обеспечения безопасности при возникновении отказов, дана сравнительная характеристика различных подходов к реализации безопасных устройств сопряжения с учетом современных достижений в области силовой электроники. Особое внимание уделено вопросам выбора технических решений с учетом специфики исполнительных объектов, требований к используемой элементной базе и особенностей полигона внедрения системы.

релейные устройства сопряжения, бесконтактные устройства сопряжения, устройства включения исполнительных реле, неконтролируемое реле, силовое реле, контроль исправности коммутационных элементов.

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-2-186-201

Введение

Развитие систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) на современном этапе немыслимо без широкого использования вычислительной техники. Работа железнодорожного транспорта включает в себя реализацию ответственных технологических процессов, непосредственно связанных с движением поездов, поэтому при разработке новых СЖАТ первостепенное внимание уделяется вопросам обеспечения безопасности. В соответствии с общепринятой терминологией компьютерные СЖАТ, непосредственно связанные с безопасностью движения поездов, принято разделять на релейно-процессорные и микропроцессорные системы. Последние отличаются тем, что реализация алгоритмов управления,

связанных с безопасностью, осуществляется на уровне программного обеспечения, и представляют на сегодняшний день перспективное направление развития железнодорожной автоматики.

Основной проблемой, возникающей в ходе разработки подобных систем, является обеспечение безопасности функционирования в условиях использования компонентов, обладающих симметричной характеристикой отказов. Данная проблема актуальна как для управляющего вычислительного комплекса (УВК), так и для устройств, обеспечивающих сопряжение вычислительных средств с исполнительными объектами (УСО).

Безопасная работа УВК достигается путем многоканальной обработки информации в сочетании с различными способами контроля идентичности функционирования вычислительных средств. Безопасность функционирования УСО может достигаться самыми различными методами. Данному вопросу посвящено большое количество трудов отечественных и зарубежных ученых и специалистов [1, 2]. На начальном этапе развития безопасных УСО основное внимание было сосредоточено на проблеме безопасного поведения устройств при возникновении различных неисправностей собственной элементной базы. Широкое внедрение микропроцессорных систем на сети железных дорог требует несколько иного подхода, основу которого составляет всесторонний анализ эффективности технических решений безопасных УСО, учитывающий особенности конкретного наполненного оборудования и специфику полигона внедрения системы.

1. Элементная база устройств сопряжения и принципы обеспечения безопасного функционирования при отказах

Основным требованием к любому УСО является реализация энергетического согласования управляющих вычислительных средств с исполнительными объектами (ИО). Для коммутации цепей ИО в современных системах автоматики широко используются электромеханические приборы (электромагнитные реле, контакторы) и разнообразная полупроводниковая элементная база. Спецификой железнодорожной автоматики является необходимость исключения опасных ситуаций при возникновении различных неисправностей, что накладывает особые условия на используемую элементную базу и схемные решения. Основные принципы обеспечения безопасности УСО представлены на рис. 1.

При всем разнообразии элементной базы, применяемой для построения безопасных УСО, используемых на железнодорожном транспорте, можно выделить два основных класса устройств сопряжения: *релейные* и *бесконтактные* [1, 2]. В релейных устройствах сопряжения (рис. 2) в цепях ИО всегда присутствуют контакты исполнительных реле (ИР). В некоторых случаях совместно с реле могут применяться полупроводниковые

элементы. Основным критерием, определяющим принадлежность устройств сопряжения к категории релейных, является то, что реле в них является элементом, обеспечивающим безопасность функционирования при отказах. Полупроводниковые компоненты могут использоваться для облегчения условий работы релейных контактов и рассматриваются как средство повышения надежности и долговечности устройств. Управление ИР осуществляется с помощью безопасных электронных схем, традиционно называемых устройствами включения исполнительных реле (УВИР).



Рис. 1. Классификация УСО по принципам обеспечения безопасности

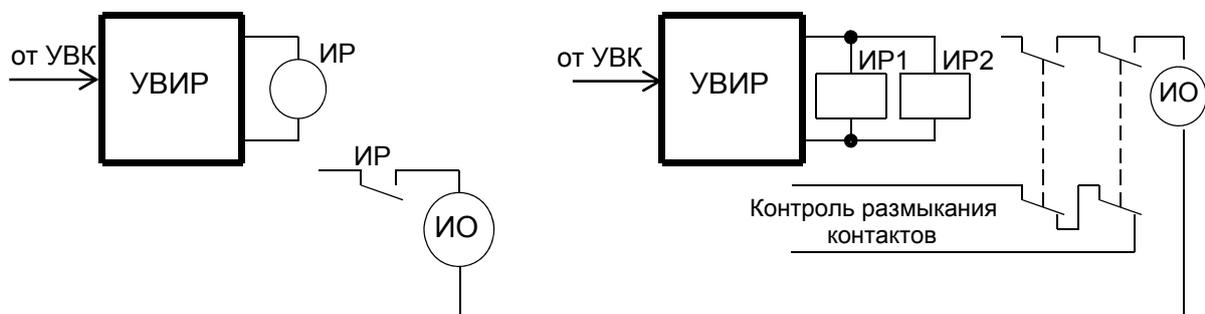


Рис. 2. Релейные устройства сопряжения

В отечественной практике основой релейных УСО являются реле первого класса надежности, поскольку они позволяют наиболее легко обеспечить достижение требуемого уровня безопасности. В зарубежных разработках можно встретить технические решения на основе силовых реле, не имеющих основных признаков реле первого класса [3, 4]. Необходимый уровень безопасности функционирования таких устройств достигается дублированием реле и наличием контроля фактического размыкания контактов, обеспечивающих подачу питания на исполнительный объект. В основе данной концепции лежит тезис, состоящий в том, что ложное срабатывание любого электромагнитного реле вследствие собственного отказа является маловероятным событием. Поэтому необходимый уровень безопасности может быть достигнут путем последовательного включения в цепь исполнительного объекта контактов двух реле.

Контроль фактического размыкания необходим для исключения опасных ситуаций при накоплении таких отказов, как сваривание контактов и поломка пружинных элементов, обеспечивающих выключение реле. В связи с необходимостью контроля работы реле зарубежные производители выпускают отдельный класс приборов, отличающихся наличием жесткой связи между контактными тройниками. Такая связь исключает замыкание нормально замкнутых контактов в случае сваривания общего и нормально разомкнутого контакта хотя бы в одной контактной группе. Указанный класс реле имеет название «safety relay», что дословно можно перевести как «безопасное реле».

В бесконтактных УСО задача обеспечения безопасности полностью возлагается на полупроводниковую элементную базу. При построении бесконтактных устройств совместно с полупроводниковыми коммутационными элементами могут использоваться электромагнитные реле. Однако в данном классе устройств они выполняют вспомогательные функции, не связанные с обеспечением безопасности. Например, при наличии резервирования аппаратных средств с помощью контактов реле может осуществляться отключение от исполнительного объекта не используемого в текущий момент времени комплекта аппаратуры сопряжения.

Поскольку полупроводниковые приборы являются элементами с симметричным отказом, безопасность УСО достигается путем использования специальных технических решений. Причем как при построении УВИР, так и в процессе создания бесконтактных УСО используются одни и те же подходы к обеспечению безопасности при отказах, которые можно условно разделить на два основных направления: *контроль исправности коммутационных элементов* и *преобразование энергии источника питания*.

На рис. 3 показан принцип построения УСО, основанный на контроле коммутационных элементов. Для обеспечения безопасности осуществляется проверка исправности коммутационного элемента (КЭ) путем осуществления кратковременных тестовых воздействий, изменяющих состояние полупроводникового прибора. Реакция ключевого элемента на тестовые

вые воздействия считывается датчиком обратной связи (ДОС), анализируется на уровне программного обеспечения УВК, и в случае обнаружения неисправности полупроводникового ключа осуществляется немедленное прекращение питания ИО, для чего в схеме предусматривается отключающее устройство (ОУ).

Использование преобразовательных схем является принципиально иным способом обеспечения безопасности, в основе которого лежит идея преобразования энергии под воздействием динамических управляющих сигналов. Преобразование осуществляется с помощью схем на полупроводниковых коммутационных элементах. Указанные схемы принято называть *функциональными преобразователями с несимметричным отказом (ФП)* [1, 2]. В случае прекращения поступления динамического сигнала или возникновения любого отказа коммутационного элемента преобразование энергии прекращается и работа управляемого устройства становится невозможной. Ложное включение ИО или ИР в случае пробоя коммутационных элементов преобразователя исключается двумя методами: применением *трансформаторной развязки* и использованием *неактивизирующего источника питания*.

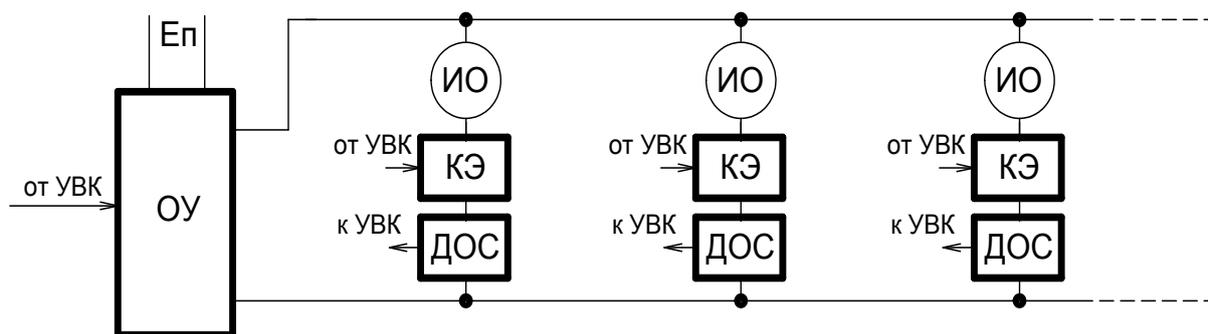


Рис. 3. УСО с контролем исправности коммутационных элементов

В первом случае используется фундаментальное свойство трансформатора, состоящее в невозможности передачи постоянного напряжения. Примеры реализации релейного и бесконтактного УСО на основе схем с трансформаторной развязкой показаны на рис. 4. Вполне очевидно, что поступление энергии источника питания на управляемый объект возможно только при условии наличия на первичной обмотке переменного напряжения, что достигается в результате импульсной работы ключевых элементов преобразователя. Пробой коммутационного элемента в данных схемах не опасен, поскольку приводит к воздействию на первичную обмотку постоянного напряжения источника питания.

Под неактивизирующим источником питания следует понимать такой источник, который не способен активизировать ИР или ИО при непосред-

ственном воздействии. Одним из примеров использования неактивизирующего источника энергии в релейных УСО является схема УВИР, управляющая поляризованным реле (рис. 5). Формирование напряжения, необходимого для срабатывания реле, обеспечивается в результате импульсной работы коммутационного элемента в конденсаторной схеме преобразователя полярности. В случае пробоя нескольких элементов схемы возможно ложное поступление напряжения источника питания на обмотку, но это не приведет к срабатыванию реле по причине ненадлежащей полярности напряжения.

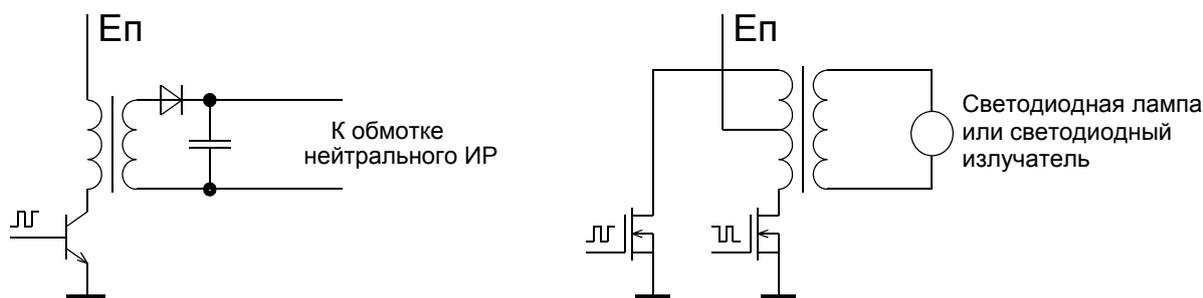


Рис. 4. УСО на основе ФП с трансформаторной развязкой

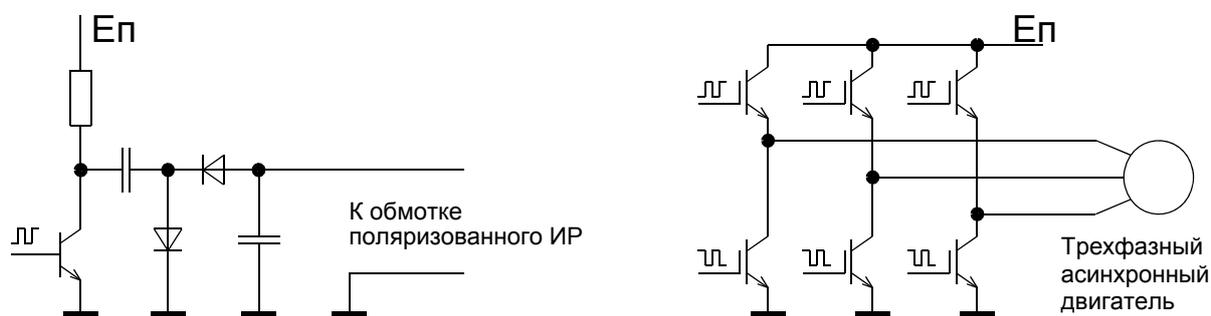


Рис. 5. УСО на основе ФП с неактивизирующим источником питания

Примером использования аналогичного принципа в бесконтактных УСО является схема управления трехфазным асинхронным двигателем стрелочного привода (см. рис. 5), [5]. Принцип действия асинхронного двигателя состоит в воздействии на ротор вращающегося магнитного поля, которое создается путем подачи на обмотки статора трехфазного переменного напряжения. Данное напряжение формируется мостовой схемой преобразования из постоянного напряжения источника питания. Пробой ключевых элементов преобразователя приводит к воздействию на обмотки двигателя постоянного напряжения, что в силу указанного выше принципа действия двигателя не может привести к вращению ротора.

2. Сравнительный анализ основных направлений в разработке безопасных устройств сопряжения

В процессе разработки аппаратуры сопряжения для микропроцессорных систем приходится выбирать наиболее подходящие для конкретной задачи технические решения. На современном этапе использование реле первого класса в том виде, в котором они существуют сегодня, нельзя считать перспективным направлением в разработке устройств сопряжения. Это связано в первую очередь, со значительными габаритами таких реле и ограниченной возможностью использования печатного монтажа. При использовании реле первого класса количество релейной аппаратуры в пересчете на одну стрелку, а также занимаемый этой аппаратурой объем оказываются не намного меньше, чем в релейно-процессорных системах автоматизации и даже в ранних разработках релейных систем. Поэтому создание УСО на основе существующих реле первого класса можно рассматривать как переходный этап на пути к более совершенным техническим решениям, а также как способ реализации сопряжения со смежными релейными системами. В последнем случае электромагнитное реле первого класса логично рассматривать в качестве исполнительного объекта, а не составной части УСО.

Вариант построения аппаратуры сопряжения на основе дублированных силовых реле принципиально отличается тем, что позволяет создавать достаточно компактные устройства, поскольку даже два силовых реле требуют для своего размещения существенно меньший объем монтажного пространства, чем одно реле первого класса. К тому же указанные реле, как правило, имеют варианты конструктивного исполнения, адаптированные для печатного монтажа [4]. Это позволяет обеспечить высокую технологичность аппаратуры и успешно реализовывать одно из важнейших преимуществ микропроцессорных систем – малые габариты аппаратных средств.

В качестве УВИР для релейных УСО целесообразно использовать ФП с трансформаторной развязкой, ФП с неактивизирующим источником энергии, а также схемы, представляющие собой комбинацию указанных принципов обеспечения безопасности [6]. Общим недостатком всех релейных УСО является ограниченный ресурс электромагнитных реле. Указанная особенность вынуждает разработчиков использовать реле с большим запасом коммутационной способности контактов, использовать различные схемы искрогашения или применять релейно-полупроводниковые схемы коммутации, в которых контакты реле переключаются при нулевых значениях токов. Тем не менее, если ИО включается достаточно часто, приходится учитывать механический ресурс релейных контактов.

УСО, основанные на применении силовых полупроводниковых элементов, выгодно отличаются от релейных решений практически неограни-

ченным сроком службы при любых условиях эксплуатации. В то же время работа силовых полупроводниковых приборов и иных элементов коммутационных и преобразовательных устройств сопряжена с потерями энергии, особенно значительными при высокой частоте переключений [8, 9]. Наибольшие потери энергии имеют место в схемах, содержащих трансформаторы. Практика использования преобразовательных схем в источниках вторичного электропитания показывает, что значение коэффициента полезного действия схем с трансформаторами находится в пределах 80...90 %. Соответствующая такому КПД абсолютная величина потерь энергии при управлении мощными исполнительными объектами может существенно превышать потери в обмотках электромагнитных реле. Поэтому вполне справедливо утверждение, что релейные УСО, управляющие объектами значительной мощности (например, двигателями электроприводов) отличаются сравнительно высокой энергетической эффективностью. В то же время, если существует возможность использования преобразовательных схем без трансформаторов (например, при управлении трехфазными асинхронными двигателями) [5], вполне достижимой будет величина КПД 95 % и более. В этом случае преимущество релейных схем по энергетической эффективности уже не столь очевидно. Можно говорить также о соизмеримости абсолютных величин потерь энергии при управлении маломощными нагрузками (лампами накаливания и светодиодными излучателями светофоров).

Оценивая УСО по габаритным и стоимостным показателям, следует отметить, что результат существенным образом зависит от специфики ИО. Опытно-конструкторские разработки показывают, что использование для управления светофорами решений на дублированных силовых реле и бесконтактных схем на основе преобразователей дает близкие результаты по стоимостным показателям аппаратуры. По габаритным показателям технические решения на основе малогабаритных реле иногда могут иметь преимущество перед преобразовательными схемами. Это связано с тем, что по условиям безопасности частота напряжения на выходе устройств, работающих на кабельную линию, не должна быть высокой [9], что является причиной значительных габаритов содержащихся в составе УСО трансформаторов. Преимущество релейных УСО оказывается наиболее заметным при управлении объектами, не требующими двухполюсного отключения, например маневровыми светофорами.

Достоинством преобразовательных схем является то, что они удачно сочетаются с современными системами бесперебойного электропитания на основе шин постоянного тока (ШПТ), поскольку в качестве исходного напряжения для преобразования используется именно постоянное напряжение. К тому же устройства сопряжения на основе силовых реле обычно предполагают использование специализированных приборов с жесткой

связью между контактными тройниками (реле безопасности). Компоненты, удовлетворяющие данному требованию, а также адаптированные для печатного монтажа, выпускаются сравнительно небольшим количеством зарубежных производителей и не имеют отечественных аналогов. Указанные факторы в ряде случаев делают обоснованным использование разработчиками преобразовательных схем несмотря на возможное увеличение габаритов аппаратуры.

Иначе обстоит дело при выборе метода построения УСО для управления двигателями электроприводов. Практика разработки аппаратуры сопряжения свидетельствует, что при управлении двигателем стрелочного привода переменного тока преимущество по стоимости и габаритам оказывается за бесконтактными решениями на основе преобразовательных схем [10]. Это связано с тем, что трехфазные асинхронные двигатели являются нечувствительными к постоянному напряжению, значит в составе преобразовательных схем нет необходимости использовать трансформаторы. Кроме того, повторно-кратковременный характер работы двигателя с относительно невысокой частотой включения существенно снижает остроту проблемы отвода тепла от полупроводниковых компонентов, что положительно сказывается на габаритных показателях аппаратуры. Релейные схемы в этом случае получаются достаточно сложными и дорогостоящими, поскольку для коммутации трехфазного напряжения требуется значительное количество контактных групп, а большая мощность и индуктивный характер нагрузки требуют специальных решений для обеспечения необходимого ресурса контактов.

При управлении двигателями постоянного тока, а также современными электрическими машинами с вентильным управлением преимущество бесконтактных схем по стоимостным и габаритным показателям не является определяющим, поскольку в этом случае в преобразовательных схемах невозможно обойтись без трансформаторов. В таких случаях удачной альтернативой трансформаторным схемам могут являться устройства на основе силовых реле [4]. Наибольший интерес представляет использование решений на основе силовых реле для управления электроприводами горочных стрелок [11]. Указанные приводы отличаются повышенной мощностью, потребляемой двигателем, а также сравнительно интенсивным использованием. Применение преобразовательных схем в таких условиях сопряжено со значительными потерями энергии, а достаточно частое включение привода приводит к необходимости увеличения габаритов аппаратуры с целью обеспечения надлежащего отвода тепла от силовых электронных компонентов. В данной области применения предпочтительным вариантом оказывается применение релейно-полупроводниковой схемы коммутации с использованием силовых реле. Весомым аргументом в пользу применения релейно-полупроводниковых схем коммутации для управле-

ния горочным приводом является то, что в случае пробоя силового полупроводникового ключа во время перевода стрелки сохраняется возможность успешного завершения начатого перевода. В случае использования преобразовательной схемы аналогичный отказ приведет к остановке стрелки в среднем положении, что неизбежно повлечет за собой сход подвижной единицы.

В случае использования технических решений, основанных на преобразовании питания, нельзя упускать из вида вопросы, связанные с параметрической безопасностью. Дело в том, что большинство относительно несложных преобразовательных схем формируют напряжение прямоугольной формы, характеризующееся наличием высокочастотных гармоник, что в силу наличия емкостных связей между жилами кабеля отрицательно сказывается на безопасности, поскольку приводит к появлению остаточных напряжений на выключенных исполнительных объектах [9]. Применение различных электрических фильтров, подавляющих высокочастотные гармоники, нельзя считать эффективным решением данной проблемы, поскольку такие схемы увеличивают габариты аппаратуры и не обеспечивают сохранение исходного уровня безопасности в случае возникновения отказов. Кроме того, необходимо учитывать, что частота выходного напряжения преобразовательных схем зависит от работы узлов, формирующих управляющие сигналы, значит существует вероятность несанкционированного увеличения частоты при отказах, что в силу наличия паразитной емкости в кабельных сетях также негативно влияет на безопасность. Поэтому при разработке схемных решений, формирующих управляющие сигналы, необходимо особое внимание уделять реакции таких схем на возникновение отказов и выбирать технические решения, не допускающие существенного повышения частоты.

При рассмотрении вопроса о целесообразности использования принципа, заключающегося в контроле исправности коммутационных элементов, необходимо учитывать следующее. Как было указано выше, в состав УСО на основе тестируемых полупроводниковых элементов обязательно входит ОУ. Поскольку данный функциональный узел является последней ступенью в обеспечении безопасности, в нем должны использоваться технические решения с однонаправленным отказом, то есть схемы на основе релейных компонентов или преобразовательных устройств. Фактически различие между обозначенными подходами к обеспечению безопасности бесконтактных УСО состоит в следующем: использовать ли индивидуальные преобразователи или реле для каждого исполнительного объекта или применять групповые устройства с аналогичным принципом действия на несколько исполнительных объектов.

УСО, безопасность которых обеспечивается путем тестирования полупроводниковых коммутационных элементов, характеризуются относи-

тельной простотой силовых схемотехнических решений и наименьшим количеством силовых компонентов в пересчете на один исполнительный объект. Однако несмотря на кажущуюся простоту такого подхода существует ряд специфических проблем, связанных с обеспечением безопасности. Основная проблема связана с необходимостью тестирования полупроводниковых ключей путем кратковременного открытия.

Отдельной и довольно непростой задачей является нормирование временных параметров тестирующих воздействий. Поскольку дублирование полупроводниковых коммутационных элементов не дает существенных преимуществ в отношении безопасности, период тестирования должен быть меньше, чем время реакции объекта [1, 2]. Более того, необходимо учитывать инерционность ОУ, которое должно успеть отключить питание ИО до того, как произойдет ложная активизация объекта, управляемого пробитым ключом. Поэтому основное требование к временным параметрам устройств можно сформулировать следующим образом: *сумма периода тестирования и времени срабатывания отключающего устройства должна быть меньше времени реакции исполнительного объекта*. Выполнение данного условия определяет необходимость довольно частого тестирования ключей, что повышает загруженность вычислительных средств и снижает их полезную производительность. Главное – для выполнения указанного требования необходимо уделять особое внимание быстродействию ОУ. Кроме того, следует учитывать необходимость наличия дополнительных аппаратных решений для реализации тестирования ключевых элементов – датчиков тока или напряжения, а также физических линий для ввода в вычислительные средства информации о текущем состоянии коммутационных элементов.

Безопасные УСО, использующие принцип преобразования энергии, не требуют тестирования коммутационных элементов, т. е. являются свободными от указанных выше проблем. При этом они предполагают наличие более сложной силовой схемотехники, что обуславливает большее количество ключевых элементов на один напольный объект. На начальных этапах создания микропроцессорных систем железнодорожной автоматики эта особенность являлась решающим фактором при выборе концепции построения бесконтактной аппаратуры сопряжения. В настоящее время ситуация на рынке электронной промышленности, в частности в области силовых полупроводниковых приборов, претерпела значительные изменения [7, 8, 12–14]. Так, появление мощных МДП-транзисторов позволило значительно упростить задачу построения преобразователей для управления относительно маломощными нагрузками, например светофорными лампами.

Важнейшим событием в области силовой электроники стало появление биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT). Эти транзисторы воплотили в себе ряд достоинств, присущих как полевым, так

и биполярным приборам. Прежде всего это характерный для полевых приборов низкий уровень мощности, потребляемый по цепям управления, а также свойственное биполярным транзисторам малое падение напряжения на открытом ключе при высоких рабочих напряжениях. Указанные особенности IGBT позволяют строить простые и надежные схемы преобразователей для нагрузок мощностью до нескольких киловатт (ранее такие мощности были доступны лишь схемам на тиристорах). Широкое распространение получили силовые модули, представляющие собой микросборки, в состав которых входят комплекты IGBT, предназначенные для построения одно- и трехфазных мостовых инверторов. Кроме того, разработан целый ряд специализированных микросхем, предназначенных для управления силовыми ключами преобразователей.

Определенный интерес представляют интеллектуальные силовые модули (IPM) [13, 14], в состав которых кроме силовых полупроводниковых ключей входят схемы, обеспечивающие формирование необходимых управляющих сигналов и защиту силовых элементов от повреждения при аварийных режимах работы оборудования. Использование IPM позволяет максимально сократить габариты преобразовательных устройств. Однако необходимо учитывать отсутствие стандартизации схемных решений и конструктивного исполнения подобных микросборок, что усложняет подбор аналогов при замене элементов и зачастую привязывает разработчика аппаратуры к продукции конкретных производителей электронных компонентов.

Заключение

Учитывая требования к современным системам, можно обозначить перспективные направления в разработке безопасных УСО. Такими направлениями являются создание релейных устройств на основе силовых реле, не являющихся приборами первого класса надежности, а также разработка бесконтактных технических решений, основанных на использовании силовых полупроводниковых компонентов. Выбирая между релейными и бесконтактными решениями, необходимо учитывать особенности исполнительных объектов, принципы организации электропитания, эффективность с точки зрения сокращения стоимости и габаритов устройств, требования к вариативности при выборе элементной базы УСО. В целом можно руководствоваться следующими основными тезисами:

– релейные УСО имеют явные преимущества в тех случаях, когда требуется управлять относительно мощными исполнительными объектами, для которых по условиям безопасности не могут использоваться преобразовательные схемы без трансформаторов;

– применение силовых реле может рассматриваться как средство сокращения габаритов и стоимости аппаратуры, если для управления объек-

том не требуется большого количества контактных групп и по исходным условиям питание УСО планируется осуществлять переменным напряжением от фидеров электроснабжения;

– бесконтактные УСО на основе преобразовательных схем удачно сочетаются с современными устройствами бесперебойного питания, построенными на основе ШПТ, а также предоставляют разработчику больше возможностей в процессе поиска альтернативной элементной базы.

Останавливая выбор на бесконтактных решениях, следует учитывать, что контроль исправности коммутационных элементов, как средство обеспечения безопасности, сопряжен с рядом специфических проблем, связанных с быстродействием устройств, загрузкой вычислительных средств и необходимостью физической реализации ввода дополнительной информации. К тому же вполне очевидно, что наличие тестирования ключей не исключает необходимости использования безопасных схемотехнических решений на основе электромагнитных реле или преобразовательных схем. Учитывая современные достижения в области силовой электроники, следует отметить, что создание компактных и надежных преобразователей для безопасного управления объектами уже не является сложной задачей для разработчиков. Таким образом, есть все основания утверждать, что широкое применение преобразовательных схем как малой мощности – для использования в качестве УВИР, так и значительной мощности – для непосредственного управления напольными объектами – является наиболее актуальным направлением в разработке безопасных УСО.

Библиографический список

1. Сапожников В. В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов, Д. В. Гавзов ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : Транспорт, 1995. – 272 с.
2. Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Методы и принципы обеспечения безопасности микроэлектронных СЖАТ. РТМ 32 ЦШ 1115842.01–94. – СПб. : ПГУПС, 1994. – 120 с.
3. Сапожников В. В. Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики : учебник для вузов ж.-д. транспорта / В. В. Сапожников, Ю. А. Кравцов, Вл. В. Сапожников ; под ред. В. В. Сапожникова. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 394 с.
4. Никитин А. Б. Использование малогабаритных силовых реле в безопасных устройствах сопряжения компьютерных систем железнодорожной автоматики / А. Б. Никитин, А. Н. Ковкин, А. Д. Манаков // Автоматика на транспорте. – 2018. – Том 4. – № 2. – С. 264–278.
5. Никитин А. Б. Использование функциональных преобразователей с несимметричным отказом для управления электроприводами переменного тока / А. Б. Никитин, А. Н. Ковкин // Автоматика на транспорте. – 2016. – Том 2. – № 1. – С. 7–18.

6. Патент на полезную модель № 114017 МПК В61L. Устройство для включения исполнительных устройств систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Никитин А. Б., Ковкин А. Н., Балувев Н. Н., Наседкин О. А., Алешечкин Ю. А. Начало действия патента 03.10.2011. Дата публикации 10.03.2012.
7. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение / П. А. Воронин. – М. : Изд. дом «Додэка-XXI», 2001. – 384 с.
8. Семенов Б. Ю. Силовая электроника для любителей и профессионалов / Б. Ю. Семенов. – М. : «СОЛОН-Р», 2001. – 327 с.
9. Ковкин А. Н. Влияние кабельных сетей на безопасность функционирования бесконтактных устройств сопряжения : сб. науч. тр. / А. Н. Ковкин. – СПб. : ПГУПС, 2004. – С. 51–55.
10. Патент на полезную модель № 113093 МПК H02M. Преобразователь постоянного напряжения в трехфазное переменное напряжение / Никитин А. Б., Ковкин А. Н., Балувев Н. Н., Наседкин О. А., Абрамов О. А., Алешечкин Ю. А. Начало действия патента 21.07.2011. Дата публикации 27.01.2012.
11. Никитин А. Б. Использование принципа релейно-полупроводниковой коммутации для управления стрелочными электроприводами в современных системах горочной централизации / А. Б. Никитин, А. Н. Ковкин // Автоматика на транспорте. – 2017. – Том 3. – № 2. – С. 178–191.
12. Флоренцев С. Н. Современное состояние и перспективы развития приборов силовой электроники / С. Н. Флоренцев // Электронная промышленность. – 2002. – № 4. – С. 34.
13. Башкиров В. Интеллектуальные силовые модули компании International Rectifier для электропривода малой мощности / В. Башкиров // Силовая электроника. – 2005. – № 1. – С. 30–35.
14. Ланцов В. Интеллектуальная силовая электроника: от настоящего к будущему / В. Ланцов, С. Эраносян // Силовая электроника. – 2009. – № 4. – С. 6–12.

Alexander B. Nikitin

Alexey N. Kovkin

Valeriy A. Sokolov

«Automation and Remote Control on Railway» department
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Natalya A. Zhuravlyeva

«Economics of Transport» department
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Principles of safe interface with objects in computer based railway automation systems

This article discusses methods for constructing interface devices for computer based systems of railway automation using various components and principles of safety provision in case of failures. A comparative description of various approaches to the implementation of safe interface devices taking into account modern achievements in the

field of power electronics is given. Particular attention is paid to the selection of technical solutions, taking into account the specifics of executive facilities, the requirements for the used component base and the features of the system implementation area.

relay interface devices, contactless interface devices, relay interface devices, first class relay, power relay, monitoring of switching elements

References

1. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Hristov H. A., Gavzov D. V. (1995) Methods of construction of safe microelectronic systems of railway automation [Metody postroeniya bezopasnykh mikroelektronnykh sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki], ed. V. V. Sapozhnikova. – Moscow : Transport. – 272 p.
2. Safety of railway automation and remote control. Methods and principles of ensuring the safety of microelectronic systems railway automation [Bezopasnost zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki Metody i printsipy obespecheniya bezopasnosti mikroelektronnykh SZHAT] (1994). RTM 32 TSSH 1115842. 01–94. – St. Petersburg. PGUPS. – 120 p.
3. Sapozhnikov V. V., Kravtsov Yu. A., Sapozhnikov V. V. (2008) Theoretical foundations of railway automation and telemechanics [Teoreticheskie osnovy zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki uchebnik]: dlya vuzov zh d transporta, ed. V. V. Sapozhnikova. Moscow : GOU «Uchebno-the methodical centre on education on railway transport». – 394 p.
4. Nikitin A. B., Kovkin A. N., Manakov A. D. (2018) The use of small-sized power relays in the safe interface devices of computer systems of railway automation [Ispolzovanie malogabaritnykh silovykh rele v bezopasnykh ustrojstvakh sopryazheniya kompyuternykh sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki]. Automation on transport [Avtomatika na transporte]. – Vol. 4. – No 2. Pp. 264–278.
5. Nikitin A. B., Kovkin A. N. (2016) The use of functional converters with asymmetric failure to control AC drives [Ispolzovanie funktsionalnykh preobrazovatelej s nesimmetrichnym otkazom dlya upravleniya ehlektroprivodami peremennogo toka]. Automation on transport [Avtomatika na transporte]. – Vol. 2. – No 1. Pp. 7–18.
6. Nikitin A. B., Kovkin A. N., Baluev N. N., Nasedkin O. A., Aleshechkin Yu. A. Patent for utility model No 114017 MPK B61L. Device for switching on the actuators of railway automation and remote control systems. [Ustrojstvo dlya vklyucheniya ispolnitelnykh ustrojstv sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki]. The Beginning of validity of the patent 03. 10. 2011. Data publication 10. 03. 2012.
7. Voronin P. A. (2001) Power semiconductor switches: families, characteristics, application [Silovye poluprovodnikovye klyuchi semejstva harakteristiki primenenie]. – Moscow, Publishing house «Dodeka-XXI». – 384 p.
8. Semenov B. YU. (2001) Power electronics for Amateurs and professionals [Silovaya ehlektronika dlya lyubitelej i professionalov]. – Moscow : «SOLON-R». – 327 p.
9. Kovkin A. N. (2004) The impact of cable networks on the safe of the functioning of the contactless interface device [Vliyanie kabelnykh setej na bezopasnost funktsionirovaniya beskontaktnykh ustrojstv sopryazheniya], Collection of scientific works. St. Petersburg, PGUPS. – Pp. 51–55.

10. Nikitin A. B., Kovkin A. N., Baluev N. N., Nasedkin O. A., Abramov O. A., Aleshechkin Yu. A. Patent for utility model No 113093 MPK H02M. The inverter DC voltage into threephase AC voltage. [Preobrazovatel postoyannogo napryazheniya v trekhfaznoe peremennoe napryazhenie]. The Beginning of validity of the patent 21.07.2011. Date of publication 27.01.2012.
11. Nikitin A. B., Kovkin A. N. (2017) Using the principle of relay- semiconductor switching to control of electrical drives in modern systems hump centralization [Ispolzovanie printsipa relejno poluprovodnikovoj kommutatsii dlya upravleniya strelochnymi ehlektroprivodami v sovremennyh sistemah gorochnoj tsentralizatsii]. Automation on transport [Avtomatika na transporte]. – Vol. 3. – No 2. – Pp. 178–191.
12. Florentsev S. N. (2002) Current state and prospects of power electronics devices development [Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya priborov silovoj ehlektroniki]. Electronic industry [Elektronnaya promyshlennost]. – No 4. – P. 34.
13. Bashkirov V. (2005) Intelligent power modules by International Rectifier for electric drive low power [Intellektualnye silovye moduli kompanii International Rectifier dlya ehlektroprivoda maloj moshchnosti]. Power electronics [Silovaya ehlektronika]. – No 1. Pp. 30–35.
14. Lantsov V., S. E Hranosyan. (2009) Intelligent power electronics: from the present to the future [Intellektualnaya silovaya ehlektronika ot nastoyashchego k budushchemu]. Power electronics [Silovaya ehlektronika]. – No 4. – Pp. 6–12.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Д. С. Марковым
Поступила в редакцию 11.02.2019, принята к публикации 06.03.2019*

НИКИТИН Александр Борисович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I;

e-mail: Nikitin@crtc.spb.ru

КОВКИН Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I;

e-mail: akovkin@yandex.ru

СОКОЛОВ Валерий Александрович – старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I;

e-mail: sokolov@pgups.ru

ЖУРАВЛЕВА Наталья Александровна – доктор экономических наук, профессор, заведующая кафедрой «Экономика транспорта» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, директор Института прикладной экономики и бухгалтерского учета ж.-д. транспорта;

e-mail: zhuravleva_na@mail.ru

© Никитин А. Б., Ковкин А. Н., 2019
© Соколов В. А., Журавлева Н. А., 2019

УДК 69.003.13:656.259.9

С. В. Бушуев, канд. техн. наук
А. Н. Попов, канд. техн. наук
М. Л. Попова

Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»
Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ СВОБОДНОСТИ УЧАСТКОВ ПУТИ

Выполнен обзор используемых средств контроля состояния свободности участка пути на сети отечественных и зарубежных железных дорог. Отмечается, что основными средствами контроля состояния свободности участков пути на сети российских железных дорог являются рельсовые цепи, фиксирующие факт излома или изъятия рельса, т. е. выполняющие контрольный режим работы. В статье также отмечается, что системы счета осей на российских железных дорогах имеют ограниченное применение, что объясняется отсутствием возможности выявлять факт излома или изъятия рельса. Рассматривается проблема обеспечения рельсовыми цепями безопасности перевозочного процесса при выполнении контрольного режима работы: при контрольном режиме работы рельсовыми цепями отслеживается электрическая целостность рельса, но существующие повреждения на поверхности катания и в теле рельса не определяются, что создает непосредственную угрозу безопасности движения. На основе выполненного обзора использования систем счета осей на железных дорогах мира в качестве основных средств контроля состояния свободности участка пути и с учетом того факта, что существующие средства контроля состояния участка пути не выявляют остродефектных рельсов, предлагается выполнение частичной замены рельсовых цепей на датчики счета осей на станционных объектах ОАО «РЖД».

Выполнена оценка экономической эффективности на основе сравнения требуемых капитальных вложений и эксплуатационных расходов на обслуживание сравниваемых устройств, выявлены зависимости изменения капитальных вложений от параметров путевого развития станций.

капитальные вложения, эксплуатационные расходы, тональные рельсовые цепи, системы счета осей, трудоемкость обслуживания, остродефектные рельсы.

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-2-202-220

Введение

Функционирование систем железнодорожной автоматики и телемеханики основано на использовании датчиков контроля состояния участков пути. В качестве датчика контроля состояния пути на железных дорогах, линиях метрополитена и объектах промышленного транспорта используются рельсовые цепи и системы счета осей (ССО).

На отечественных железных дорогах основным датчиком, выполняющим функцию контроля состояния свободности или занятости путевого участка, являются рельсовые цепи [1]. В настоящее время на сети российских железных дорог используется около 270 тысяч рельсовых цепей и 3 тысячи датчиков счета осей. Число внедренных в эксплуатацию датчиков счета осей в сравнении с рельсовыми цепями незначительно, что объясняется существующей нормативной документацией, регламентирующей порядок проектирования устройств автоматики и телемеханики на объектах ОАО «РЖД». В соответствии с [2] ССО на сети российских железных дорог имеют ограниченное применение и могут использоваться в качестве основных или резервных средств (по отношению к рельсовым цепям) на участках с пониженным сопротивлением балласта, с металлическими шпалами и на подходах к металлическим мостам, а также при модернизации малодеятельных участков, ранее оборудованных полуавтоматической блокировкой (ПАБ).

Одна из причин ограниченного использования ССО заключается в том, что эти системы, в отличие от рельсовых цепей, не могут выявлять излом или изъятие рельса, т. е. не выполняют контрольный режим работы. При выполнении контрольного режима работы рельсовой цепью отслеживается электрическая целостность рельсовой линии, но дефекты, образующиеся при эксплуатации на поверхности катания и в теле рельса, не выявляются. По данным классификатора дефектов рельсов, представленного в документе [3], выделяют более 20 кодов дефектных и острodefектных рельсов, возникающих при эксплуатации. К острodefектным рельсам относятся рельсы с изломами, выколами и трещинами, выявляемыми при осмотре пути. Острodefектные рельсы из-за непредсказуемости разрушения создают угрозу безопасности движения, поэтому требуют немедленного их изъятия из использования. В свою очередь дефектные рельсы содержат внутренние дефекты, выявляемые при выполнении дефектоскопии пути. В большинстве случаев выявленные дефектные рельсы не требуют их немедленного изъятия и продолжают далее использоваться с наблюдением дальнейшего развития дефекта. Таким образом, рельсовая цепь позволяет выявлять излом и изъятие рельса, но острodefектные рельсы, создающие непосредственную угрозу безопасности движения, рельсовая цепь не выявляет. Несмотря на данный недостаток рельсовой цепи в существующей

нормативной документации при проектировании объектов ОАО «РЖД» рельсовая цепь является основным средством контроля состояния пути, рекомендуемым к использованию [2, 4].

При отсутствии возможности выполнять контрольный режим работы и выявлять остродефектные рельсы ССО на железных дорогах мира находят широкое применение и в отдельных странах используются в качестве основных средств контроля состояния путевого участка. К примеру, на железных дорогах Швейцарии, полностью построенных на металлических шпалах, используются только ССО. На железных дорогах Германии, оснащенных достаточно большим числом рельсовых цепей, при новом строительстве и модернизации существующих объектов в качестве основного датчика состояния пути рекомендуется использовать ССО. В Австрии в качестве датчика контроля состояния пути может использоваться как рельсовая цепь, так и датчики счета осей: выбор системы определяется условиями эксплуатации [5]. Таким образом, на сети зарубежных железных дорог ССО находят массовое использование, что объясняется рядом преимуществ этих систем при эксплуатации в сравнении с рельсовыми цепями.

В отличие от рельсовых цепей ССО оснащены встроенной самодиагностикой, могут использоваться при любом сопротивлении балласта, требуют меньших трудозатрат при эксплуатации [6–8]. Значительным преимуществом при проектировании ССО является отсутствие ограничения по длине контролируемого участка, что позволяет сократить затраты напольной аппаратуры при строительстве, а также снизить трудоемкость обслуживания при эксплуатации [9–12]. На зарубежных дорогах мира ССО зарекомендовали себя достаточно устойчивыми системами при эксплуатации [13].

На основе приведенного обзора использования ССО на железных дорогах мира, с учетом ряда преимуществ этих систем и того факта, что существующие датчики контроля состояния свободы участка пути не выявляют остродефектных рельсов, возникает вопрос о возможности выполнения на российских железных дорогах частичной замены существующих рельсовых цепей датчиками счета осей с обеспечением безопасности перевозочного процесса. Данный вопрос особенно актуален в рамках выполнения программы ресурсосбережения, являющейся приоритетным направлением развития ОАО «РЖД».

1. Описание структуры определения капитальных вложений строительства для ТРЦ и ССО

Прежде чем заменять рельсовую цепь на датчики счета осей, необходимо оценить экономическую эффективность выполнения этого мероприятия. При оценке экономической эффективности выполняемых мероприятий в соответствии с [14] требуется сравнение капитальных (единовремен-

ных) вложений и эксплуатационных расходов для рассматриваемых устройств. Поскольку для сравниваемых устройств отсутствуют укрупненные показатели стоимости строительства, для ее оценки авторами статьи был выполнен анализ проектно-сметной документации для одного из существующих на российском рынке производителей ССО и тональных рельсовых цепей (ТРЦ), рекомендуемых к проектированию при новом строительстве и модернизации объектов ОАО «РЖД» [2, 4].

Для того чтобы проследить характер изменения капитальных вложений в строительство сравниваемых устройств, использовалась проектно-сметная документация для станций с различным путевым развитием. С целью сохранения конфиденциальности информации в используемой документации названия станций были изменены на буквенные обозначения. Рассматриваемые станции различались по следующим параметрам: числу приемоотправочных путей, количеству рельсовых цепей (выделяемых участков), числу контролируемых ответвлений (датчиков счета осей), расстоянию между входными светофорами, числу стрелок.

В структуре капитальных вложений (K_B) учитывались затраты: стоимость напольного оборудования без изолирующих стыков ($C_{o.n}$), стоимость изолирующих стыков ($C_{и.с}$), стоимость напольных монтажных работ без учета стоимости напольного кабеля ($C_{м.н}$), стоимость постового оборудования без учета стоимости стативов ($C_{o.п}$), стоимость стативов ($C_{ст}$), стоимость монтажных работ на посту ($C_{м.п}$):

$$K_B = C_{o.n} + C_{и.с} + C_{м.н} + C_{o.п} + C_{ст} + C_{м.п}.$$

В выделенных затратах не учитывалась стоимость разработки траншеи и укладки в нее кабеля, т. к. трасса прокладываемого кабеля для рассматриваемых устройств совпадает с траншеей напольных устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ). Стоимость пусконаладочных работ также не рассматривалась, т. к. она учитывается в составе наладки устройств электрической централизации (ЭЦ). Для исключения искажения результатов в структуре капитальных вложений затраты по используемому напольному кабелю не учитывались и рассмотрены далее. Капитальные вложения определялись в текущих ценах на первый квартал 2018 года.

Перечень номенклатуры, учитываемой в стоимости напольного и постового оборудования ($C_{o.n}$, $C_{o.п}$) для сравниваемых устройств, представлен в табл. 1.

До начала интерпретации полученных результатов капитальных вложений необходимо отметить условия эксплуатации для сравниваемых устройств, учтенные в проектной документации, поскольку они оказывают влияние на формирование номенклатуры используемого оборудования.

Таблица 1. Перечень учитываемой номенклатуры оборудования

Перечень	ТРЦ	ССО
Напольного оборудования	<ul style="list-style-type: none"> • Ящик путевой герметизированный • Трансформатор ПОБС-2Г • Дроссель-трансформатор ДТ-0,2-1000, $n = 40$ • Выключатель тока низковольтный автоматического многократного действия АВМ-2 • Резистор постоянный РП 1,1-200 • Резистор постоянный низкоомный РПН • Выравниватель типа ВОЦН • Стык изолирующий рельсов типа Р65 с комбинированными (металлокомпозитными) накладками • Стрелочная изоляция 	<ul style="list-style-type: none"> • Датчик путевой универсальный • Напольное счетное устройство • Коробка соединительная конечная • Коробка соединительная промежуточная • Муфта кабельная • ЗИП к напольной аппаратуре
Постового оборудования	<ul style="list-style-type: none"> • Генератор путевой ГП 3С • Приемник путевой ПП 3С • Фильтр путевой ФПМ • Штепсельные реле • Статив релейный типа СРКМ-75 • Трансформатор ПОБС-5МП • Выравниватель типа ВОЦН 	<ul style="list-style-type: none"> • Станционный шкаф • ЗИП к станционному шкафу

Все рассматриваемые станции с ТРЦ были оборудованы электротягой постоянного тока с использованием кодирования, поэтому в номенклатуре напольного оборудования учтены изолирующие стыки. Изолирующие стыки на станциях с ТРЦ используются для исключения зоны дополнительного шунтирования и ограничения растекания тока кодирования. Для обратного пропуска тягового тока в обход изолирующих стыков используются дроссель-трансформаторы, также учтенные в номенклатуре [4, 15].

Для ССО использовалась проектная документация по станционным объектам промышленного транспорта с автономной тягой без использования кодирования на выделяемых участках. Поскольку в ССО питание к путевым датчикам передается с поста электрической централизации по напольному кабелю и в рассматриваемой проектной документации кодирование отсутствует, т. е. рельсы не используются для передачи энергии, установка изолирующих стыков по концам выделяемых участков не требуется.

Следует также отметить, что при использовании ССО на станционных объектах ОАО «РЖД» взамен рельсовых цепей для исключения несанкционированного выезда поезда на установленный маршрут необходима организация передачи сигналов локомотивной сигнализации. При реализации кодирования для ограничения растекания тока по концам выделяемых участков потребуется установка изолирующих стыков, а при наличии электротяги – использование дроссель-трансформаторов.

Для удобства сравнения требуемых капитальных вложений затраты по реализации кодирования для рассматриваемых устройств авторами статьи были опущены и в последующем не учитывались. Но не стоит забывать, что использование ССО взамен рельсовых цепей позволяет в один выделяемый участок объединять несколько рельсовых цепей, тем самым обеспечивается сокращение стоимости постового и напольного оборудования, а также затрат на реализацию кодирования.

Рассмотрим полученные результаты анализа капитальных вложений при строительстве сравниваемых устройств.

2. Результаты анализа капитальных вложений при строительстве сравниваемых устройств

По результатам капитальных вложений для сравниваемых устройств от числа рельсовых цепей (выделяемых участков) прослеживаются меньшие затраты при внедрении ССО (рис. 1), но т. к. в сметной документации для ССО не учитывалась стоимость изолирующих стыков, то нельзя утверждать о потребности меньших затрат при внедрении ССО на объектах ОАО «РЖД».

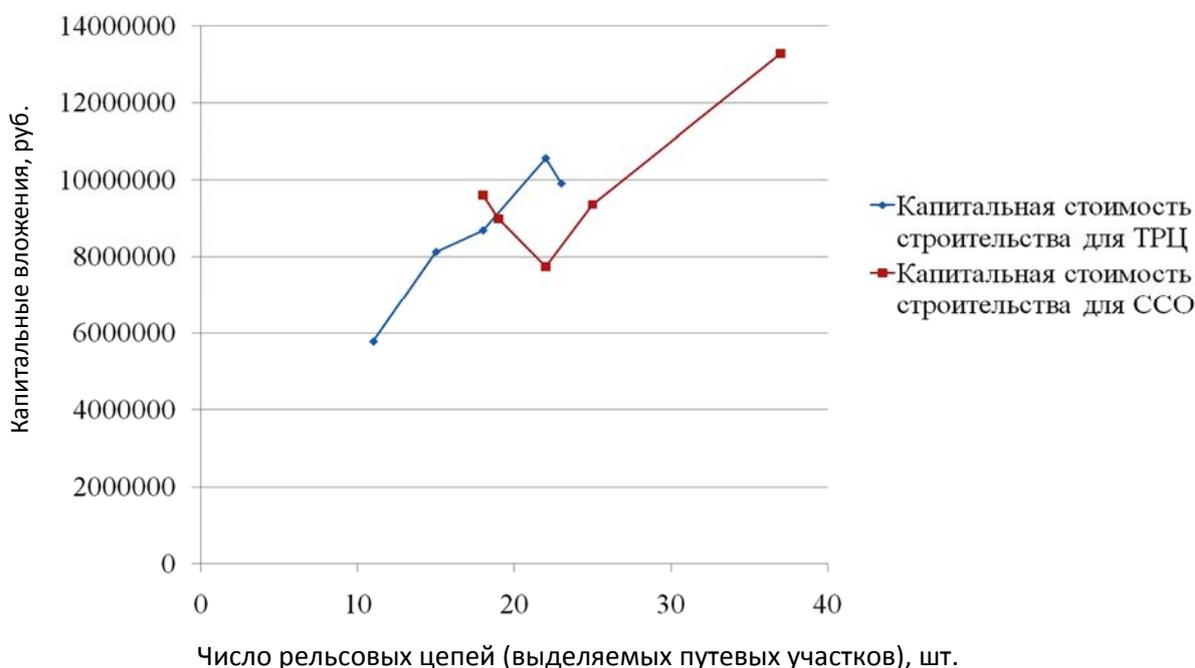


Рис. 1. Изменение капитальных вложений при оборудовании ТРЦ и ССО от числа рельсовых цепей (выделяемых участков)

Из круговой диаграммы распределения капитальных вложений по статьям затрат для ТРЦ (рис. 2) следует, что большая часть стоимости приходится на изолирующие стыки (32,48 %), постовую аппаратуру РЦ (23,61 %) и стативы в базовой комплектации (27,06 %).

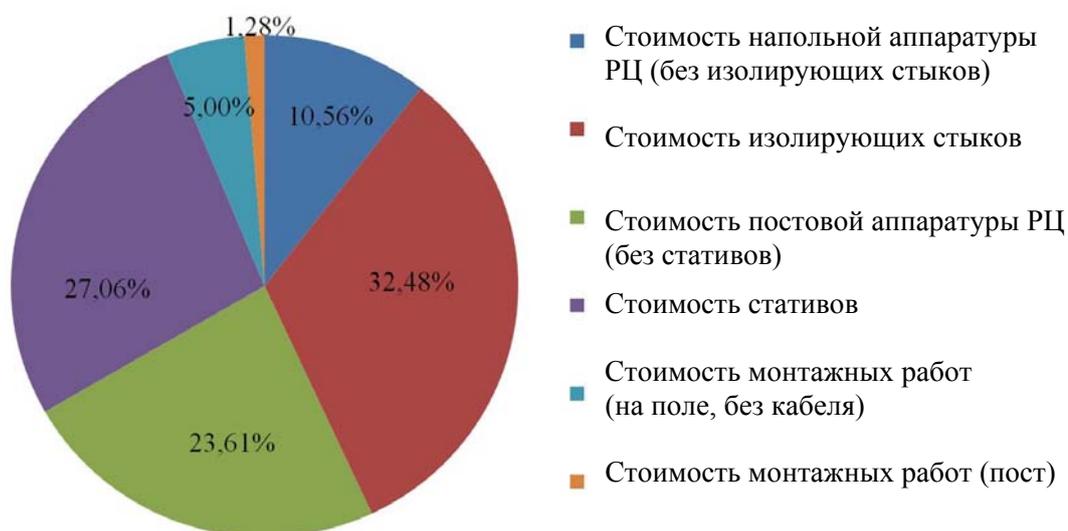


Рис. 2. Распределение капитальных вложений по статьям затрат при оборудовании ТРЦ

По распределению капитальных вложений при оборудовании ТРЦ виден рост всех затрат строительства с увеличением числа контролируемых ответвлений (рис. 3).

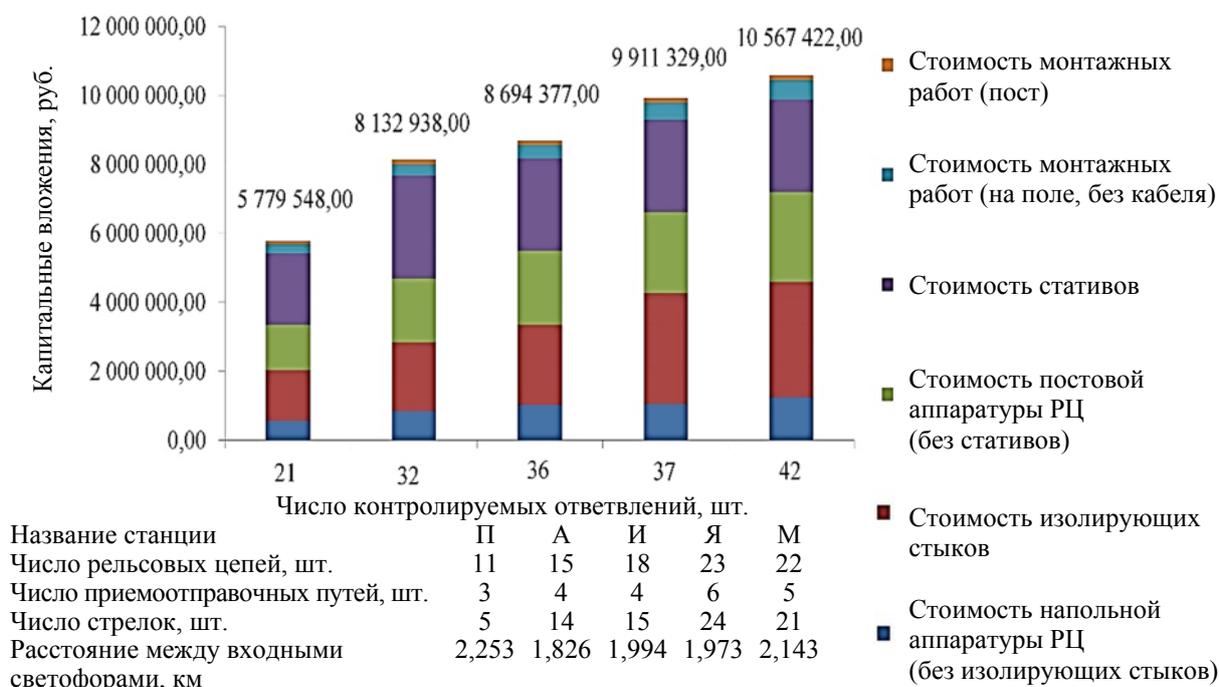


Рис. 3. Распределение капитальных вложений по статьям затрат при ТРЦ от числа контролируемых ответвлений

Из круговой диаграммы распределения капитальных вложений по статьям затрат при оборудовании станции ССО (рис. 4) следует, что большая часть стоимости приходится на напольное и постовое оборудование (97,63 %).

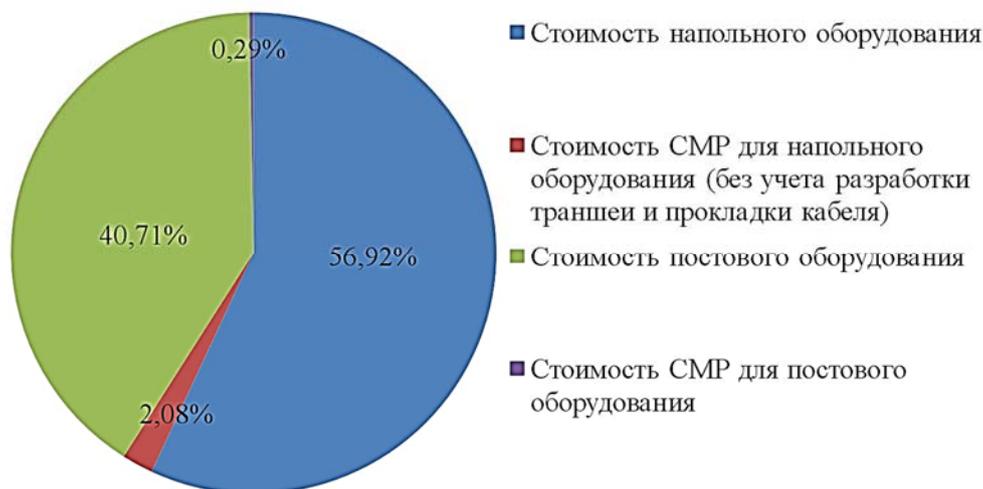


Рис. 4. Распределение капитальных вложений по статьям затрат при оборудовании ССО

При анализе распределения капитальных вложений по статьям затрат от числа используемых датчиков счета осей (рис. 5) установили зависимость удорожания стоимости напольного оборудования и строительно-монтажных работ, выполняемых на поле, при увеличении числа датчиков. Незначительный скачок стоимости напольного оборудования и полевых строительно-монтажных работ на станции Р, при большем числе датчиков, используемых на станции М, объясняется более вытянутым расположением станции Р, что определяется расстоянием между входными светофорами. Более вытянутое расположение станции Р требует установки дополнительных ретрансляционных устройств, необходимых для согласования постовой аппаратуры с напольной. Установка дополнительного оборудования влияет на увеличение общей стоимости напольного оборудования и затрат на выполнение полевых строительно-монтажных работ. Стоимость постового оборудования и строительно-монтажных работ на посту не изменяется, что объясняется одинаковым набором постовой аппаратуры для рассматриваемого числа датчиков.

Капитальные вложения по статьям затрат, приведенные на рельсовую цепь при ТРЦ, получились больше приведенных вложений на выделяемый участок при ССО (рис. 6).

Если учесть, что при использовании ССО на станционном объекте ОАО «РЖД» с реализацией кодирования потребуются установка изолирующих стыков, то к капитальным вложениям, приведенным на выделяемый

участок для ССО, необходимо прибавить стоимость изолирующих стыков, приведенную на рельсовую цепь. Итоговые капитальные вложения при оборудовании станции сравнимаемыми устройствами будут примерно одинаковые.

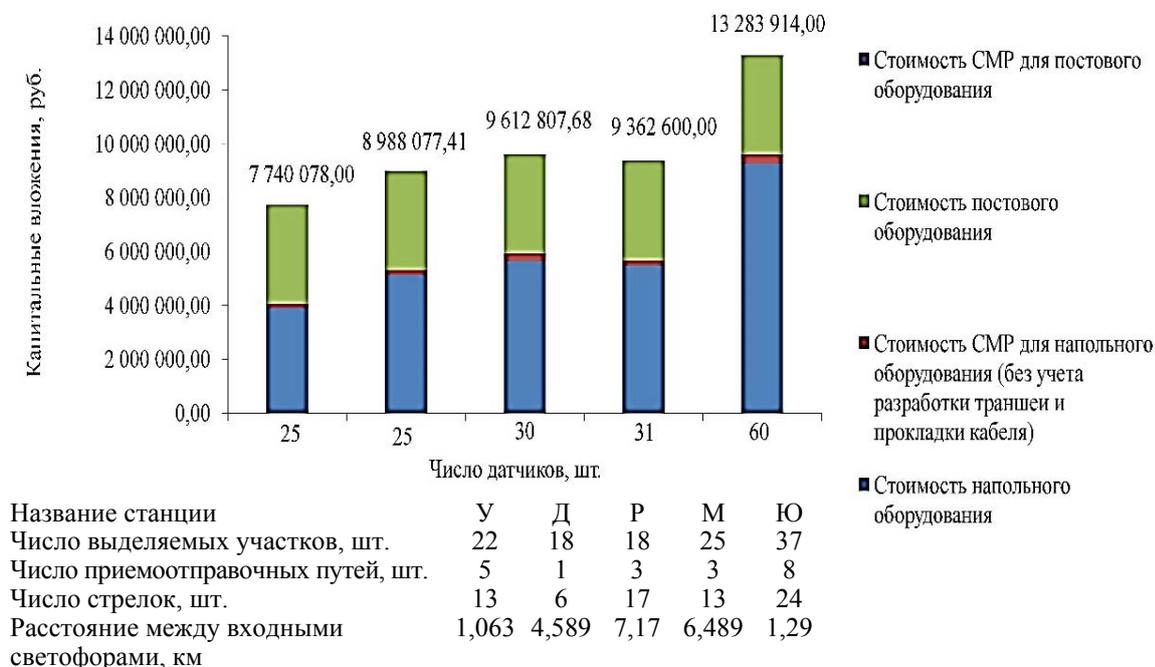


Рис. 5. Распределение капитальных вложений по статьям затрат при ССО от числа датчиков

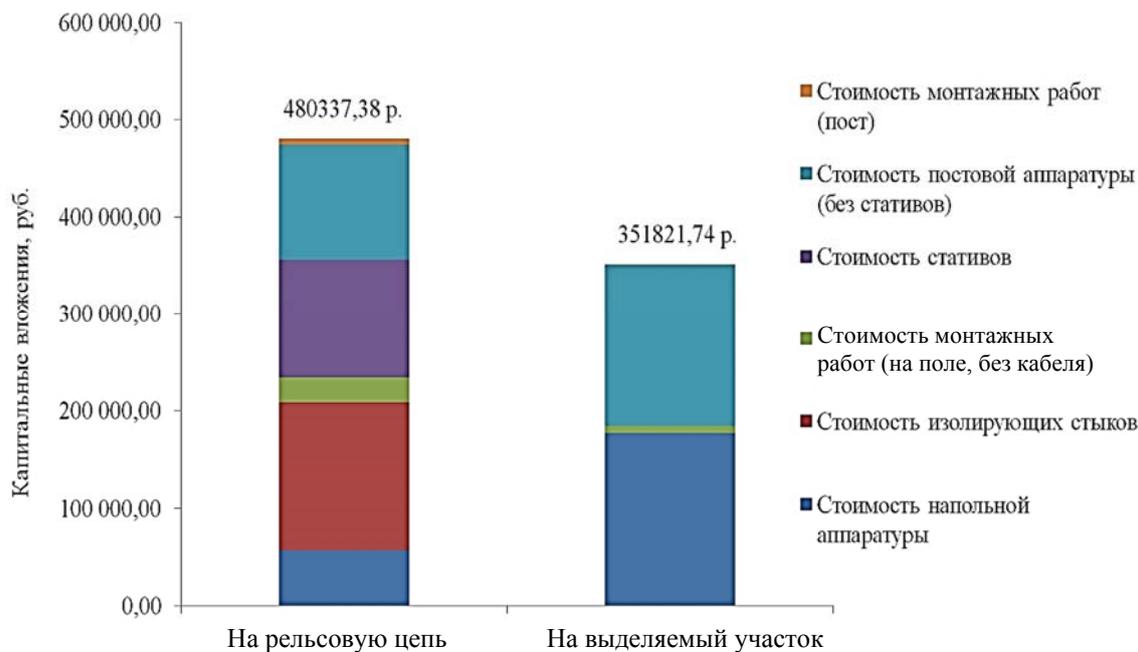


Рис. 6. Капитальные вложения по статьям затрат, приведенные на рельсовую цепь при ТРЦ и выделяемый участок при ССО

Для сравнения эксплуатационных расходов был выполнен анализ нормативной трудоемкости, требуемой для обслуживания устройств в течение года на рассматриваемых станциях. Нормативная трудоемкость определялась с использованием технологических карт, содержащих перечень выполняемых работ, и установленных норм времени на техническое обслуживание устройств автоматики и телемеханики, представленных в документах [16–18]. Учитываемый перечень технологических карт представлен в табл. 2.

Таблица 2. Перечень учитываемых технологических карт

Номер карты	Наименование технологической карты
ТРС	
3.1	Проверка на станции состояния изолирующих элементов рельсовых цепей, стыковых соединителей и перемычек
3.3	Проверка станционных рельсовых цепей на шунтовую чувствительность: двухниточных рельсовых цепей неразветвленных и разветвленных, параллельные ответвления которых контролируются путевыми реле
3.4	Проверка соединителей 3300 мм с применением шунта сопротивлением 0,06 Ом и индикатора тока рельсовой цепи (не обтекаемые сигнальным током)
3.6	Измерение напряжения на обмотках путевого реле и/или на входе путевого приемника
3.7	Измерение остаточного напряжения при шунтовом режиме рельсовой цепи: на входе путевого приемника ТРС
3.8	Проверка в станционных рельсовых цепях тональной частоты: работы схемы контроля очередности занятия ответвлений рельсовой цепи (при наличии схемы логического контроля занятия ответвлений); работы схемы контроля замыкания изолирующих стыков
3.9	Проверка правильности чередования полярности напряжений, фаз напряжений или последовательности импульсных посылок в смежных рельсовых цепях, а также работы схем контроля замыкания изолирующих стыков.
3.10	Проверка клеммных соединителей кабеля в кабельных стойках, путевых ящиках, дроссель-трансформаторов
3.11	Наружная покраска кабельных стоек и муфт, путевых ящиков, дроссель-трансформаторов
3.13	Измерение сопротивления изоляции рельсовой линии (балласта) в рельсовых цепях длиной более 300 м
5.12	Проверка соответствия действующих устройств СЦБ утвержденной технической документации
6.1	Проверка состояния приборов и штепсельных розеток со стороны монтажа. Проверка состояния выравнителей и разрядников.
10.1.3	Измерение сопротивления изоляции кабельных линий по отношению к земле с минимальным отключением монтажа (в том числе запасных жил кабеля)
11.1.2	Внешний осмотр, проверка состояния и чистка элементов питающей установки
11.1.4	Проверка степени нагрева коммутационных элементов, обмоток трансформаторов силовых цепей устройств электропитания и предохранителей номиналом выше 20 А. Проверка работы схемы контроля предохранителей питающей установки

Номер карты	Наименование технологической карты
3168р п. 53	Приварка рельсовых соединителей
№ 256 от 19.06.16 г.	Проверка сборных изолированных стыков после их разборки и замены с составлением акта
3168р табл. 1	Выполнение работ по текущему ремонту, техническому обслуживанию устройств СЦБ, выполняемых по состоянию и сопровождению работ работниками смежных служб (№ 42, 43, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 54, 55, 56, 57, 72, 74, 75)
ССО	
16.1.1	Внешний осмотр путевых ящиков, содержащих напольное оборудование ССО. Проверка крепления и очистка датчиков. Проверка состояния отводов кабелей.
16.1.2	Проверка внутреннего состояния путевых ящиков, надежности крепления кабельных жил
16.1.3	Просмотр и анализ архивных файлов и устранение отклонений в работе устройств
16.1.4	Проверка функционирования путевых датчиков счета осей имитатором колеса

Требуемая нормативная трудоемкость для обслуживания сравниваемых устройств на станциях с различным путевым развитием представлена на рис. 7.

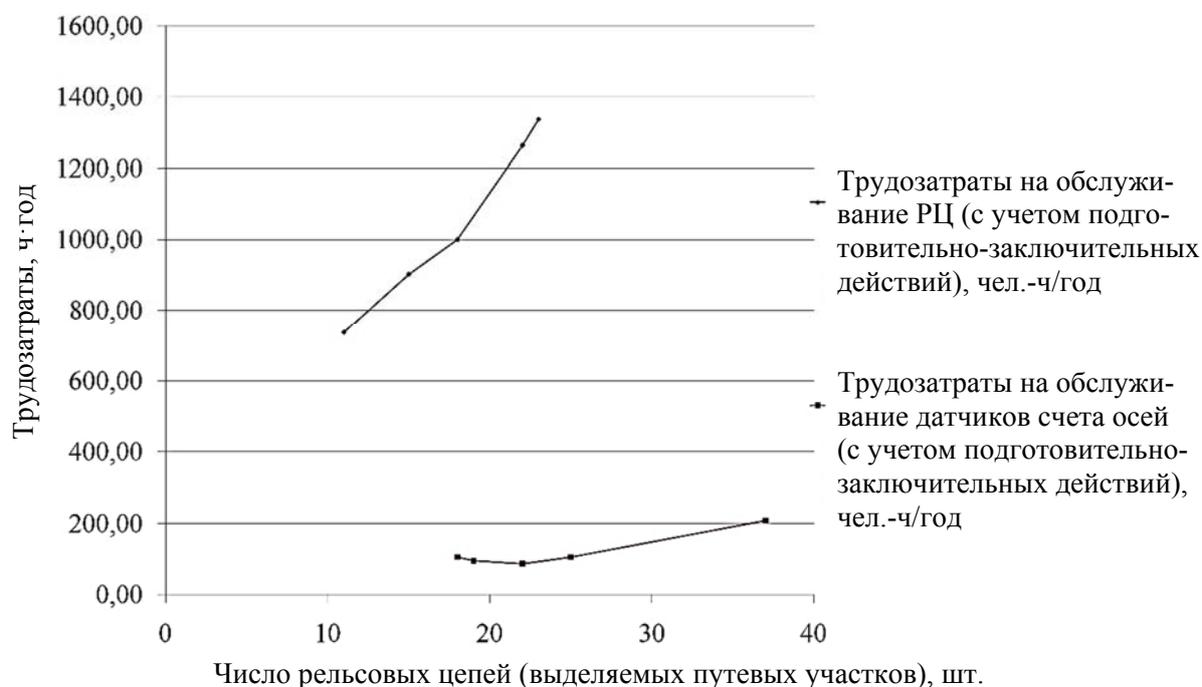


Рис. 7. Нормативная трудоемкость обслуживания, приведенная к рельсовой цепи (выделяемому участку)

По характеру изменения нормативной трудоемкости для ТРЦ наблюдается стремительный рост при увеличении числа рельсовых цепей (выделяемых участков).

Нормативная трудоемкость при использовании ССО плавно увеличивается в небольшом диапазоне от 100 до 200 ч·год для рассматриваемого числа выделяемых участков. Для станции с 23 выделяемыми участками наблюдается меньшее значение требуемой трудоемкости обслуживания в отличие от станции с 18 выделяемыми участками, что объясняется меньшей разветвленностью выделяемых участков на рассматриваемой станции. При сравнении требуемых нормативных трудоемкостей наблюдается сокращение трудозатрат от 9 до 13 раз при использовании ССО.

Анализ зависимости изменения общей длины напольного кабеля от параметров путевого развития станций, оборудованных ТРЦ, выявил увеличение длины напольного кабеля при увеличении числа контролируемых ответвлений, числа рельсовых цепей и количества приемоотправочных путей. Зависимость изменения длины напольного кабеля от числа контролируемых ответвлений близка к линейной. Было установлено, что общая длина напольного кабеля не зависит от расстояния между входными светофорами, т. е. от длины магистральной траншеи. Отсутствие зависимости общей длины напольного кабеля от расстояния между входными светофорами объясняется поперечным расположением рассматриваемых станций. Рассматриваемые станции различаются по числу приемоотправочных путей, и расстояния между входными светофорами различаются незначительно (см. рис. 3). При поперечном расположении большая часть напольного кабеля прокладывается не в магистральной траншее, а в дополнительных траншеях, разрабатываемых от нее к точкам подключения аппаратуры питающих и релейных трансформаторов приемоотправочных путей.

Следует отметить, что в ТРЦ не разрешается в одном кабеле совмещать прямые и обратные жилы для питающего и релейного конца, т. е. к каждой точке подключения аппаратуры прокладывается по два кабеля. Используемый напольный кабель в ТРЦ в пределах станции имеет разную жильность, и требуемый тип кабеля определяется составлением кабельной сети питающих и релейных трансформаторов [4, 15]. Данные особенности оказывают влияние на увеличение общей длины и стоимости напольного кабеля.

Стоимость напольного кабеля, приведенная на одно контролируемое ответвление для рассматриваемых станций с ТРЦ, практически не изменяется, что видно из результатов, представленных на рис. 8.

Анализ зависимости изменения общей длины напольного кабеля от параметров путевого развития станций, оборудованных ССО (рис. 9), выявил увеличение длины напольного кабеля при увеличении длины магистральной траншеи (расстояния между входными светофорами).



Рис. 8. Изменение стоимости кабеля при ТРЦ, приведенной на контролируемое ответвление

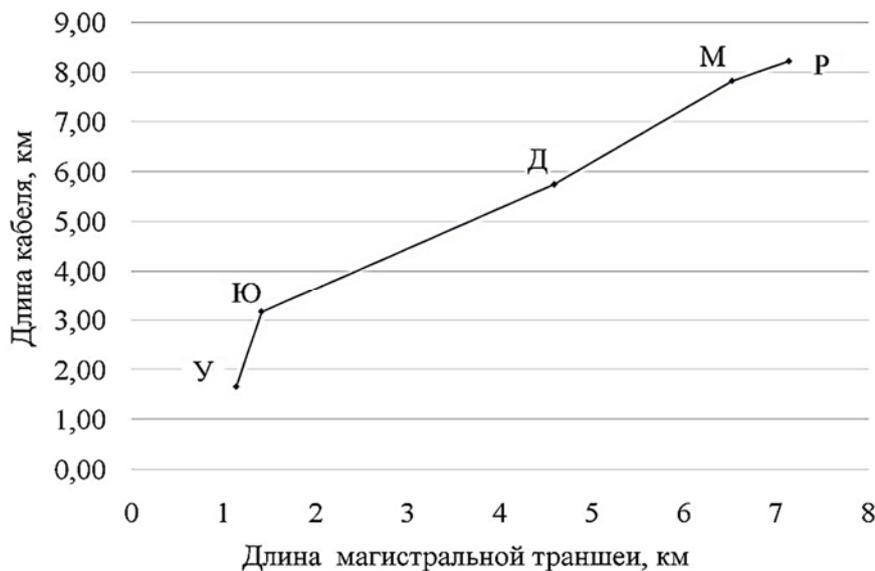


Рис. 9. Зависимость изменения длины напольного кабеля при ССО от длины магистральной траншеи

Зависимость общей длины напольного кабеля от расстояния между входными светофорами (длины магистральной траншеи) объясняется особенностями прокладки кабельной сети для датчиков счета осей на станциях с различным геометрическим расположением. Для рассматриваемых станций с ССО прослеживаются два типа расположения: поперечное и продольное. Для станций с меньшим числом приемоотправочных путей (см. рис. 5, станции Д, Р, М) прослеживается продольное расположение с удаленными расстояниями между входными светофорами и наличием длинных выделяемых участков в горловинах станций. Для станций с большим числом приемоотправочных путей прослеживается поперечное расположение (см. рис. 5, станции У, Ю) с незначительными расстояниями меж-

ду входными светофорами и небольшими длинами выделяемых участков в горловинах станций.

В ССО подключение датчиков счета осей выполняется последовательно в соответствии с их расположением на схематическом плане станции, и на длинных выделяемых участках с целью сокращения выполнения земляных работ трасса прохождения напольного кабеля от подключенного датчика к следующему возвращается по ранее разработанной дополнительной траншее к магистральной траншее. Следует отметить, что использование в ССО унифицированного кабеля, совмещающего в себе жилы для питания и опроса состояния датчиков, позволяет сократить длину и стоимость напольного кабеля.

Приведенная стоимость напольного кабеля для ССО на один километр магистральной траншеи (рис. 10) практически не изменяется и находится в диапазоне от 85 до 110 тысяч рублей. Наблюдаемый скачок изменения приведенной стоимости напольного кабеля для станции Ю объясняется тем, что рассматриваемая станция имеет поперечное расположение (см. рис. 5, 10).

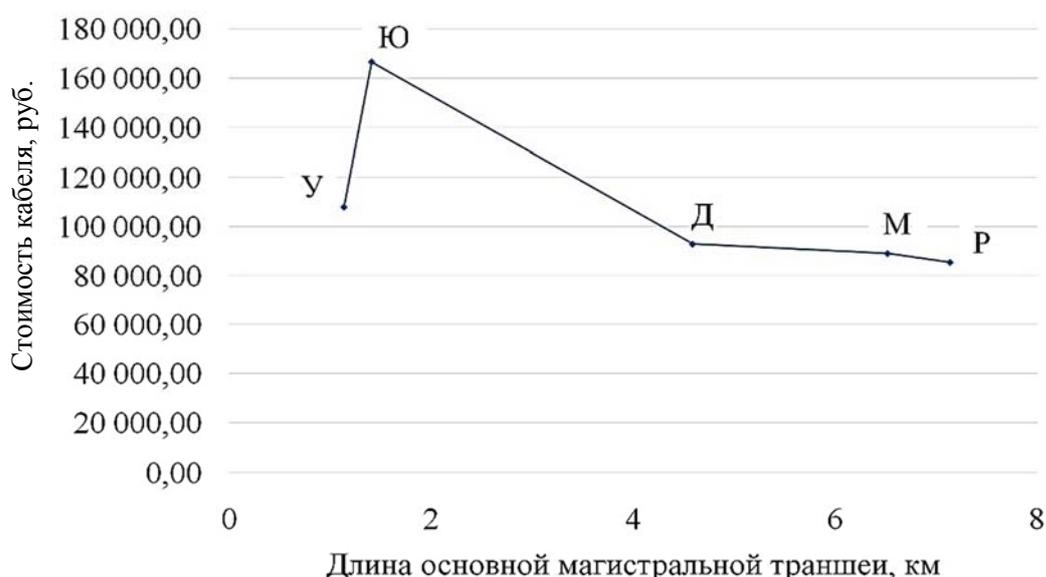


Рис. 10. Изменение приведенной стоимости напольного кабеля при ССО на 1 км магистральной траншеи

Заключение

Получены следующие результаты:

– определены численные оценки требуемых капитальных вложений для ТРЦ и ССО, приведенные к рельсовой цепи (выделяемому участку). Установлено, что при оборудовании станционных объектов сравниваемы-

ми устройствами с реализацией кодирования потребуются примерно одинаковые затраты;

– выявлен характер изменения нормативной трудоемкости для сравниваемых устройств. Наблюдается стремительный рост нормативной трудоемкости для ТРЦ при увеличении числа рельсовых цепей (выделяемых участков). При этом для ССО нормативная трудоемкость плавно увеличивается в небольшом диапазоне. Для рассматриваемых станций с числом рельсовых цепей (выделяемых участков) от 16 до 25 достигается сокращение трудоемкости обслуживания при использовании ССО в 9–13 раз;

– полученные оценки капитальных вложений и эксплуатационных затрат позволяют заключить, что при равных капитальных вложениях для сравниваемых устройств наибольший экономический эффект от использования будет наблюдаться для ССО за счет сокращения эксплуатационных расходов на обслуживание устройств;

– выявлена зависимость изменения длины напольного кабеля для рассматриваемых устройств от параметров путевого развития станций. Установлено, что для ССО присутствует зависимость длины напольного кабеля от длины магистральной траншеи (расстояния между входными светофорами), а для ТРЦ – зависимость от числа рельсовых цепей и количества приемоотправочных путей.

Существенный недостаток при выполнении анализа капитальных вложений для сравниваемых устройств заключается в ограниченной выборке рассматриваемых станций, имеющих схожее путевое развитие. Для выявления параметров путевого развития станций, оказывающих наибольшее влияние на капитальные вложения, необходимо расширить набор исследуемых станций с различным путевым развитием. Выявленные параметры путевого развития станций, оказывающие наибольшее влияние на формирование капитальных вложений, в дальнейшем позволят обосновывать выбор средств контроля состояния свободности участков пути на станциях в зависимости от их типа путевого развития и назначения использования.

Библиографический список

1. Аркатов В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – М. : Транспорт, 1990. – 295 с.
2. СП 235.1326000.2015. Железнодорожная автоматика и телемеханика. Правила проектирования.
3. Распоряжение ОАО «РЖД» от 23.10.2014 г. Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов.
4. Типовые материалы проектирования двухниточных планов станций с электрическими рельсовыми цепями 410104-ТМП, 2001.

5. Теег Г. Системы автоматики и телемеханики на железных дорогах мира : учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / пер. с англ. ; под ред. Г. Теega, С. Власенко. – М. : Интекст, 2010. – 496 с.
6. Бушуев С. В., Попов А. Н., Гундырев К. В. Особенности измерений сигналов тональных рельсовых цепей // Вестник транспорта Поволжья. – 2014. – № 5. – С. 94–97.
7. Бушуев С. В., Попов А. Н. Обеспечение сходимости и воспроизводимости измерений сигналов тональных рельсовых цепей // Транспорт Урала. – 2012. – № 3. – С. 38–42.
8. Типовые материалы по проектированию. Устройства контроля состояния свободности станционных участков пути методом счета осей подвижного состава КССП «Урал» УЖДА-12-45 ТМП, 2013.
9. Типовые материалы по проектированию. Устройства контроля свободности путевых участков методом счета осей с использованием аппаратуры ЭССО в системах железнодорожной автоматики и телемеханики 421413-01-ТМП, 2010.
10. Тильк И. Г. Новые устройства автоматики и телемеханики железнодорожного транспорта. – Екатеринбург : УрГУПС, 2010. – 168 с.
11. Щиголев С. А. Путевые датчики для устройств железнодорожной автоматики / С. А. Щиголев, А. В. Кондакова, Д. Е. Соболев // Автоматика, связь, информатика. – 2013. – № 11. – С. 23–24.
12. Щиголев С. А. Микропроцессорная полуавтоматическая блокировка. – Екатеринбург : Быстрая типография, 2016. – 144 с.
13. Rosenberger, M. Перспективы датчиков колес и систем счета осей. Ч. I. Датчики колес // Железные дороги мира. – 2012. – № 6. – С. 51–57.
14. Рачек С. В. Экономическое обоснование технических решений : метод. рекомендации / С. В. Рачек и [др.]. – Екатеринбург : УрГУПС, 2018. – 79 с.
15. Воронин В. А. Техническое обслуживание тональных рельсовых цепей : учеб. пособие. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. – 93 с.
16. Распоряжение ОАО «РЖД» от 30.12.2015 г. № 3168р «Об утверждении инструкции по техническому обслуживанию и ремонту устройств и систем сигнализации, централизации и блокировки».
17. Распоряжение ОАО «РЖД» от 17.07.2014 г. № 1678р «Об утверждении норм времени на техническое обслуживание устройств автоматики и телемеханики».
18. Распоряжение ОАО «РЖД» от 29.12.2015 г. № 3114р «О внесении изменений в нормы времени на техническое обслуживание устройств автоматики и телемеханики».

Sergey V. Bushuev

Anton N. Popov

Maria L. Popova

«Automation, Remote Control and Communication on Railway Transport» department
Ural State University of Railway Transport

Evaluation of the economic efficiency of track occupation monitoring means

The article provides an overview of the means used to monitor the state of a track section occupation along a network of domestic and foreign railways. It is noted that the main means of monitoring of track sections occupation along the network of Russian railways are track circuits that detect the fact of a break or removal of the rail, i. e.

performing integrity monitoring mode. The article also notes that axle counting systems on Russian railways are of limited use, which is explained by the lack of the ability to detect the fact of a break or removal of a rail. The problem of ensuring the safety of the transportation process by the rail circuits during the integrity monitoring mode is considered: during the integrity monitoring mode of the rail circuits, the electrical integrity of the rail is monitored, but existing damage on the rolling surface and in the rail body is not detected, which poses a direct threat to traffic safety. Based on the review of the use of axle counting systems on foreign railways as the main means of monitoring the track section occupation state and taking into account the fact that existing means of monitoring the condition of the track section do not reveal highly defective rails, the article proposes the partial replacement of track circuits to axle count sensors at the station facilities of Russian Railways.

The economic efficiency was estimated based on a comparison of the required capital investments and operating costs for servicing the compared devices, and the dependences of the change in capital investments on the parameters of the stations' track development were revealed.

capital investments; operating expenses; tonal track circuits; axle counting systems; the complexity of the service; highly defective rails.

References

1. Arkatov V. S., Kravtsov Yu. A., Stepenskiy B. M. (1990) Track circuits. Operation analysis and maintenance [Relsovye tsepi Analiz raboty i tekhnicheskoe obslu-zhivanie]. Moscow, Transport. – Pp. 95.
2. Code of Practice 235. 1326000.2015 Railway automation and telemechanics. Design rules [Zeleznodorozhnaya avtomatika i telemekhanika Pravila proektirovaniya].
3. Directive of JSC «Russian Railways» of 23.10.2014. Rails defects. Classification, catalogue and parameters of cropped and defective rails [Rasporyazhenie OAO «RZHD» ot 23.10.2014 g. Defekty relsov Klassifikatsiya katalog i parametry defektnyh i ostrodefektnyh relsov].
4. The standard design materials of stations double plans with electrical track circuits, 2001 [Tipovye materialy proektirovaniya dvuhnitochnyh planov stantsij s ehlektricheskimi relsovyymi tsepyami 410104]. – TMP, 2001.
5. Teeg G. (2010) Automation and telemechanics systems on the world's railways: a textbook for railway transport universities [Sistemy avtomatiki i telemekhaniki na zheleznyh dorogah mira], translated from English; ed. G. Teeg, S. Vlasenko. Mos-cow, Intekst. – 496 p.
6. Bushuev S. V., Popov A. N., Gundyrev K. V. (2014) Gyndyrev Features of measuring the tone of the track circuit [Osobennosti izmerenij signalov tonalnyh relsovyh tsepej], Transport Bulletin of the Volga region [Vestnik transporta Povolzhya]. – No 5. – Pp. 94–97.
7. Bushuev S. V., Popov A. N. (2012) Ensuring the convergence and reproducibility of measurements of the signals of the tone track circuits [Obespechenie skhodimosti i vosproizvodimosti izmerenij signalov tonalnyh relsovyh tsepej], Transport of the Urals [Transport, Urala]. – No 3. – Pp. 38–42.

8. Devices of monitoring station track vacancy by method of rolling stock «Ural» axle counting [Ustrojstva kontrolya sostoyaniya svobodnosti stantsionnyh uchastkov puti metodom scheta osey podvizhnogo sostava].
9. Devices of monitoring track vacancy by axle counting method with use of electronic axle counting system equipment in systems of railway automation and telemechanics. [Ustrojstva kontrolya svobodnosti putevyh uchastkov metodom scheta osey s ispolzovaniem apparatury EHSSO v sistemah zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki] Albums 1–2.
10. Tilk I. G. (2010) New devices of railway transport automation and telemechanics. – Ekaterinburg [Novye ustrojstva avtomatiki i telemekhaniki zheleznodorozhnogo transporta]. – Ekaterinburg, UrGUPS. – 168 p.
11. Tschigolev S. A., Kondakova A. V., Sobol D. E. (2013) Track sensors for railway automation devices [Putevye datchiki dlya ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki], Automation, connection, information technologies [Avtomatika svyaz informatika]. – No 11. – Pp. 23–24.
12. Tschigolev S. A. (2016) Microprocessor semi-automatic blocking [Mikroprotsessornaya poluavtomaticheskaya blokirovka]. – Ekaterinburg, Bystraya tipografiya. – 144 p.
13. Rosenberger M. (2012) Perspectives of wheel- and axle counting system sensors. Part I: Wheel sensors [Perspektivy datchikov koles i sistem scheta osey CH I Datchiki koles], Railways of the world [ZHeleznnye dorogi mira]. – No 6. – Pp. 51–57.
14. Rachek S. V. (2018) Financial justification of engineering solutions: method and recommendations [Ekonomicheskoe obosnovanie tekhnicheskikh reshenij metod rekomendatsii]. – Ekaterinburg, UrGUPS. – 79 p.
15. Voronin V. A. (2007) Maintenance of audio frequency track circuits: study-guide [Tekhnicheskoe obsluzhivanie tonalnyh relsovyh tsepej], study-guide. Moscow, GOU Federal State Educational Institution «Training and Methodology Centre for Railway Transport» [Uchebno metodicheskij tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte]. – 93 p.
16. Directive of JSC «Russian Railways» of 30.12.2015 «On instruction approval of signaling arrangement maintenance and repair» [Rasporyazhenie OAO «RZHD» ot 30.12.2015 g. 3168r «Ob utverzhdenii instruktsii po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu ustrojstv i sistem signalizatsii tsentralizatsii i blokirovki»].
17. Directive of JSC «Russian Railways» of 17.07.2014 «On approval of time standards for maintenance of automation and telemechanics devices» [Rasporyazhenie OAO «RZHD» ot 17.07.2014 g. 1678r «Ob utverzhdenii norm vremeni na tekhnicheskoe obsluzhivanie ustrojstv avtomatiki i telemekhaniki»].
18. Directive of JSC «Russian Railways» of 29.12.2015 «On Amendments to the standard time for maintenance of automation and telemechanics devicts» [Rasporyazhenie OAO «RZHD» ot 29.12.2015 g. 3114r «O vnesenii izmenenij v normy vremeni na tekhnicheskoe obsluzhivanie ustrojstv avtomatiki i telemekhaniki»].

*Статья представлена к публикации членом редколлегии А. Б. Никитиным
Поступила в редакцию 14.01.2019, принята к публикации 18.02.2019*

БУШУЕВ Сергей Валентинович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте», проректор по научной работе Уральского государственного университета путей сообщения;

e-mail: SBushuev@usurt.ru

ПОПОВ Антон Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения;

e-mail: ANPopov@usurt.ru

ПОПОВА Мария Леонидовна – инженер НИЛ «Компьютерные системы автоматизации» Уральского государственного университета путей сообщения;

e-mail: mariyausko@gmail.com

© Бушуев С. В., Попов А. Н., Попова М. Л., 2019

Методы мониторинга в транспортных системах

УДК 004.658:629.7.058

А. И. Зимовец

Кафедра математического и программного обеспечения
Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург

А. Д. Хомоненко, д-р техн. наук

Кафедра «Информационные и вычислительные системы»
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, Санкт-Петербург

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МОДЕЛИ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Решается задача выбора модели системы управления базами данных для системы мониторинга космического пространства. Основным источником данных о событиях, происходящих в околоземном космическом пространстве, в настоящее время являются радиолокационные и оптические информационно-наблюдательные средства. Одни и те же космические объекты, большую часть которых составляет космический мусор, могут отслеживаться несколькими комплексами за один суточный сеанс наблюдения. Информация обо всех космических объектах хранится в единой базе данных большого размера. При работе с большими данными в системе мониторинга космического пространства важным является обоснованный выбор модели системы управления базами данных с учетом оперативности доступа к хранимым данным. Представлен сравнительный анализ производительности реляционных (PostgreSQL) и нереляционных (MongoDB) систем управления базами данных по времени выполнения операций вставки, обновления и поиска записей. Сделан вывод о целесообразности выбора нереляционной (NoSQL) модели для хранения данных о космических объектах в системе мониторинга космического пространства. Предложена агрегатная информационная модель для хранения данных о космических объектах в системе мониторинга космического пространства с помощью нереляционной системы управления базами данных.

агрегатная информационная модель, база данных, космическое пространство, космический мониторинг, космический мусор, система управления базами данных, NoSQL, PostgreSQL, MongoDB, Oracle.

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-2-221-232

Введение

Современный путь освоения космического пространства приводит к растущим информационным потребностям. В настоящее время имеет место рост числа запусков ракет космического назначения, увеличение времени жизни искусственных спутников Земли и их количества, повышается число элементов космического мусора на орбите Земли, кроме того, существуют естественные околоземные космические объекты (астероиды и метеориты). Отмеченные факторы указывают на необходимость совершенствования структуры хранения и обработки данных в системе мониторинга космического пространства (СМКП) [1–3].

Основным источником данных о событиях, происходящих в околоземном космическом пространстве (ОКП), в настоящее время являются радиолокационные и оптические информационно-наблюдательные средства. Ежедневно станциями наблюдения обрабатывается несколько десятков тысяч характеристик космических объектов (КО). Информация о каждом космическом объекте представляет собой двухстрочный набор элементов TLE (от англ. Two-Line Element set), содержащий в себе набор кеплеровских элементов орбит для каждого космического объекта, а также данные о времени и месте пуска, типе объекта, массе и назначении.

В настоящее время в околоземном космическом пространстве функционируют около полутора тысяч искусственных спутников Земли. В это число входят спутники связи, наблюдения, технологической демонстрации и навигации. Всего на орбите Земли находится более 4 тысяч спутников, а общее число космических объектов, включая космический мусор, достигает 20 тысяч элементов [3]. Это отделяемые ступени ракет-носителей, разгонные блоки и различные мелкие операционные элементы, отделяющиеся от ракетных комплексов в процессе запуска и полета. Наземные средства космического наблюдения могут обнаруживать элементы от 5 мм, а объекты менее 10 см могут наблюдаться только на низких орбитах (до 2000 км).

Бурно развивающаяся космическая деятельность влечет за собой необходимость хранить колоссальные объемы информации о космических объектах. Зачем хранить информацию о космическом мусоре? Кроме очевидной необходимости хранения информации о функционирующих космических аппаратах (КА) различного назначения и сложности, о космических аппаратах, прекративших свое активное существование и оставшихся на орбите, важно иметь информацию о неуправляемых космических объектах. Высокоскоростное движение объектов космического мусора в ОКП создает опасность столкновения с функционирующими космическими аппаратами, что может стать причиной их досрочного вывода из строя. С течением времени может снижаться быстродействие системы хранения информации по причине большого количества хронологических данных, необходимых для прогнозирования обстановки.

Эти факторы показывают необходимость организации хранения больших массивов данных с учетом требований по обеспечению оперативного доступа к ним для организации планирования запусков КА и обеспечения национальной безопасности. Программный комплекс хранения и интеллектуальной обработки информации о космических объектах должен обладать следующими функциями [1]:

- мониторинг в режиме реального времени (или в режиме, близком к реальному времени);
- прогнозирование положения космических объектов;
- выдача данных о положении объектов на заданном интервале времени;
- выдача атрибутивных данных об объектах;
- перевод координат положения объекта в принятые в России системы координат и отсчета;
- выявление пересечения орбит КО и оценка риска их столкновения.

В настоящее время не решена задача устранения избыточности информации, связанная с особенностями расположения отдельных средств мониторинга космического пространства (например, для оптических средств – близость к экваториальной области, высокогорная местность): одни и те же космические объекты могут отслеживаться несколькими комплексами за один суточный сеанс наблюдения.

1. Сравнение характеристик доступа к реляционным и нереляционным базам данных

Большинство современных программно-аппаратных комплексов используют реляционную модель хранения данных на основе структурированного языка запросов SQL. Основными свойствами реляционных систем управления базами данных (СУБД) являются наличие средств гибкого доступа к данным в области постоянной памяти, обеспечение параллельной работы с данными нескольких пользователей и общность подходов с точки зрения разработчиков. Несмотря на наличие четкого математического обоснования и высокой стандартизации, реляционная модель имеет свои недостатки: ограниченность и предопределенность набора возможных типов данных атрибутов, низкая оперативность доступа к большим объемам данных [4, 5].

Для решения этих проблем стали использовать ряд подходов, направленных на реализацию хранилищ баз данных, имеющих существенные отличия от моделей, используемых в традиционных реляционных СУБД – NoSQL [6]. В современных условиях развития информационного пространства технология нереляционных баз данных NoSQL имеет преимущества с точки зрения гибкости и оперативности доступа к данным.

Вопрос выбора лучшей модели СУБД для работы с большими объемами данных является важным при решении задач разработки баз данных. Причинами выбора базы данных NoSQL являются производительность работы программиста и эффективность доступа к данным. В разных ситуациях эти условия могут усиливать друг друга или противоречить друг другу. Их трудно обеспечить на ранних стадиях проекта, поскольку проблему выбора модели данных трудно абстрагировать так, чтобы со временем ее можно было заменить другой. Путем прогнозной оценки производительности баз данных важно выявить проблемные места. Это позволяет получить общее представление о целесообразности выбора наилучшей модели данных СУБД.

Для сравнения рассмотрим время работы СУБД PostgreSQL и MongoDB с форматом данных JSON (JavaScript Object Notation – текстовый формат обмена данными, наиболее удобный для работы с TLE), приведенное в статье [7]. Система PostgreSQL является свободным программным обеспечением, стремительно набирает популярность, в том числе в корпоративном сегменте, а MongoDB отличается от большого числа NoSQL решений хорошей проработанностью и поддержкой. На рис. 1–3 показано сравнение времени выполнения операций вставки, обновления и поиска записей (в секундах) для представленных систем с различным числом записей (в тыс. записей) [7].

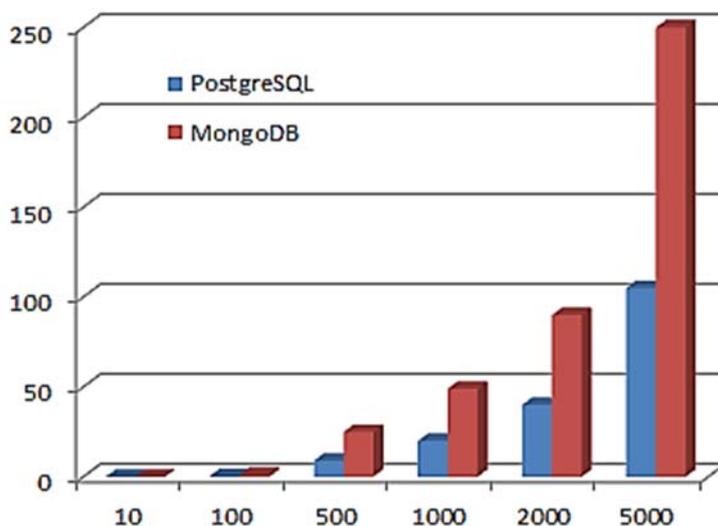


Рис. 1. Длительности вставки записей

Из приведенных зависимостей следует, что СУБД MongoDB опережает PostgreSQL для операций обновления и поиска неиндексированных данных. Однако PostgreSQL опережает MongoDB на операциях вставки данных, что опровергает существующее мнение о преимуществе MongoDB в задачах логирования информации. Следует учитывать, что денормализация

данных как способ превентивного присоединения кортежей в MongoDB является вполне допустимым решением задачи, что особенно ярко проявляется на больших объемах данных. Таким образом, применение СУБД MongoDB является оправданным для хранения редко изменяющихся и часто читаемых данных. Именно эта ситуация характерна для СМПК.

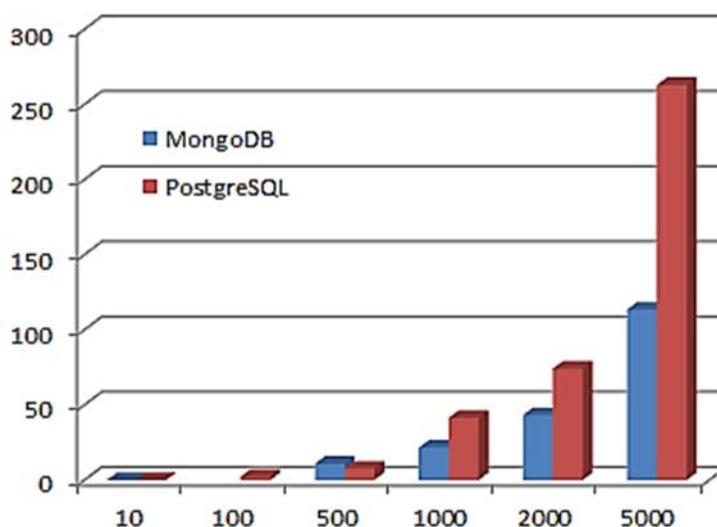


Рис. 2. Длительности обновления данных

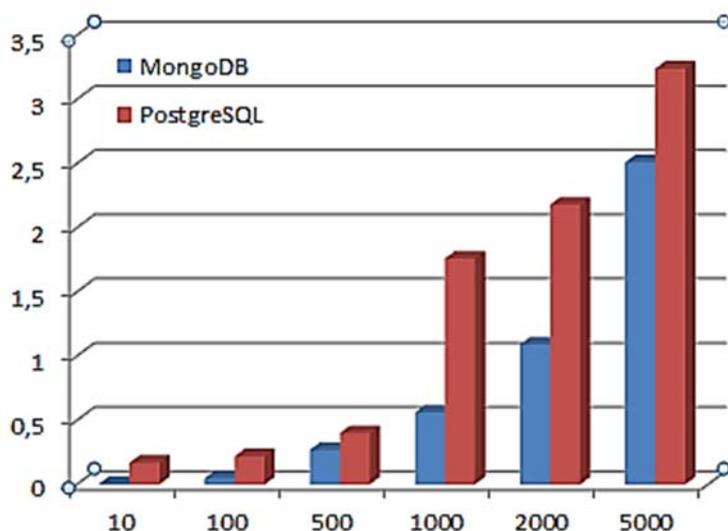


Рис. 3. Длительности неиндексированного поиска

Отметим также работу [8], в которой сравнивается производительность баз данных Oracle и MongoDB путем выполнения сложных запросов к большому набору данных, который доступен в режиме на основе документов и преобразуется в таблицы Oracle. Результаты показывают, что выборка данных (с помощью оператора SELECT) значительно быстрее вы-

полняется в MongoDB, однако некоторые математические запросы, такие как функции агрегирования (sum, count, AVG), заметно быстрее выполняются в Oracle.

Данные по сравнительной оценке характеристик доступа и обработки данных MongoDB и различных СУБД реляционных типов содержатся также в следующих статьях: в [9] проводится сравнение масштабируемых баз данных SQL и NoSQL, в [10] сравниваются характеристики доступа MongoDB и SQL DB, в [11] сравниваются характеристики скорости выполнения запросов в базах данных SQL и MongoDB для больших объемов коммерческих данных.

2. Агрегатная модель хранения данных СМКП

Одним из свойств систем NoSQL является отсутствие схемы данных и возможность хранения неструктурированных данных в виде агрегатов – информационных объектов, отражающих структуру предметной области [8] и представляющих собой поименованную совокупность элементов внутри записи, которую можно рассматривать как одно целое (рис. 4) [12].

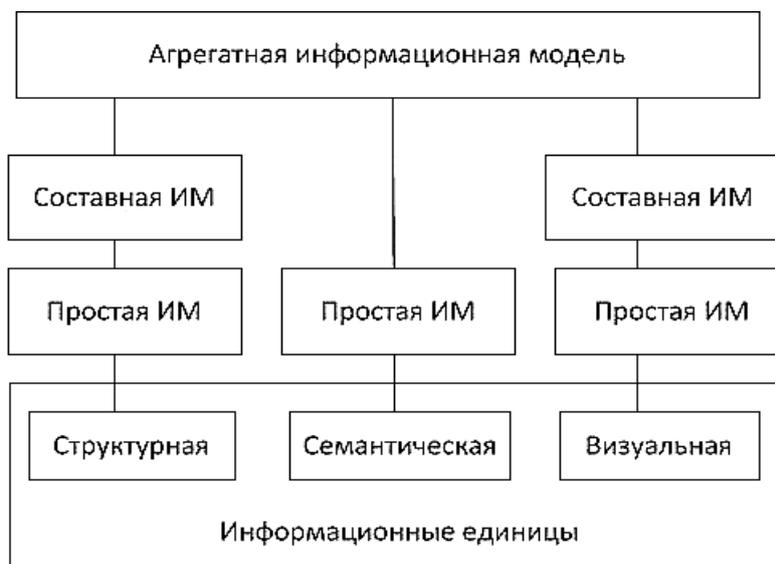


Рис. 4. Структура агрегатной информационной модели

Исходными моделями могут быть структурные, семантические, визуальные и другие информационные единицы. Возможность изменять модели на нижних уровнях позволяет динамически изменять поведение и свойства агрегатной информационной модели. Использование такой модели хранения данных позволит решить проблему избыточности информации в СМКП. В зависимости от условий и целей построения модели агрегирование может производиться по частям, по свойствам, по процессам и по связям.

Применительно к СМКП за основу агрегатной модели данных целесообразно взять формат данных TLE (рис. 5), используемый для определения положения космических объектов в системе NORAD. При этом выборку объектов для агрегатной модели можно осуществить на основании следующих характеристик [2]:

- 1) название объекта;
- 2) номер в каталоге;
- 3) статус активности;
- 4) тип орбиты;
- 5) функциональное назначение;
- 6) страна-владелец.

01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34		
I	S	S		(Z	A	R	Y	A)																									
1																																			
35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	
01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33			
1		2	5	5	4	4	U		9	8	0	6	7	A			0	8	2	6	4	.	5	1	7	8	2	5	2	8					
1	2			3	4			5	6	7			8																						
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
-	.	0	0	0	0	2	1	8	2			0	0	0	0	0	-	0	-	1	1	6	0	6	-	4	0			2	9	2	7		
9				10				11				12	13				14																		
01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33			
2		2	5	5	4	4			5	1	.	6	4	1	6		2	4	7	.	4	6	2	7		0	0	0	6	7	0	3			
1	2			3			4			5																									
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
1	3	0	.	5	3	6	0		3	2	5	.	0	2	8	8		1	5	.	7	2	1	2	5	3	9	1	5	6	3	5	3	7	
6				7				8				9				10																			

Рис. 5. Пример представления данных в формате TLE

Нулевая строка (необязательная) – заголовок с названием космического объекта.

Первая строка:

- 1 (01-01) – номер строки;
- 2 (03-07) – номер спутника в базе NORAD;
- 3 (08-08) – классификация (степень секретности);
- 4 (10-11) – международное обозначение (последние две цифры года запуска);
- 5 (12-14) – международное обозначение (номер запуска в этом году);
- 6 (15-17) – международное обозначение (часть запуска);
- 7 (19-20) – год эпохи (последние две цифры);
- 8 (21-32) – время эпохи (целая часть – номер дня в году, дробная часть – часть дня);

9 (34-43) – первая производная от среднего движения (ускорение), деленная на два [виток/день²];

10 (45-52) – вторая производная от среднего движения, деленная на шесть (подразумевается, что число начинается с десятичного разделителя) [виток/день³];

11 (54-61) – коэффициент торможения В (подразумевается, что число начинается с десятичного разделителя);

12 (63-63) – изначально – типы эфемерид, сейчас – всегда 0;

13 (65-68) – номер (версия) элемента;

14 (69-69) – контрольная сумма по модулю 10.

Вторая строка:

1 (01-01) – номер строки;

2 (03-07) – номер спутника в базе данных NORAD;

3 (09-16) – наклонение в градусах;

4 (18-25) – долгота восходящего узла в градусах;

5 (27-33) – эксцентриситет;

6 (35-42) – аргумент перицентра в градусах;

7 (44-51) – средняя аномалия в градусах;

8 (53-63) – частота обращения (оборотов в день);

9 (64-68) – номер витка на момент эпохи;

10 (69-69) – контрольная сумма по модулю 10.

Результатом выборки данных (см. рис. 5) является запись о космическом объекте в формате TLE, приведенная на рис. 6.

```
ISS (ZARYA)
1 25544U 98067A 08264.51782528 -.00002182 00000-0 -11606-4 0 2927
2 25544 51.6416 247.4627 0006703 130.5360 325.0288 15.72125391563537
```

Рис. 6. Запись в формате TLE

Для выбора необходимых характеристик предлагается объединить в агрегаты элементы с 4-го по 6-й первой строки, как определяющие статус активности космического объекта, и элементы с 3-го по 7-й второй строки, определяющие тип орбиты. Процедура выбора соответствующих характеристик основана на использовании динамических свойств агрегатной модели.

Заключение

Использование агрегатной модели хранения данных совместно с технологией NoSQL целесообразно для повышения оперативности доступа к информации по космическим объектам в СМКП по сравнению с использованием традиционных подходов на основе технологий SQL.

Дальнейшие исследования целесообразно продолжить в направлении практической разработки базы данных в среде СУБД MongoDB и экспериментальной оценки оперативности доступа к информации по космическим объектам в СМКП. В качестве источников литературы по указанным направлениям исследований можно отметить работы [6, 8–11].

Практический интерес представляет решение задачи автоматического выбора параметров сжатия изображений с потерями на основе инвариантных моментов при дистанционном зондировании Земли и определении космических объектов [13].

Кроме того, большой научно-практический интерес, на наш взгляд, представляет решение задачи организации параллельной обработки запросов к базам данных на основе использования технологии NoSQL, а также сравнение с использованием распараллеливания запросов SQL. Здесь можно отметить работы [14, 15]. Важным, по нашему мнению, является оценивание оперативности функционирования бортового комплекса управления космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли и определения космических объектов, а также организации адаптивной обработки запросов к базам данных [16, 17].

Библиографический список

1. Горянский А.С., Пророк В.Я. Анализ планирования сбора некоординатной информации для средств контроля космического пространства // Труды ВКА им. А. Ф. Можайского. – 2015. – № 647. – С. 71–76.
2. Груздев С. С., Журкин И. Г., Орлов П. Ю., Панкин А. В. Анализ состояния и перспектив по созданию электронного каталога объектов околоземного космического пространства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13. – № 6. – С. 51–59
3. Левкина П. А. Физические и орбитальные характеристики объектов космического мусора по данным оптических наблюдений : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.03.01 : защищена 10.08.2016 : утв. 23.09.2016 // Левкина Полина Александровна. – М., 2016. – 123 с. Библиогр. : с. 115–123. – 006651939.
4. Утепбергенов И. Т., Хомоненко А. Д. Базы данных в информационных системах : учебник. – Алматы : Экономика, 2013. – 540 с.
5. Модели информационных систем : учеб. пособие / В. П. Бубнов, М. Л. Глухарев, А. А. Корниенко, С. А. Краснов, В. В. Рогальчук, А. В. Тырва, В. В. Федянин, А. Д. Хомоненко. – М., 2015. – 188 с.
6. Садаладж П. Дж., Фаулер М. NoSQL: новая методология разработки нереляционных баз данных / пер. с англ. – М. : И. Д. Вильямс, 2013. – 192 с.
7. Новиков Б. А., Левин М. Ю. Сравнительный анализ производительности SQL и NoSQL СУБД // Компьютерные инструменты в образовании. – 2017. – № 4. – С. 48–63.
8. Faraj A., Rashid B., Shareef T. Comparative Study of Relational and Nonrelations Database Performances Using Oracle and Mongoddb Systems. International Journal of Computer Engineering and Technology (IJCET), Volume 5, Issue 11, November 2014. – Pp. 11–22.

9. Cattell R. Scalable SQL and NoSQL data stores // ACM SIGMOD Record, Vol. 39 Is. 4, December 2010. N. Y. : ACM New York. – Pp. 12–27.
10. Parker Z. et al. Comparing NoSQL MongoDB to an SQL DB, Proceedings of the 51st ACM Southeast. Conference. N. Y. : ACM New York, 2013. – Pp. 238–243.
11. Seyyed Hamid Aboutorabi ; Mehdi Rezapour ; Milad Moradi , Nasser Ghadiri. Performance evaluation of SQL and MongoDB databases for big e-commerce data. CSSE 2015 – 20th International Symposium on Computer Science and Software Engineering. Pp. 1–7.
12. Булгаков С. В. Агрегирование информационных моделей // Перспективы науки и образования. – 2014. – № 3 (9). – С. 9–13.
13. Старобинец Д. Ю., Хомоненко А. Д., Гаврилова Н. А. Автоматический выбор параметров сжатия изображений с потерями на основе инвариантных моментов при дистанционном зондировании Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14. – № 5. – С. 26–36.
14. Smirnov K., Chernishev G. Empirical study of parallel SQL query execution // Труды института системного программирования РАН. – 2011. – Т. 21. – С. 245–262.
15. Молодкин И. А., Свистунов С. Г. Сравнительный анализ алгоритмов распределения работ в мультипроцессорных системах // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2018. – № 2. – С. 41–45.
16. Хомоненко А. Д., Старобинец Д. Ю. Лохвицкий В. А. Модель оценки оперативности функционирования бортового комплекса управления космическими аппаратами дистанционного зондирования земли // Труды СПИИРАН. – 2016. – № 3 (46). – С. 49–64.
17. Deshpande A., Ives Z., Raman V. 2007. Adaptive query processing. Foud. Trends database 1, 1 (January 2007). – Pp. 1–140.

Alena I. Zimovets

«Mathematical and software» department Military Space Academy
them. A. F. Mozhaisky

Anatoly D. Khomonenko

«Information and Computing Systems» department
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

The rationale for choosing a data storage model for a space monitoring system

The problem of choosing a model of a database management system for a space monitoring system is being solved. The main source of data on events occurring in near-Earth outer space are currently radar and optical information-observational means. The same space objects, most of which are space debris, can be tracked by several complexes in one daily observation session. Information about all space objects is stored in a single large database. When working with big data in the space monitoring system, it is important to make a reasonable choice of a model of a database management system taking into account the speed of access to stored data. A comparative analysis of the performance of relational (PostgreSQL) and non-relational (MongoDB) database management systems by the time of performing the operations of inserting, updating and searching records is presented. It is concluded that it is advisable to choose a non-relational (NoSQL) model for storing data on space objects in the space monitoring

system. An aggregate information model is proposed for storing data on space objects in a space monitoring system using a non-relational database management system.

aggregate information model, database, outer space, space monitoring, space debris, database management system, NoSQL, PostgreSQL, MongoDB, Oracle.

References

1. Goryansky A. S., Prorok V. Y. (2015). Analysis of planning for the collection of non-coordinate information for space control [Analiz planirovaniya sbora nekoordinatnoi informacii dlya sredstv kontrolya kosmicheskogo prostranstva]. Proceedings of the military space Academy A. F. Mozhaisky [Trudi VKA im. A. F. Mojaiskogo], issue 647. – Pp. 71–76.
2. Gruzdev S. S., Zhurkin I. G., Orlov P. Y., Pankin A. V. (2016). Analysis of the state and prospects for the creation of an electronic catalogue of near-Earth space objects [Analiz sostoyaniya i perspektiv po sozdaniyu elektronnoho kataloga obektov okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva]. Modern problems of remote sensing of the Earth from space [Sovremennye problemi distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa], vol. 13, issue 6. – Pp. 51–59.
3. Levkina P. A. (2016). Physical and orbital characteristics of space debris objects according to optical observations: diss. cand. ph.-m. science, Moscow [Fizicheskie i orbitalnie harakteristiki obektov kosmicheskogo musora po dannim opticheskikh nablyudenii dis. kand. fiz.-mat. nauk, Moskva]. – 123 p.
4. Utebergenov I. T., Khomonenko A. D. (2013). Databases in information systems. Textbook [Bazi danih v informacionnih sistemah. Uchebnik]. Almaty : Economica [Almati : Ekonomika]. – 540 p.
5. Models of information systems [Modeli informacionnih sistem]. (2015). Bubnov V. P., Glukharev M. L., Kornienko A. A., Krasnov S. A., Rogalchuk V. V., Tyrva A. V., Fedyanin V. V., Khomonenko A. D. Study Guide. Moscow. – 188 p.
6. Pramod J. Sadalage, Martin Fowler. (2013). NoSQL Distilled: A Brief Guide to the Emerging World of Polyglot Persistence. Addison-Wesley Professional. – 192 p.
7. Novikov B. A., Levin M. Y. (2017). Comparative Analysis of the Performance of SQL and NoSQL DBMS. Computer Tools in Education, issue. 4. – Pp. 48–63.
8. Faraj A., Rashid B., Shareef T. (2014). Comparative Study of Relational and Nonrelations Database Performances Using Oracle and MongoDB Systems. International Journal of Computer Engineering and Technology (IJCET), Volume 5, Issue 11, November 2014. – Pp. 11–22.
9. Cattell R. (2010). Scalable SQL and NoSQL data stores // ACM SIGMOD Record, Vol. 39 Is. 4, December 2010. N. Y. : ACM New York. – Pp. 12–27.
10. Parker Z. et al. Comparing NoSQL MongoDB to an SQL DB, Proceedings of the 51st ACM Southeast. Conference. N. Y. : ACM New York, 2013. – Pp. 238–243.
11. Seyyed Hamid Aboutorabi, Mehdi Rezapour, Milad Moradi, Nasser Ghadiri. (2015). Performance evaluation of SQL and MongoDB databases for big e-commerce data. CSSE 2015 – 20th International Symposium on Computer Science and Software Engineering. – Pp. 1–7.
12. Bulgakov S. V. (2014). Aggregation information models [Agregirovanie informacionnih modelei]. Perspectives of Science and Education [Perspektivi Nauki i Obrazovaniya], issue 3(9). – Pp. 9–13.

13. Starobinets D. Yu., Khomonenko A. D., Gavrilova N. A. (2017). Automatic selection of image compression parameters with losses based on invariant moments for Earth remote sensing purposes [Avtomaticeskii vibor parametrov sjatiya izobrajenii s poteryami na osnove invariantnih momentov pri distancionnom zondirovanii Zemli]. Modern problems of remote sensing of the Earth from space [Sovremennie problemi distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa], vol. 14. issue 5. – Pp. 26–36.
14. Smirnov K., Chernishev G. (2011). Empirical study of parallel SQL query execution. Proceedings of the Institute for System Programming RAS [Trudi instituta sistemnogo programmirovaniya RAN], vol. 21. – Pp. 245–262.
15. Molodkin I. A., Svistunov S. G. (2018). Comparative Analysis of Scheduling Algorithms in Multiprocessor Systems [Sravnitel'nyi analiz algoritmov raspredeleniya rabot v multiprocessornih sistemah]. Intellectual Technologies on Transport [Intellektualnie tehnologii na transporte], issue 2. – Pp. 41–45.
16. Khomonenko A. D., Starobinets D. Yu., Lokhvitsky V. A. (2016). A model for evaluating the operational efficiency of an onboard complex for controlling remote sensing spacecraft [Model ocenki operativnosti funkcionirovaniya bortovogo kompleksa upravleniya kosmicheskimi apparatami distancionnogo zondirovaniya Zemli]. SPIIRAS Proceedings [Trudi SPIIRAN], issue 3 (46). – Pp. 49–64.
17. Deshpande A., Ives Z., Raman V. (2007). Adaptive query processing. Foud. Trends database 1, 1 (January 2007). – Pp. 1–140.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Вал. В. Сапожниковым
Поступила в редакцию 04.11.2018, принята к публикации 17.01.2019*

ЗИМОВЕЦ Алена Игоревна – адъюнкт кафедры «Математического и программного обеспечения» Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского;

e-mail: zim_alenka@rambler.ru

ХОМОНЕНКО Анатолий Дмитриевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные и вычислительные системы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, профессор кафедры «Математического и программного обеспечения» Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского;

e-mail: khomon@mail.ru

© Зимовец А. И., Хомоненко А. Д., 2019

УДК 681.518.5:656.25

А. Б. Никитин, д-р техн. наук
В. А. Шатохин, канд. техн. наук
А. А. Порошин

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, Санкт-Петербург

ДИАГНОСТИКА И МОНИТОРИНГ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ В УСТРОЙСТВАХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Статья посвящена диагностике и мониторингу аккумуляторных батарей, применяемых в устройствах электропитания железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). Проведен анализ существующих методик оценки остаточной емкости и времени резервирования от АКБ. Выявлены расхождения опытных результатов с результатами, прогнозируемыми по известным алгоритмам расчета. Объяснена причина погрешности вычисляемых параметров и предложена более точная методика оценки времени резервирования и остаточной емкости АКБ при интенсивном разряде. Предложены пути внедрения уточненной методики в системы технической диагностики и мониторинга ЖАТ, позволяющие уменьшить погрешность вычисления диагностируемых параметров. Для повышения надежности электропитания ЖАТ и улучшения показателей безопасности, бесперебойности и эффективности перевозочного процесса предложено решение проблемы оценки старения АКБ с целью осуществления их своевременной замены.

системы технической диагностики и мониторинга, системы бесперебойного питания, интенсивный разряд батареи, «эффект сжимающейся батареи», реальная емкость аккумуляторной батареи, метод определения времени резервирования.

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-2-233-243

Введение

В настоящее время на железных дорогах России осуществляется модернизация систем управления движением поездов. Устаревшее оборудование на электромагнитных реле поэтапно заменяется современным оборудованием на базе микроэлектроники и микропроцессорной техники, которая позволяет реализовать большее количество функций, в том числе функции систем технического диагностирования и мониторинга (СТДМ) [1–6]. Вместе с тем микроэлектронная и микропроцессорная техника по сравнению с релейной оказалась более чувствительной к электромагнитным помехам и более требовательной к качеству электропитания. Для обеспечения электропитания требуемого качества широко применяются системы бесперебойного питания (СБП). Неотъемлемой частью СБП яв-

ляются аккумуляторные батареи (АКБ), которые выполняют функцию резервного источника электроэнергии при прерывании внешнего электроснабжения переменным током до его восстановления. При наличии резервной автономной электростанции АКБ, как правило, рассчитывается на время ее запуска и включения в работу, которое составляет несколько минут. В течение этого времени происходит интенсивный разряд АКБ. В связи с этим в процессе эксплуатации АКБ особую актуальность приобретают две задачи. Первая – обеспечение оперативной и достоверной оценки времени резервирования от АКБ при интенсивном разряде. Вторая – выявление предотказного состояния АКБ для своевременной замены. При применении в ЖАТ необходимо учитывать динамику изменения нагрузки, характеризующуюся бросками потребляемой мощности при кратковременных переводах стрелок стрелочными электроприводами, а также при занятии и освобождении участков пути подвижным составом.

1. Проблема определения реальной емкости и времени резервирования АКБ

Глубокая непрерывная диагностика на некотором продолжительном временном интервале эксплуатации позволяет отследить изменения параметров АКБ [7]. Однако существует ряд трудностей, связанных с «эффектом сжимающейся батареи», что особо заметно при высокой интенсивности разряда. Допустим, что АКБ емкостью 100 А·ч способна отдавать ток разряда 10 А в течение 10 часов. Логично предположить, что эта же АКБ способна выдавать ток разряда 50 А в течение 2 часов, однако на практике это время будет около 1,2 часа. Чем больше ток разряда, тем сильнее уменьшается это время от ожидаемого. Данное явление впервые было математически описано немецким ученым Вильгельмом Пейкертом [8]. Он эмпирически установил, что отношение между разрядным током I и временем разряда аккумулятора T представляет собой константное отношение и может быть описано формулой:

$$C_p = I^n \cdot T, \quad (1)$$

где C_p – емкость Пейкерта (константное отношение для данного аккумулятора); n – экспонента Пейкерта; I – ток разряда; T – время разряда, ч.

Экспонента Пейкерта всегда больше единицы. Чем больше n , тем меньше способность аккумулятора отдавать полную емкость при повышенной нагрузке. Она рассчитывается на основании измерения времени разряда (T_1 и T_2) для двух разных токов (I_1 и I_2) по формуле:

$$n = \frac{\lg\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}{\lg\left(\frac{I_1}{I_2}\right)}. \quad (2)$$

Зная значение C_p и n , мы можем по формуле (1) вычислить реальное время резервирования при определенном значении тока:

$$T = \frac{C_p}{I^n}. \quad (3)$$

Казалось бы, что проблема решена и теперь можно найти реальную емкость АКБ и время резервирования при любой интенсивности разряда. При использовании формулы (3) созданы удобные онлайн-калькуляторы расчета времени работы АКБ при разных токах разряда. Однако вычисленные с использованием формулы (3) значения времени резервирования при токах разряда, близких к предельным, имеют слишком большие расхождения с реальными значениями на практике (см. таблицу 1).

Таблица 1. Расчет параметров АКБ

$T(h) =$	$T(\text{min})$	$I(\text{A})$	$\lg(T_2/T_1)$	$\lg(I_1/I_2)$	n	C_p	$T_1(h) =$	$T_1(\text{min})$	σ	n_1
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,17	10,00	339,40	-0,78	-0,42			0,31	18,89	88,48	1,31
0,25	15,00	297,30	-0,60	-0,36			0,37	22,14	47,59	1,27
0,33	20,00	266,60	-0,48	-0,31			0,42	25,23	26,15	1,24
0,42	25,00	234,40	-0,38	-0,26			0,49	29,44	17,78	1,23
0,50	30,00	208,50	-0,30	-0,21			0,56	33,88	12,95	1,22
0,58	35,00	188,70	-0,23	-0,16			0,64	38,19	9,12	1,22
0,67	40,00	172,60	-0,18	-0,12			0,71	42,51	6,27	1,21
0,75	45,00	159,10	-0,12	-0,09			0,78	46,87	4,16	1,21
0,83	50,00	147,80	-0,08	-0,06			0,85	51,20	2,40	1,20
1,00	60,00	129,50	0,00	0,00			1,00	60,00	0,00	1,20
1,50	90,00	95,60	0,18	0,13			1,44	86,36	4,05	1,19
2,00	120,00	76,00	0,30	0,23			1,90	113,72	5,23	1,19
2,50	150,00	63,30	0,40	0,31			2,36	141,61	5,59	1,19
3,00	180,00	54,30	0,48	0,38			2,84	170,22	5,43	1,19
4,00	240,00	42,50	0,60	0,48			3,81	228,39	4,84	1,19
5,00	300,00	35,00	0,70	0,57			4,80	288,30	3,90	1,19
6,00	360,00	29,80	0,78	0,64			5,83	349,66	2,87	1,19
7,00	420,00	26,10	0,85	0,70			6,83	409,94	2,39	1,19
8,00	480,00	23,20	0,90	0,75			7,87	472,16	1,63	1,19
9,00	540,00	20,80	0,95	0,79			8,97	538,26	0,32	1,20
10,00	600,00	19,00	1,00	0,83	1,20	342,11	10,00	600,00	0,00	1,20
12,00	720,00	16,20	1,08	0,90			12,11	726,47	0,90	1,20
24,00	1440,00	8,80	1,38	1,17			25,18	1510,74	4,91	1,22

Проведем вычислительный эксперимент. В качестве опытных данных используем таблицы разряда АКБ [9], предоставленные производителями, и занесем данные в таблицу 1 (столбцы 1–3). Для аккумулятора 12V 190 А·ч средствами Microsoft Excel определим значение экспоненты Пейкерта при разных интенсивностях разряда: при полном разряде постоянным током до 1,8 В/элемент, совершаемом за 10, 20, ... 720, 1440 минут.

В таблице 1 приведены опытные данные по току и времени разряда АКБ, взятые с официального сайта производителя аккумуляторов [9]. Исследуемая АКБ имеет показатель времени $R = 10$ (установлен заводом-изготовителем). По формуле (2) вычислим значение n (столбец 6), затем C_p (из формулы (3)).

Мы получили значение экспоненты Пейкерта $n = 1,2$, при этом $C_p = 342,11$ А·ч. Зная эти параметры, можно найти реальное время работы АКБ при различных нагрузках по формуле (6) – столбец 8. Таким образом, мы можем говорить о некотором несоответствии значений времени в действительности – столбец 2 – и значений времени, рассчитанных по формуле (6) – столбец 9. С одной стороны, можно сказать, что при малых значениях тока разряда погрешность невелика, однако при быстром разряде она достигает 88 %! Попробуем разобраться в причине этого явления. Рассчитанная емкость Пейкерта была вычислена для $t = 10$ часов, поскольку $R = 10$ ч.

2. Совершенствование метода определения реальной емкости и времени резервирования АКБ

Выше был описан эффект «сжимающейся батареи», из-за которого и вводится формула (1) с поправочным степенным коэффициентом в виде экспоненты Пейкерта n , однако погрешность времени, как мы увидели, значима. Причина такого несоответствия объясняется тем, что значение n и емкости Пейкерта принимается нами как константа и рассчитывается только для времени $R = 10$ ч. Из таблицы можно заметить, что емкость Пейкерта с увеличением скорости разряда также уменьшится. Это связано с изменением значений экспоненты Пейкерта при различных токах разряда (столбец 11). Именно поэтому большинство страниц в Интернете по расчету реальной емкости АКБ и времени работы при той или иной нагрузке не дают точных результатов.

С этой проблемой авторы не раз сталкивались на практике, особенно при больших токах разряда. Для ЖАТ, отвечающих за безопасность движения поездов, жизнь и здоровье людей, равно как и для другого подобного применения, например для аппаратуры реанимации пациентов в медицинских учреждениях, оборудования управления технологическими процессами на атомных электростанциях и т. п., где при перерыве внешнего

электроснабжения электропитание резервируется от АКБ, показанные выше погрешности недопустимы! Кроме того, в большинство известных авторам приборов по измерению емкости АКБ заложены формулы (1)–(7), где экспонента n принимается как константа, что приводит к показанной выше погрешности. Чтобы снизить погрешность при вычислении реального времени работы от АКБ при больших токах разряда, определим регрессионное уравнение зависимости экспоненты Пейкертта от тока разряда. На рисунке 1 показана кривая изменения значений экспоненты Пейкертта за 3 часа разряда. Можно предположить, что это некоторая степенная функция. Методом наименьших квадратов, который имеет строгое математическое обоснование, найдем степенную регрессионную зависимость экспоненты Пейкертта при разной интенсивности разряда.

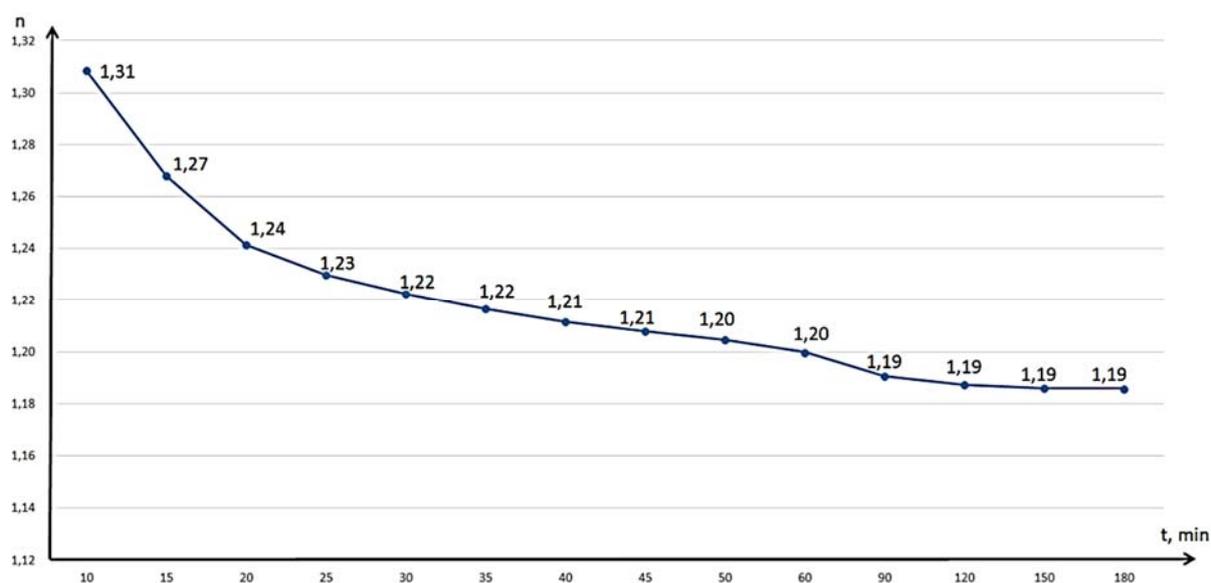


Рис. 1. Значения экспоненты Пейкертта при разной интенсивности разряда

Примем $n = \hat{y}$. Тогда степенная регрессия примет вид $\hat{y} = b_0 I^{b_1}$.

Приведем уравнение к линейному виду и введем новые переменные

$$Y = \ln \hat{y}, X = \ln I, B_0 = \ln b_0.$$

Тогда уравнение регрессии примет вид $Y = B_0 + b_1 X$. Параметры B_0, b_1 уравнения определим по формулам (необходимые расчеты приведены в таблице 2):

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2} = \frac{14,04 - \frac{1}{14} \cdot 70,26 \cdot 2,76}{356,9 - \frac{1}{14} \cdot 4936,21} = 0,042;$$

$$B_0 = \bar{Y} - b_1 \bar{X} = 0,20 - 0,042 \cdot 5,02 = -0,014.$$

Обратный переход к параметру b_0 осуществим по формуле: $b_0 = e^{B_0} = e^{-0,014} = 0,99$.

Уравнение степенной регрессии имеет вид: $n = \hat{y} = b_0 I^{b_1} = 0,99 I^{0,042}$.

Таблица 2. Расчетные данные для оценки степенной регрессии

№ п/п	$x_i (I)$	$y_i (n)$	$X_i = \ln x_i$	$Y_i = \ln y_i$	$X_i Y_i$	X_i^2	\hat{y}
1	2	3	4	5	6	7	8
1	339,40	1,31	5,83	0,27	1,57	33,96	1,26
2	297,30	1,27	5,69	0,24	1,35	32,43	1,25
3	266,60	1,24	5,59	0,22	1,21	31,20	1,25
4	234,40	1,23	5,46	0,21	1,13	29,78	1,24
5	208,50	1,22	5,34	0,20	1,07	28,51	1,23
6	188,70	1,22	5,24	0,20	1,03	27,46	1,23
7	172,60	1,21	5,15	0,19	0,99	26,53	1,22
8	159,10	1,21	5,07	0,19	0,96	25,70	1,22
9	147,80	1,20	5,00	0,19	0,93	24,96	1,22
10	129,50	1,20	4,86	0,18	0,89	23,66	1,21
11	95,60	1,19	4,56	0,17	0,80	20,80	1,19
12	76,00	1,19	4,33	0,17	0,74	18,76	1,18
13	63,30	1,19	4,15	0,17	0,71	17,20	1,17
14	54,30	1,19	3,99	0,17	0,68	15,96	1,17
Sum	2433,10	17,06	70,26	2,76	14,04	356,90	–
Mean	173,79	1,22	5,02	0,20	–	–	–

Подставляя в полученное уравнение регрессии значения, можно определить теоретические значения и построить линию регрессии на корреляционном поле (рис. 2).

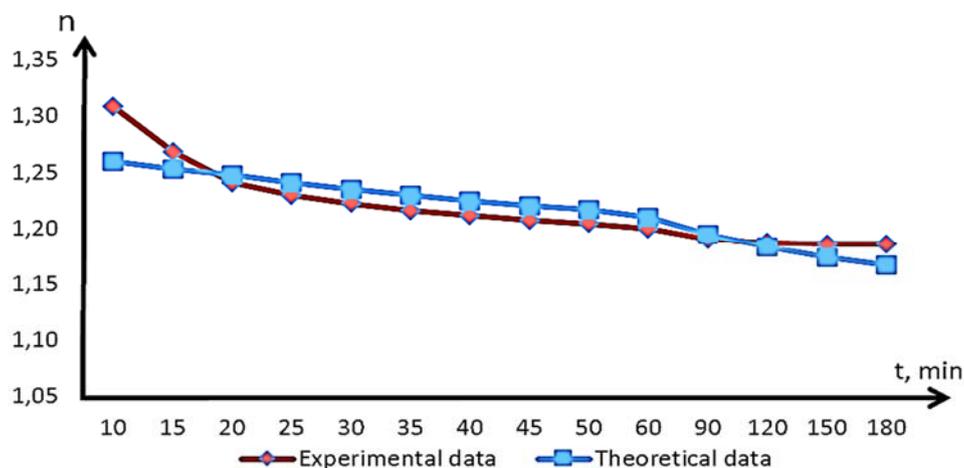


Рис. 2. Реальные и спрогнозированные значения экспоненты Пейкерта n

При подстановке в уравнение (1) вместо константного значения $n = 1,2$ полученное уравнение регрессии $n = 0,99I^{0,042}$, видим положительную тенденцию по снижению погрешности измерения спрогнозированного времени резервирования по отношению к реальным опытным данным. Основываясь на знании закона изменения значений n и C_p , можно достаточно точно рассчитывать реальное время работы АКБ при определенной нагрузке.

Как показывает практика, значения экспоненты Пейкертта n сильно различаются у разных производителей и у разных типов АКБ (от 1,3 при глубоком разряде свинцово-кислотных АКБ до 1,1 для AGM¹), поэтому только «калибровка» значений n по описанному выше алгоритму может повысить точность значений.

Таблица 3. Оценка погрешности измерений, полученных по уточненной формуле

$T_p(h)$	$T_p(\text{min})$	$T_{p1}(h)$	$T_{p1}(\text{min})$	σ	$n1$	T_{p2}	$T_{p2}(\text{min})$	$\sigma1$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,17	10,02	0,31	18,89	88,48	1,31	0,22	13,28	32,50
0,25	15,00	0,37	22,14	47,59	1,27	0,27	16,33	8,84
0,33	20,00	0,42	25,23	26,15	1,24	0,32	19,32	3,38
0,42	25,00	0,49	29,44	17,78	1,23	0,39	23,54	5,85
0,50	30,00	0,56	33,88	12,95	1,22	0,47	28,12	6,27
0,58	35,00	0,64	38,19	9,12	1,22	0,54	32,68	6,64
0,67	40,00	0,71	42,51	6,27	1,21	0,62	37,34	6,65
0,75	45,00	0,78	46,87	4,16	1,21	0,70	42,14	6,35
0,83	50,00	0,85	51,20	2,40	1,20	0,78	46,98	6,03
1,00	60,00	1,00	60,00	0,00	1,20	0,95	57,02	4,96
1,50	90,00	1,44	86,36	4,05	1,19	1,47	88,30	1,89
2,00	120,00	1,90	113,72	5,23	1,19	2,03	122,06	1,72
2,50	150,00	2,36	141,61	5,59	1,19	2,62	157,35	4,90
3,00	180,00	2,84	170,22	5,43	1,19	3,24	194,16	7,87

При расчете необходимой емкости C для резервирования электропитания инженер-проектировщик пользуется простыми расчетами:

$$C = \frac{S}{U} \cdot t, \quad (4)$$

где S – сумма мощностей бесперебойных нагрузок, ВА; t – время резервирования от АКБ, ч; U – напряжение батареи, В.

¹ Absorbent Glass Mat – технология изготовления свинцово-кислотных аккумуляторов, созданная инженерами американской компании Gates Rubber Company в начале 1970-х годов. Отличие батарей AGM от классических в том, что в них содержится не жидкий, а абсорбированный электролит, что дает ряд изменений в свойствах аккумулятора.

Заключение

Интеграция описанных уравнений и методов расчета в СТДМ, а также в калькуляторы расчета характеристик АКБ позволит получить максимально точные данные о реальном времени работы АКБ при том или ином значении тока разряда. Знание закономерности зависимости емкости аккумулятора от тока разряда позволит точнее планировать необходимую емкость и тип аккумуляторов в СБП. С использованием описанного выше алгоритма по нахождению регрессионной функции экспоненты Пейкерта можно значительно повысить достоверность прогнозируемых СТДМ данных, касающихся АКБ. Оценивая по формуле (1) реальную емкость Пейкерта на работающих АКБ, можно сравнивать ее значение с номинальной емкостью Пейкерта для новых АКБ, тем самым отслеживать процесс старения АКБ, спрогнозировать время их замены.

Особенно важны точные результаты для новых высокотехнологичных систем ERTMS [10–15], в которых поезда следуют без линейной путевой сигнализации с отслеживанием их местоположения из радиоблокцентров. Прерывание электроснабжения при ложном прогнозировании аккумуляторного резерва вызовет потерю кодов GPS-позиции, что может привести к опасным последствиям. Для подобных высокотехнологичных систем предъявляются особенно строгие требования к качеству и бесперебойности электропитания аппаратуры ЖАТ. Это связано с тем, что нарушение электропитания подобных систем может повлечь за собой сбой передачи ответственной информации о скорости и положении поезда на участке, что может критически отразиться на безопасности движения поездов. Предложенная в данной статье методика повышения точности диагностической информации позволит повысить надежность электроснабжения потребителей с ответственными технологическими процессами. Расширение возможностей для решения задач диагностирования позволит обнаруживать предотказные состояния объектов и своевременно осуществлять восстановление работоспособного состояния, исключая переход в состояние отказа.

Библиографический список

1. Efanov D. V. New Architecture of Monitoring Systems of Train Traffic Control Devices at Wayside Stations // Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018), Kazan, Russia, September 14–17, 2018. – Pp. 276–280. – DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524788.
2. Осадчий Г. В. Определение метода реализации технической диагностики контроллеров в системе АПК-ДК // Транспорт Урала. – 2007. – № 2. – С. 78–82.
3. Лыков А. А., Ефанов Д. В., Власенко С. В. Техническое диагностирование и мониторинг состояния устройств ЖАТ // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 5. – С. 67–72.

4. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : монография. – СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. – 171 с.
5. Ефанов Д. В. Особенности функционирования систем технического диагностирования и мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры // Автоматика на транспорте. – 2018. – Том 4. – № 3. – С. 333–354.
6. Сапожников Вл. В. Эффективность систем технической диагностики и мониторинга состояния устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Вл. В. Сапожников, А. А. Лыков, Д. В. Ефанов, Н. А. Богданов // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 4 (29). – С. 47–49.
7. Nikitin A., Shatokhin V., Poroshin A., Kotenko A. Diagnostics and Monitoring of Railway Automation and Remote Control Power Supply Devices // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017). – 2017. – Pp. 592–597.
8. Шатохин В. А., Порошин А. А. Комплексный подход к контролю устройств электропитания железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика на транспорте. – 2017. – № 2. – С. 192–198.
9. Разрядные таблицы PowerSafeV. – URL : <http://hawker.ru/product/statsionarnye-akkumulyatory/powersafe-v>.
10. Nikitin A., Popov P. Determining the positions of trains using audio-frequency track circuits // SIGNAL+DRAHT. – 2016. – No 14. – Pp. 29–34.
11. Barrow K. British ERTMS testing in full swing // International Railway Journal. – 2014. – No 8. – Pp. 61–66.
12. Domingues J. L. M. Diagnostic levels in railway applications / J. L. M. Domingues // Signal + Draht. – 2004. – No 1/2. – Pp. 31–34.
13. Иванов А. А., Легоньков А. К., Молодцов В. П. Передача данных с устройств оборудования переезда аппаратурой АПК-ДК при отсутствии физической линии и круглосуточного дежурства // Автоматика на транспорте. – 2016. – Том 2. – № 1. – С. 65–80.
14. Yilboga J., Guclu A., Eker Ö. F., Camci F. Failure Prediction on Railway Turnouts Using Time Delay Neural Networks // 2010 IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications, 6–8 September 2010, Taranto, Italy. – Pp. 134–137. – DOI: 10.1109/CIMSA.2010.5611756.
15. Barrow K. «British ERTMS testing in full swing». International Railway Journal. – 2014. – No 8. – Pp. 61–66.

Alexander B. Nikitin

Vitaly A. Shatokhin

Aleksey A. Poroshin

«Automation and Remote Control on Railways» department
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

Diagnosics and monitoring of the battery in the power supply devices of railway automation and remote control

This article is devoted to the study of discharge characteristics at different discharge intensities of batteries, which are used in power supply devices for railway automation and remote control. The authors analyzed the existing methods for estimating the residual capacity and backup time from the battery. The discrepancies between the experimental results and the results calculated by the known calculation algorithms in which the Peukert exponent is taken as a constant. The reason for the error of the calculated parameters was explained and a more accurate method was developed for estimating the backup time and residual capacity of the

battery during an intense discharge. The authors have proposed ways of introducing the updated methodology into the technical diagnostic and monitoring systems of the railway automation and remote control (RARC), which can reduce the calculation error of the diagnosed parameters. The article describes the ways to improve the reliability of power supply of RARC and improve safety performance, continuity and efficiency of the transportation process. The article also proposes a solution to the problem of assessing the aging of batteries with the aim of implementing their timely replacement.

systems of technical diagnostics and monitoring, uninterruptible power supply systems, intensive discharge of the battery, «compressible battery effect», actual battery capacity, method for determining the backup time.

References

1. Efanov D. V. (2018) New Architecture of Monitoring Systems of Train Traffic Control Devices at Wayside Stations, Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018), Kazan, Russia, September 14–17, 2018. – Pp. 276–280. – DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524788.
2. Osadchij G. V. (2007) Determination of the method for implementing the technical diagnostics of controllers in the APK-DK system [Opredelenie metoda realizatsii tekhnicheskoy diagnostiki kontrollerov v sisteme APK-DK], Transport of the Urals [Transport Urala]. – No 2. – Pp. 78–82.
3. Lykov A. A., Efanov D. V., Vlasenko S. V. (2012) Technical diagnosis and monitoring of the state of RARC devices [Tekhnicheskoe diagnostirovanie i monitoring sostoyaniya ustrojstv ZHAT], Transport of the Russian Federation [Transport Rossijskoj Federatsii]. – No 5. – Pp. 67–72.
4. Efanov D. V. (2016) Functional control and monitoring of railway automation and telemechanics devices: monograph [Funktsionalnyj kontrol i monitoring ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki monografiya]. St. Petersburg, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. – 171 p.
5. Efanov D. V. (2018) Features of the functioning of systems for technical diagnostics and monitoring of railway infrastructure facilities [Osobennosti funkcionirovaniya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya i monitoringa obektov zheleznodorozhnoj infrastruktury], Automation in Transport [Avtomatika na transporte]. – Vol. 4. – No 3. – Pp. 333–354.
6. Sapozhnikov Vl. V., A. A. Lykov, D. V. Efanov, N. A. Bogdanov (2010) Efficiency of systems of technical diagnostics and monitoring of the state of railway automation and telemechanics devices [Ehffektivnost sistem tekhnicheskoy diagnostiki i monitoringa sostoyaniya ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki], Transport of the Russian Federation [Transport Rossijskoj Federatsii]. – No 4 (29). – Pp. 47–49.
7. Nikitin A., Shatokhin V., Poroshin A., Kotenko A. Diagnostics and Monitoring of Railway Automation and Remote Control Power Supply Devices, Proceedings of IEEE EastWest Design & Test Symposium (EWDTS'2017). – 2017. – Pp. 592–597.
8. Shatohin V. A., Poroshin A. A. (2017) An integrated approach to the control of power supply devices of railway automation and telemechanics [Kompleksnyj podhod k kontrolyu ustrojstv ehlektropitaniya zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki], Automation on Transport [Avtomatika na Transporte]. – No 2. – Pp. 192–198.

9. Battery discharge tables PowerSafeV [Razryadnye tablitsy PowerSafeV]. – URL : <http://hawker.ru/product/statsionarnyeakkumulyatory/powersafe-v>.
10. Nikitin A., Popov P. (2016) Determining the positions of trains using audio-frequency track circuits, SIGNAL+DRAHT. – 2016. – Pp. 29–34.
11. Barrow K. (2014) British ERTMS testing in full swing, International Railway Journal. – 2014. – № 8. – Pp. 61–66.
12. Domingues J. L. M. (2004) Diagnostic levels in railway applications, J. L. M. Domingues, Signal + Draht. – 2004. – No 1/2. – Pp. 31–34.
13. Ivanov A. A., Legonkov A. K., Molodtsov V. P. (2016) Data transfer from devices of equipment for moving with APK-DK equipment in the absence of a physical line and round-the-clock duty [Peredacha dannyh s ustrojstv oborudovaniya perezda apparaturoj APK-DK pri otsutstvii fizicheskoj linii i kruglosutochnogo dezhurstva], Automation in Transport [Avtomatika na transporte]. – Vol. 2. – No 1. – Pp. 65–80.
14. Yilboga J., Guclu A., Eker Ö. F., Camci F. (2010) Failure Prediction on Railway Turnouts Using Time Delay Neural Networks, 2010 IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications, 6–8 September 2010, Taranto, Italy. – Pp. 134–137. – DOI: 10.1109/CIMSA.2010.5611756.
15. Barrow K. (2014) British ERTMS testing in full swing. International Railway Journal. – 2014. – № 8. – Pp. 61–66.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Д. В. Ефановым
Поступила в редакцию 16.01.2019, принята к публикации 15.02.2019*

НИКИТИН Александр Борисович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I;

e-mail: nikitin@crtc.spb.ru

ШАТОХИН Виталий Анатольевич – кандидат технических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I;

e-mail: vital@crtc.spb.ru

ПОРОШИН Алексей Александрович – инженер кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I;

e-mail: poroshinSCB@yandex.ru

© Никитин А. Б., Шатохин В. А., Порошин А. А., 2019

УДК 681.518.5:004.052.32

Ю. Ф. Мухопад, д-р техн. наук

А. Ю. Мухопад, д-р техн. наук

Д. Ц. Пунсык-Намжилов, канд. техн. наук

Кафедра «Автоматизация производственных процессов»

Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск

СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ АВТОМАТОВ НОВОГО ТИПА ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ

Рассматривается синтез управляющих автоматов с новым определением состояний через разметку начала любого оператора (как оператора действия $A_1 \dots A_k$, так и логического оператора $\alpha_1 \dots \alpha_q$). По сравнению с управляющими автоматами Мура и автоматами с оригинальной структурой на основе применения мультиплексора и схемы адресации автоматы нового типа имеют существенное преимущество за счет снижения числа элементов и связей. Показана эффективность новой структурной организации для автоматов всего спектра сложности. Для железнодорожной автоматики рассмотрена задача обеспечения безопасности движения на автомобильно-железнодорожном переезде и задача управления системой очистки сред с применением ультразвука и вихревого эффекта Ранка. Такая система экономична и наиболее эффективна для очистки стрелок и перегонов от слежавшегося снега и льда. Для первой задачи объем комбинационной схемы переходов при реализации на ПЗУ снижается в 512 раз, для второй – в 256 000 раз.

На сегодня неизвестны другие методики синтеза (кроме предложенной), обеспечивающие столь высокую эффективность, по снижению аппаратных затрат на реализацию комбинационных схем.

железнодорожная автоматика, автоматы, управление, алгоритм, комбинационная схема, структурная организация автоматов, ультразвук, вихревой эффект

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-2-244-255

Введение

В железнодорожной технике управляющие автоматы (УА) на БИС и СБИС могут составлять до 70 % затрат оборудования при реализации информационно-управляющей системы (ИУС). Имеются в виду ИУС с ограниченной точностью (≤ 16 двоичных разрядов ДПК с фиксированной запятой), функциональная (Ф) подсистема которых реализуется набором таблично-алгоритмических функциональных преобразователей (ФПК).

Информационная подсистема (И) – это типовые БИС ОЗУ и ПЗУ, логическая подсистема (Л) – это набор внешних двоичных датчиков и схемы сравнения аналоговых сигналов, адресная подсистема (А) обычно проста и реализуется с помощью дешифраторов и счетчиков. В работе [1] показано, что для таких ИУС сверхпростые (СП), простые (ПА) и автоматы средней сложности (СА) эффективно реализуются автоматами Мура (УАМг) с использованием унитарного кодирования состояний.

1. Структурная организация сложных автоматов

Для сложных (СА), высокосложных (ВС), особо сложных (ОС) и ультрасложных (УС) автоматов в УАМг вводится мультиплексор со схемой адресации [2, 3], что дает возможность снизить объем ПЗУ комбинационной схемы переходов в Q раз. Здесь $Q = 2^{q-1}$, q – число логических условий $\alpha_1 \dots \alpha_q$. Схема такого УА оригинальна и эффективна, если оценивать эффективность коэффициентом Q .

Однако введение мультиплексора и схемы адресации усложняет структурную организацию УА за счет дополнительных блоков и связей.

До сих пор при синтезе УА использовались только два типа разметки:

– статическая – через операторы действия $A_1 \dots A_k$ в УАМг;

– динамическая – через переходы от $a(t)$ к $a(t+1)$ в УА Мили (УАМ_Л).

При синтезе УАМг и УАМ_Л по известным методикам [4–12] не возникал вопрос об использовании каких-либо других разметок ГСА.

Далее будут рассматриваться автоматы Мура и новый тип автоматов (НУАМх) на примере ГСА (рис. 1).

2. Автоматы с новым определением состояний

В работе [13] в качестве состояния УА предложено использовать начало любого (как $A_i \in \{A\}$, так и $\alpha_j \in \{\alpha\}$) оператора. Для примера (см. рис. 1) по новой разметке получен ГСА (рис. 2) и граф переходов (рис. 3).

Причем пустые операторы (A_n) вводятся лишь для ликвидации петель и для ограничения числа входов до двух. Второе ограничение не обязательно, но целесообразно, если при синтезе УА вводятся встроенные средства самоконтроля.

Следствием изменения понятия состояний является новая организация УА, который назван новым УАМх (аббревиатура НУАМх). Математическая модель НУАМх имеет вид:

$$a(t+1) = F_1(\alpha_j x_1 \dots x_m); \alpha(t+1) = F_2(\alpha_j x_1 \dots x_m); J = F_3((y_1 \dots y_m)).$$

Здесь $\{x\}$ – код $a(t)$; $\{y\}$ – код $a(t+1)$; j – номер логического условия.

В новом УА число состояний увеличивается незначительно по сравнению с УАМх. При этом определились новые особенности УА: состояния $a(t)$ разделяются на два непересекающихся подмножества: соответствующие выбору $A_i \in \{A\}$ и $\alpha_j \in \{\alpha\}$. Поэтому реализация операторов действия $A_1 \dots A_k$, как и выбор необходимых $\alpha_j \in \{\alpha\}$ для данного периода (Т), производится за время синхронизации τ .

Структурная схема нового управляющего автомата Мухопادا (НУАМх) приведена на рис. 4.

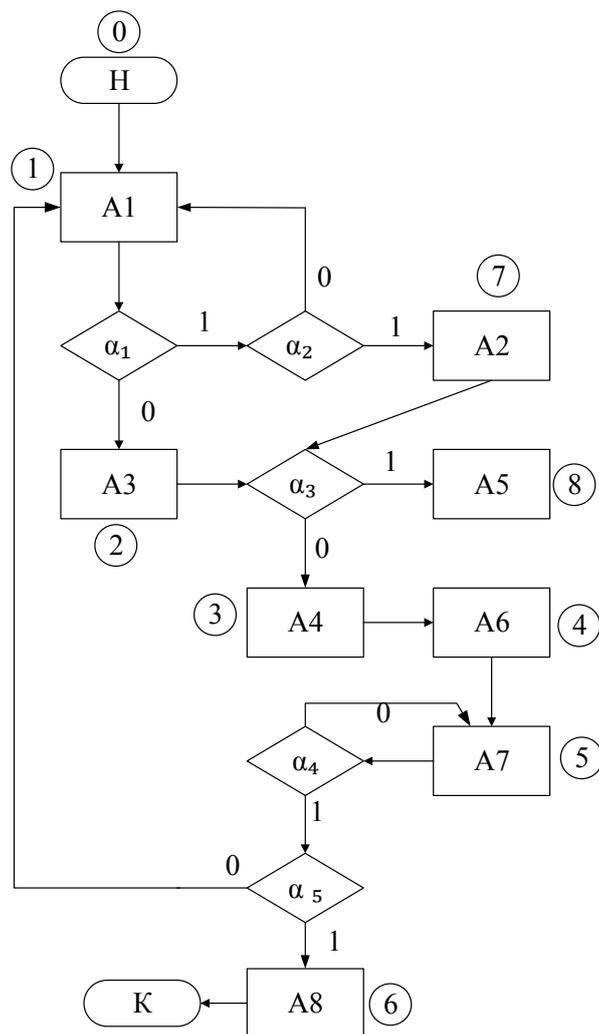


Рис. 1. ГСА с разметкой для УАМг

НУАМх по принципу действия соответствует УАМ_L, хотя для перевода его в режим УАМг потребуется ввести лишь таймер для выдержки времени, т. к. какие-либо другие изменения не требуются, если есть схема определения факта принадлежности $a(t)$ к $\{A\}$. В схеме НУАМх появился

лишь логический блок ЛБ(7) в виде q -двухвходовых элементов «И», одного q -двухвходового элемента «ИЛИ» и RS-триггера, фиксирующего для данного T значения $\alpha_j \in \{\alpha\}$.

Адресация блока ЛБ(7) производится подмножеством выходов дешифратора DC(3), соответствующих $\alpha_j \in \{\alpha\}$, т. е. без мультиплексора и блока адресации достигается тот же эффект снижения затрат оборудования на комбинационную схему $F_1(1)$ для всех типов УА.

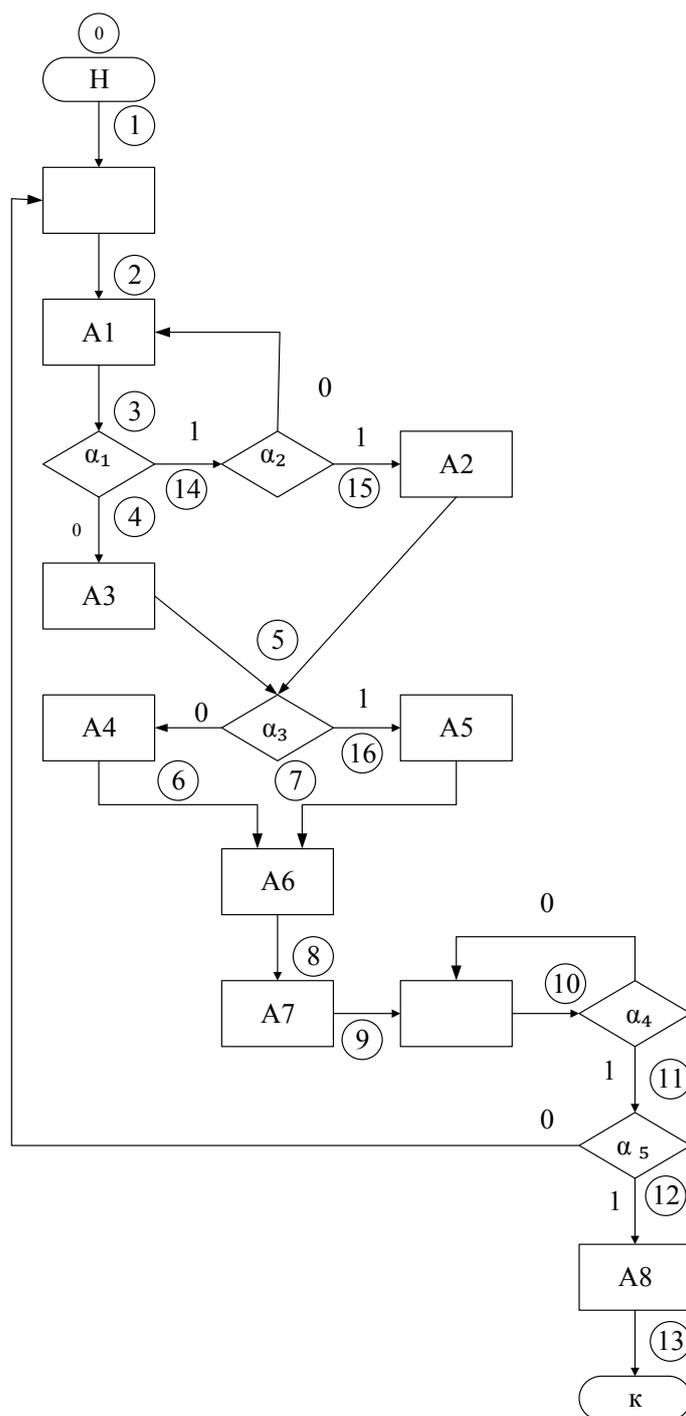


Рис. 2. ГСА с новым типом разметки состояний

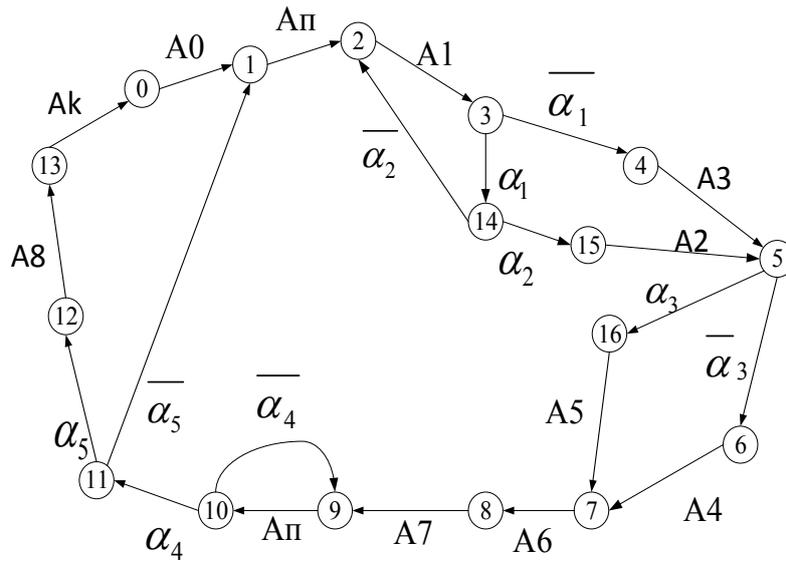


Рис. 3. Граф переходов с новым типом разметки состояний

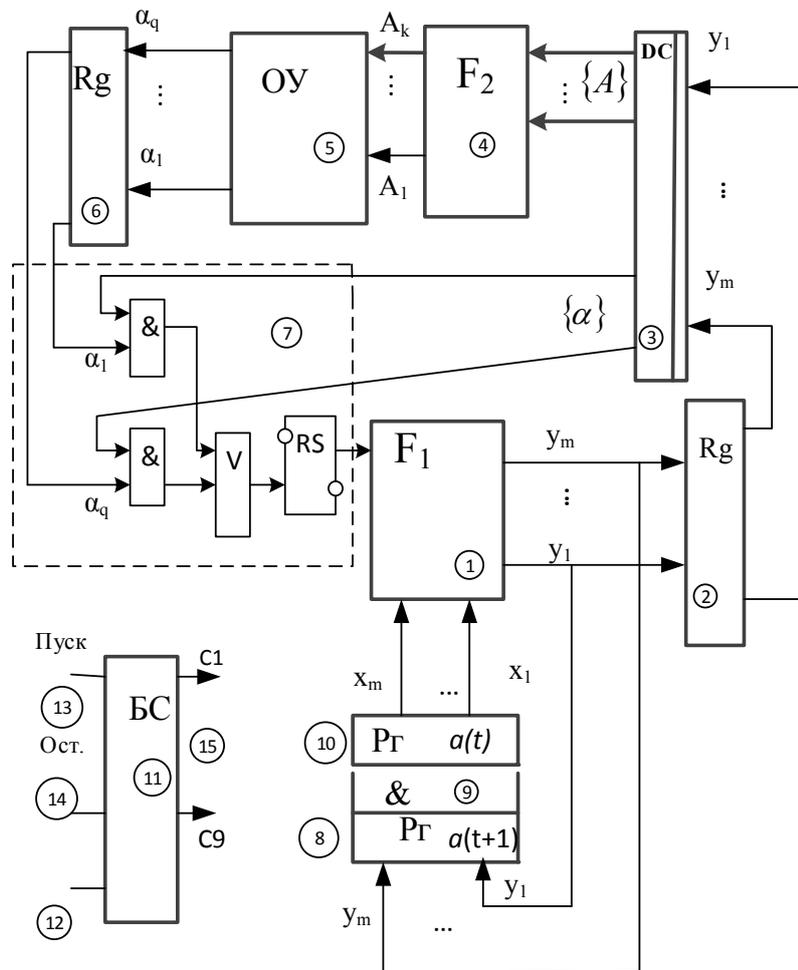


Рис. 4. Блок-схема нового управляющего автомата Мухопода (НУАМх)

Схема ГСА (рис. 6) запатентована как полезная модель [14] и является на сегодня наиболее простым вариантом реализации УАМг и УАМ_L, т. е. НУАМх в этом смысле является универсальным автоматом, т. к. по внешнему сигналу без структурной перестройки он может реализовать оба режима УА.

3. Реализация подсистем железнодорожной автоматики

В работах [1–3, 13, 15, 16] приведено достаточно много алгоритмов, реализация которых целесообразна на НУАМх.

В частности, для управления железнодорожным переездом (см. рис. 5) для предотвращения столкновения автомобилей с ж.-д. составом получим: $V_p = 0,5$ Мб. В работе [16] дана оценка УАМг для данной задачи. В этой статье приведены результаты синтеза НУАМх для управления переездом: $W_p = 1$ кб, $N = 40$, $m = 6$, $q = 10$. Следовательно, эффект сокращения объема ПЗУ для реализации схемы переходов $F_1(1)$ будет $Q = 2^{q-1} = 512$.

Ни один из известных методов (декомпозиция и минимизация систем булевых функций) не может обеспечить столь эффективное снижение затрат оборудования на реализацию комбинационной схемы переходов автоматов, кроме метода синтеза, предложенного авторами.

В Сибирских и Дальневосточных регионах очень актуальна задача очистки стрелок и перегонов от затвердевшего снега и льда.

В работе [15] предложена переносная, удобная в эксплуатации установка, в которой без нагревательных элементов на основе эффекта Ранка воздушный поток с давлением $\sim 3\text{--}5$ атм разделяется на горячие (~ 95 °С) и холодные струи. Холодные струи выбрасываются, а горячие вместе с ультразвуковыми колебаниями через рупор используются для очистки. Экспериментальное и фактическое применение установки подтвердило ее высокую эффективность, т. к. в ней нет тепловых нагревательных приборов, требующих больших энергетических затрат.

Управление данным прибором реализуется по ГСА (рис. 6) для НУАМх.

Для предложенного способа реализации УА $N = 51$, $m = 6$, $q = 19$, $m_p = 8$. Объем ПЗУ $W_p = m_p 2^{m+1} = 8 \cdot 2^{6+1} = 1$ кб. Тогда как для УАМг с классической структурной организацией потребовалось бы ПЗУ с объемом $V_p = m_p 2^{m+q} = 8 \cdot 2^{6+19} = 2^{28} = 0,25$ Гб. Использование НУАМх обеспечивает эффект $Q = 2^{q-1} = 2^{18} = 256 \cdot 10^3$ раз.

При реализации схемы переходов на ПЛМ эффект уменьшения числа входов ПЛМ определяется коэффициентом $k = (m + q)/m + 1$. Для данного случая $k = (6+19)/6 + 1 = 3,3$ раза. Граф переходов не приводится, т. к. здесь не рассматриваются вопросы функционально-схемной реализации. Не приводится также семантика операторов действия и логических условий для ГСА (см. рис. 5 и 6), т. к. в этой статье важно дать сравнительный анализ эффективности НУАМх по сравнению с УАМг. Расшифровка операторов приведена в работах [15, 16].

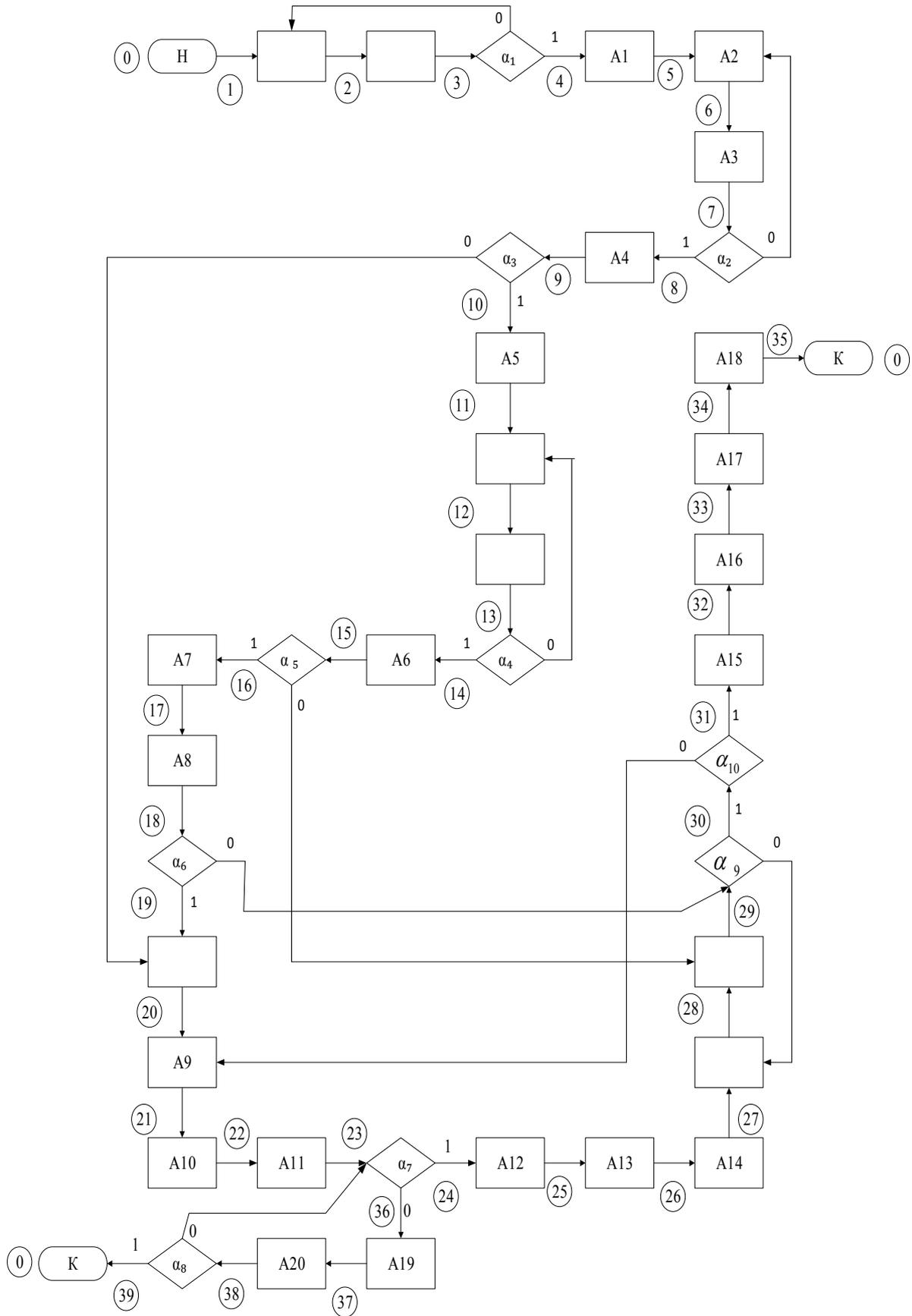


Рис. 5. Алгоритм управления переездом с новой разметкой состояний для НУАМх

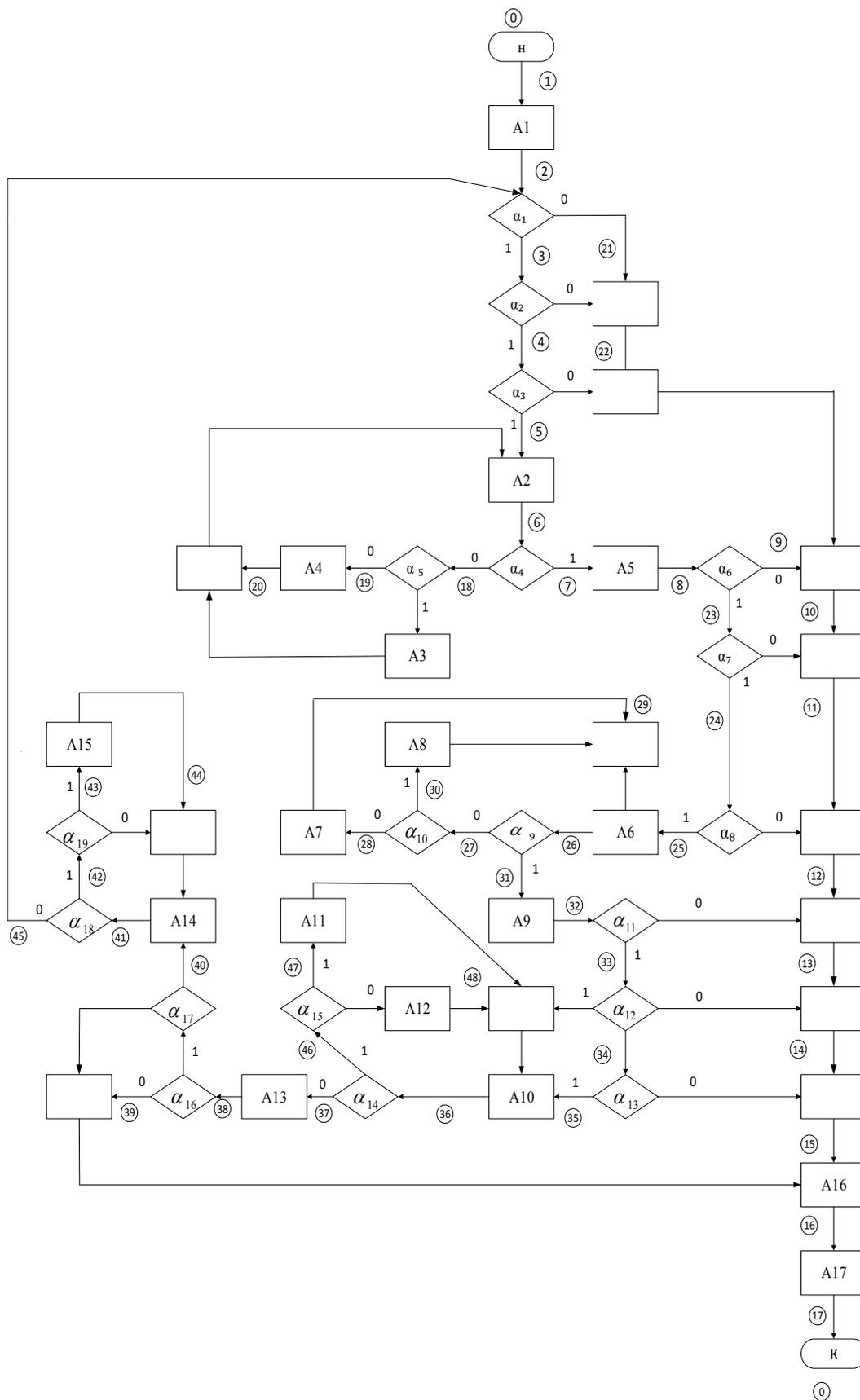


Рис. 6. ГСА управления системой ультразвуковой очистки сред с применением вихревого эффекта

Заключение

Произведен анализ оригинальных автоматов Мухопода с мультиплексором и схемой адресации (УАМх) и показано, что наиболее эффективен (по затратам оборудования) новый автомат Мухопода (НУАМх), в котором состояния $a(t)$ определяются через начало любого оператора (как оператора действия $A_1 \dots A_k$, так и логического оператора $\alpha_1 \dots \alpha_q$).

В НУАМх уменьшается число связей между блоками и достигается тот же эффект снижения объемов ПЗУ в Q раз, как и в УАМх с мультиплексором и схемой адресации.

Два практических примера в задаче синтеза системы обеспечения безопасности движения поездов и управления системой очистки сред на основе эффекта Ранка подтверждают целесообразность использования НУАМх в технических системах железнодорожной автоматики.

Библиографический список

1. Мухопад А. Ю. Теория управляющих автоматов технических систем реального времени / А. Ю. Мухопад. – Новосибирск : Наука, 2015. – 176 с.
2. Пат. на полезную модель № 82888 Российская Федерация. Микропрограммный автомат / Мухопад А. Ю., Мухопад Ю. Ф. ГОБФ 9/00 ; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщения ; заявка 200/8149344/22, 15.12.2008 ; опубл. 10.05.2009, Бюл. № 13.
3. Пат. на изобретение № 2527190 Российская Федерация. Микропрограммный автомат / Мухопад А. Ю., Мухопад Ю. Ф., Пунсык-Намжилов Д. Ц., Матвеев Е. Н. МПК (51) ГОБФ 9/00 ; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщения ; № 2013110986/08 ; заявл. 12.03.2013 ; опубл. 27.08.2014, Бюл. № 24.
4. Брауэр В. Введение в теорию конечных автоматов / В. Брауэр. – М. : Радио и связь, 1987. – 392 с.
5. Карпов Ю. Г. Теория автоматов / Ю. Г. Карпов. – СПб. : Питер, 2003. – 208 с.
6. Бирюков И. И. Теория автоматов. Ч. II. Логическое проектирование схем с памятью / И. И. Бирюков. – М. : МГИЭМ, 2012. – 59 с.
7. Ожиганов А. А. Теория автоматов / А. А. Ожиганов. – СПб. : НИУ ИТМО, 2013. – 84 с.
8. Ульман Джерри Д. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений / Д. Ульман Джерри, Р. Мотвани, Д. Хопкрофт. – М. : Вильямс, 2016. – 528 с.
9. Кудрявцев В. Б. Теория автоматов / В. Б. Кудрявцев, Ф. Б. Алешин, А. С. Подколзин // МГУ им. М. В. Ломоносова. – М. : Юрайт, 2018. – 320 с.
10. Горбатов В.А. Теория автоматов / В. А. Горбатов, А. В. Горбатов, М. В. Горбатова. – М. : Астрель, 2008. – 699 с.
11. Соловьев В. В. Логическое проектирование цифровых систем на основе ПЛИС / В. В. Соловьев, А. Климович. – М. : Горячая линия – Телеком, 2008. – 374 с.
12. Труды по теории синтеза и диагноза конечных автоматов и релейных устройств / под ред. В. В. Сапожникова и Вл. В. Сапожникова. – СПб. : Элмор, 2009. – 894 с.
13. Мухопад Ю. Ф. Управляющие автоматы мехатроники с новым определением состояний / Ю. Ф. Мухопад, А. Ю. Мухопад, Д. Ц. Пунсык-Намжилов // Тр. V Междунар. научно-практической конф. – Новокузнецк, 2018. – С. 53–61.

14. Пат. на полезную модель № 183109 Российская Федерация. Управляющий автомат / Мухопад Ю. Ф., Мухопад А. Ю., Пунсык-Намжилов Д. Ц. ; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщения ; заявл. 23.04.2018 ; опубл. 11.09.2018, Бюл. № 26.
15. Пат. на полезную модель № 158372 Российская Федерация. Устройство ультразвуковой очистки технологических сред с применением вихревого эффекта / Филатов Д. А., Ванчиков В. Ц., Пунсык-Намжилов Д. Ц., Марюхненко В. С., опубл. 07.12.2015, БИ № 36.
16. Мухопад Ю. Ф. Алгоритмические системы управления / Ю. Ф. Мухопад, А. Ю. Мухопад. – Иркутск : ИрГУПС, 2018. – 96 с.

Yuri F. Mukhopad

Aleksandr Yu. Mukhopad

Daba C. Punsik-Namzhirov

The chair of «Automation of production processes»

Irkutsk State Transport University

Structural organization of control finite-state machines of a new type for technical systems of railway automation

The article considers the synthesis of control machine with a new definition of states through marking the beginning of any operator (both the action operator $A_1 \dots A_k$ and the logical operator $\alpha_1 \dots \alpha_q$). Compared to Moore control machines and machines with an original structure based on the use of a multiplexer and an addressing scheme, new types of machines have a significant advantage by reducing the number of elements and connections. The effectiveness of the new structural organization for machines of the entire spectrum of complexity is shown. For railway automation, the problem of ensuring traffic safety at a road-rail crossing and the task of controlling a environment cleaning system using ultrasound and the Rank vortex effect are considered. Such a system is economical and most effective for cleaning arrows and hauls from packed snow and ice. For the first task, the volume of the combinational transition scheme when implemented on ROM is reduced by 512 times, and for the second – by 256,000 times.

To date, no other synthesis methods are known (except the proposed one) that provide such a high efficiency for reducing hardware costs for the implementation of combinational circuits.

railway automation, machines, control, algorithm, combinational circuit, structural organization of machines, ultrasound, vortex effect.

References

1. Mukhopad A. Yu. (2015) [Teoriya upravlyayushchih avtomatov tekhnicheskikh sistem realnogo vremeni]. Novosibirsk : Nauka. – 175 p.
2. Mukhopad A. Yu., Mukhopad Yu. F. (2009) Pat. for utility model No 82888 Russian Federation. Firmware machine [Pat na poleznuyu model 82888 Rossijskaya Federatsiya. Mikroprogrammnyj avtomat]. – BI No 13.

3. Muhopad A., Yu. Muhopad Yu. F., Punsyk-Namzhilov D. Ts., Matveev E. N. (2014) Microprogram automatic [Upravlyayuschiy avtomat] Patent for invention No 2527190, Russian Federation, No 24, 27.08.2014 [Pat na izobrenenie No 2527190, Rossijskaya Federatsiya]. No 27.08.2014, – BI No 24.
4. Brauehr V. (1987) Introduction to the theory of finite automata [Vvedenie v teoriyu konechnyh avtomatov]. Moscow, Radio and communication. – 392 p.
5. Karpov Yu. G. (2003) Automata Theory [Teoriya avtomatov]. St. Peterburg. Piter. – 208 p.
6. Biryukov I. I. (2012) Theory of automata. Part II. Logical design of schemes with memory [Teoriya avtomatov CH II Logicheskoe proektirovanie skhem s pamyatyu]. Moscow, MGIEHM. – 59 p.
7. Ozhiganov A. A. (2013) Theory of automata. Part II. Logical design of schemes with memory [Teoriya avtomatov]. St. Peterburg. NIU ITMO. – 84 p.
8. Ulman Dzherri D., R. Motvani, D. Hopkroft, M. Vilyams, (2016) Introduction to the theory of automata, languages, and computation [Vvedenie v teoriyu avtomatov yazykov i vychislenij]. – 528 p.
9. Kudryavtsev V. B., F. B. Aleshin, A. S. Podkolzin. (2018) The Theory of machines [Teoriya avtomatov]. MSU M. V. Lomonosova. M., YUrajt. – 320 p.
10. Gorbatov V. A., Gorbatov A. V., Gorbatova V. M. (2008) Theory of machines [Teoriya avtomatov]. Moscow, Astrel. – 699 p.
11. Solovev V. V., A. Klimovich M. (2008) The logical design of digital systems based on FPGA [Logicheskoe proektirovanie tsifrovyyh sistem na osnove PLIS]. Moscow, Hotline – Telecom. – 374 p.
12. Proceedings on the theory of synthesis and diagnosis of finite automata and relay devices [Trudy po teorii sinteza i diagnoza konechnyh avtomatov i relejnyh ustrojstv], ed V. V. Sapozhnikova i VI. V. Sapozhnikova. St. Peterburg, Elmor. – 2009. – 894 p.
13. Muhopad Yu. F., Muhopad A. Yu., D. Ts. Punsyk-Namzhilov (2018) Control machines mechatronics with a new definition of the States [Upravlyayushchie avtomaty mekhatroniki s novym opredeleniem sostoyanij]. Proc. V. Mezhdunar. Nauchno-prakticheskoy konf. Novokuznetsk. – Pp. 53–61.
14. Muhopad Yu. F., Muhopad A. Yu., Punsyk-Namzhilov D. Ts. Pat. for utility model No 183109 Russian Federation. Managing automatic. [Upravlyayushchij Avtomat]. publ 11.09.2018. Byul. No 26.
15. Filatov D. A., Vanchikov V. TS., Punsyk-Namzhilov D. Ts., Maryuhnenko V. S. Pat. na poleznuyu model No 158372. The device of ultrasonic cleaning of technological environments with the use of vortex effect [Ustrojstvo ultrazvukovoj ochistki tekhnologicheskikh sred s primeneniem vihrevogo ehffekta]. publ 07.12.2015. BI No 36.
16. Muhopad Yu. F., Muhopad A. Yu. (2018) Algorithmic control system [Algoritmicheskie sistemy upravleniya]. Irkutsk, IrGUPS. – 96 p.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Вал. В. Сапожниковым
Поступила в редакцию 25.01.2019, принята к публикации 04.03.2019*

МУХОПАД Юрий Федорович – доктор технических наук, заслуженный деятель науки Российской Федерации, заслуженный профессор Иркутского государственного университета путей сообщения;

e-mail: bts48@mail.ru

МУХОПАД Александр Юрьевич – доктор технических наук, доцент Иркутского государственного университета путей сообщения;

e-mail: jcmg@mail.ru

ПУНСЫК-НАМЖИЛОВ Даба Цыренович – кандидат технических наук, доцент, генеральный директор ООО «Химтех-Юкос»;

e-mail: dablutf@mail.ru

© Мухопад Ю. Ф., Мухопад А. Ю., Пунсык-Намжилов Д. Ц., 2019

УДК 681.518.5:004.052.32

В. А. Шагина

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, Санкт-Петербург

ДВУХМОДУЛЬНЫЕ КОДЫ С СУММИРОВАНИЕМ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ С ОБНАРУЖЕНИЕМ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

Анализируются способы построения кодов с суммированием единичных информационных разрядов. Отмечается, что известные модульные коды с суммированием (или остаточные коды, или коды Боуза–Лина) не являются единственным классом кодов с малой избыточностью, которые можно применять при решении задач технической диагностики и синтезе контролепригодных дискретных систем. Вводится понятие многомодульного кода с суммированием и его подкласса – двухмодульного кода. Приведены результаты исследований двухмодульных кодов с суммированием, отмечаются преимущества и недостатки двухмодульных кодов с суммированием. Дана классификация кодов с суммированием единичных информационных разрядов.

техническая диагностика, дискретные системы, код с суммированием, код Бергера, модульный код с суммированием, код Боуза–Лина, двухмодульный код, информационный вектор, ошибка в информационном векторе.

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-2-256-274

Введение

С конца прошлого столетия и по настоящее время в промышленности и на транспорте активно внедряются микропроцессорные системы автоматического и автоматизированного управления ответственными технологическими процессами [1–4]. Микропроцессорные устройства обладают рядом неоспоримых преимуществ перед релейными системами, главными из которых являются быстродействие, малые габариты и, как следствие, малая площадь помещений, занимаемая оборудованием, а также гибкая логика. Ввиду того, что микропроцессорные системы строятся из элементов с симметричными характеристиками отказов, таких как транзисторы, диоды и многие другие, появляется задача обеспечения надежности и безопасности их функционирования [5].

Одним из наиболее известных аппаратных способов резервирования является дублирование, которое предполагает наличие копии контролируемого устройства и сравнения значений вычисляемых функций специальной схемой сравнения с получением на выходе сигнала контроля [6, 7]. Такая система

позволяет обнаруживать любые одиночные неисправности в контролируемых блоках и является достаточно простой в плане построения. Однако этот способ реализации контролепригодного устройства обладает большой структурной избыточностью. Поэтому часто для решения задачи обнаружения неисправностей используются системы функционального (рабочего) контроля, в основу которых положено использование каких-либо помехозащищенных кодов [8, 9]. Такие системы позволяют обеспечивать тестирование устройства без отключения его от объектов управления, что является немаловажным достоинством при использовании устройств «под нагрузкой» непрерывно. Задачей систем функционального контроля является только обнаружение ошибок на выходах контролируемого устройства. Задачу исправления или локализации дефекта, приводящего к искажению вычисляемых функций, системы функционального контроля не решают. Говоря о микропроцессорных системах, поиск места неисправности зачастую не требуется производить, так как достаточно перезагрузить устройство или же заменить отказавший блок [10].

Существует большое разнообразие помехозащищенных кодов [11]. Нередко для организации систем функционального контроля используются разделимые (m, k) -коды, где m – длина информационного вектора, k – длина контрольного вектора [12]. Известно достаточно много способов построения помехозащищенных кодов, применяемых в задачах синтеза систем автоматизации с обнаружением неисправностей, например классические и модифицированные коды с суммированием, полиномиальные коды, коды Хэмминга и т. д. [13–17].

Данная статья обращает внимание читателя на класс перспективных, по мнению автора, кодов для задач организации систем автоматизации с обнаружением неисправностей – двухмодульных кодов с суммированием единичных информационных разрядов.

1. Многомодульные коды с суммированием

Многомодульные коды с суммированием являются широким классом кодов, куда входят и известные коды [12]. Принцип построения многомодульных кодов с суммированием заключается в разбиении информационного вектора на i подвекторов, которые будут иметь длины в диапазоне $[1, m]$, подсчете веса r_i (количества единичных разрядов) подвекторов по заранее установленным модулям M_i . Полученные наименьшие неотрицательные вычеты весов подвекторов $r_i(\text{mod } M_i)$ в двоичном виде записываются в разряды контрольного вектора $k_i = \log_2 M_i$.

Таким образом, варьируя модули и пересечения подмножеств разрядов подвекторов, а также количество разрядов в подвекторах, получают целые семейства многомодульных кодов с суммированием. Все они будут

иметь как схожие свойства по обнаружению ошибок, так и уникальные для каждого способа построения кода. Стоит отметить, что при пересечении разрядов подвекторов каждый разряд информационного вектора должен контролироваться для обеспечения свойства помехозащищенности кода.

Стоит отметить, что длина контрольного вектора будет зависеть как от способа выбора модуля подсчета, так и от количества подвекторов в информационном векторе. Ввиду этого при малом количестве выходов объекта диагностирования (до 20) не считается целесообразным применять трех- и четырехмодульные коды, так как они будут иметь большую избыточность и высокую сложность реализации.

Одним из наиболее целесообразных вариантов многомодульных кодов является двухмодульный код, способ построения которого был предложен в [18]. Рассмотрим алгоритм получения контрольных слов двухмодульного кода.

Алгоритм построения двухмодульного кода с суммированием

1. Устанавливаются значения модулей $M_1 \in [2, 4, \dots, 2^i]$ и $M_2 \in [2, 4, \dots, 2^i]$, где i – числа $1, 2, \dots, N$.

2. Из полного множества разрядов $Q = m$ выделяются два подмножества разрядов $D_1 \in [1, \dots, m]$ и $D_2 \in [1, \dots, m]$ такие, что $D_1 \cap D_2 = Q$.

3. Подмножества разрядов D_1 и D_2 объединяются в подвекторы V_1 и V_2 соответственно.

4. Определяются наименьшие неотрицательные вычеты $r_1(\text{mod } M_1)$ и $r_2(\text{mod } M_2)$ весов подвекторов V_1 и V_2 соответственно.

5. Числа $r_1(\text{mod } M_1)$ и $r_2(\text{mod } M_2)$ в бинарной форме заносятся в $k_1 = \log_2 M_1$ младших разрядов и $k_2 = \log_2 M_2$ старших разрядов контрольного вектора соответственно.

Код, контрольные слова которого получают в соответствии с приведенным выше алгоритмом, получил название $TM(M_1/M_2)(m, k, D_1/D_2)$ -код (*Two-modulus codes*), где M_1/M_2 – установленные модули подсчета весов первого и второго подвекторов соответственно; D_1/D_2 – количество разрядов в первом и втором подмножествах соответственно. Получаемый таким образом код всегда будет иметь фиксированное значение контрольных разрядов. В ряде работ соавторов [19–22] исследуются двухмодульные коды со значениями обоих модулей $M_1 = M_2 = 4$. А в статье [23] представлен двухмодульный код с числом контрольных разрядов, как у классического кода с суммированием.

Например, на рис. 1 представлен способ образования контрольных слов для $TM(8 + 4)(8, 5, 6/4)$.

Как отмечено выше, в зависимости от количества разрядов в подвекторах, а также от различных пересечений самих подвекторов образуется целое семейство двухмодульных кодов для различных длин информацион-

ных векторов t . Наглядно это удобно представить в виде матрицы кодов (рис. 2); например, для $m = 8$ и установленных модулей $M_1 = 8$ и $M_2 = 4$ можно построить 32 различных кода.

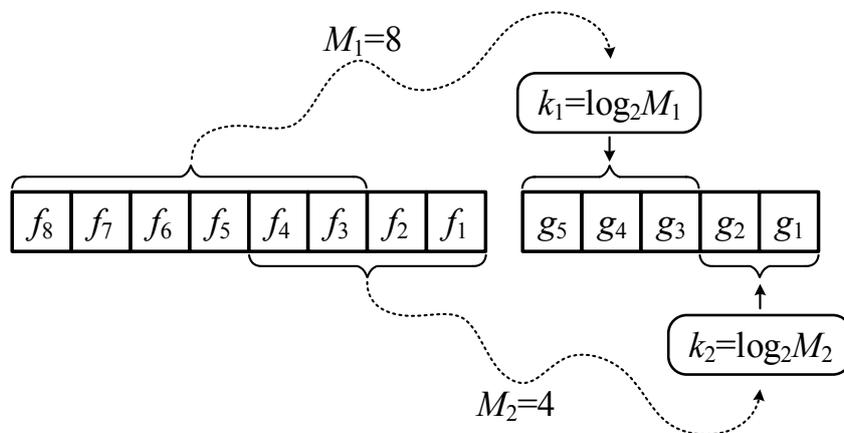


Рис. 1. Формирование контрольного вектора для $TM(8/4)(8,5,6/4)$ -кода

Подмножество $D_1, M_1=8$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	-	-	-	-	-	-	-	-	S8
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	TM	TM	TM
3	-	-	-	-	-	TM	TM	TM	TM
4	-	-	-	-	TM	TM	TM	TM	TM
5	-	-	-	-	TM	TM	TM	TM	TM
6	-	-	-	-	TM	TM	TM	TM	TM
7	-	-	-	-	TM	TM	TM	TM	TM
8	S4	-	-	-	TM	TM	TM	TM	TM

Подмножество $D_2, M_2=4$

Рис. 2. Матрица для $TM(8/4)(8, 5, D_1/D_2)$ -кодов

Рассмотрим данную матрицу: по горизонтали и по вертикали располагаются количества разрядов в первом подмножестве D_1 и во втором подмножестве D_2 . Знаком «-» отмечены те коды, которые не являются помехоустойчивыми, то есть при пересечении подмножеств D_1 и D_2 не образуется полное множество разрядов Q , например на пересечении 5-й строки и

2-го столбца матрицы. Стоит также отметить, что ввиду бинарной логики на свойства кодов не влияет тот факт, какие именно разряды входят в подмножества, на самом деле они зависят от взаимного пересечения подмножеств D_1 и D_2 , а также от количества разрядов в этих подмножествах. Поэтому коды, расположенные в матрице симметрично относительно главной диагонали $(0,0)–(8,8)$, имеют одинаковые характеристики. При подсчете веса по модулю $M = 4$ из-за равнозначности разрядов минимальное количество разрядов в подмножестве равно двум, а при $M = 8$ – четырем.

Также можно заметить, что в матрице располагаются уже известные модульные коды с суммированием (коды Боуза–Лина), отмеченные как S_4 , S_8 , они являются частным случаем двухмодульных кодов.

2. Классификация двухмодульных кодов с суммированием

Двухмодульные коды с суммированием являются обобщением ранее известных классических и модифицированных кодов. Это объясняется способом выбора подсчета модулей. В соответствии с этим можно представить следующую классификацию $TM(M_1/M_2)(m,k,D_1/D_2)$ -кодов (рис. 3).

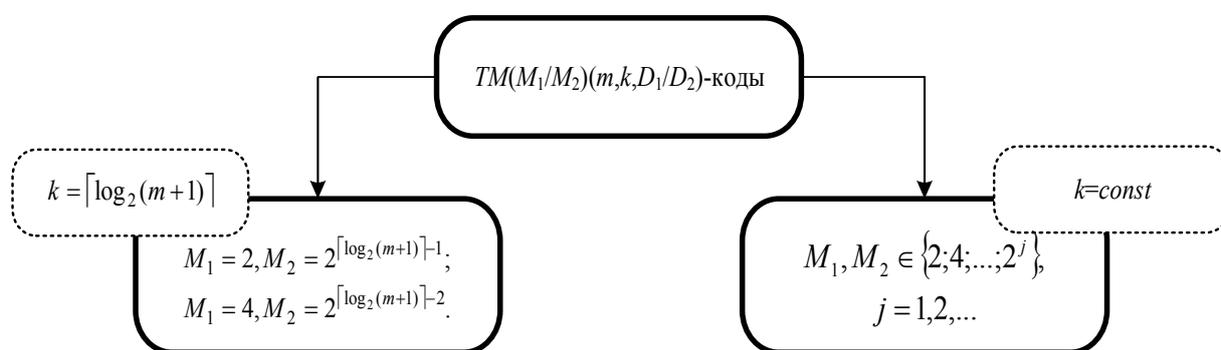


Рис. 3. Классификация двухмодульных кодов с суммированием

Нетрудно заметить, что если модули зависят от длины информационного вектора m , то, соответственно, и количество контрольных разрядов будет зависеть от значения числа m , а если модули выбираются из множества чисел, являющихся степенями числа два, то количество контрольных разрядов будет фиксированным для любой длины информационного вектора m .

Двухмодульные коды, описываемые в данной статье, принадлежат к кодам с фиксированным количеством контрольных разрядов $k = \text{const}$, как и модульные коды Боуза–Лина [24], обозначаемые как $SM(m,k)$ -коды, контрольные слова которых формируются путем записи в них наименьшего неотрицательного вычета веса всего информационного вектора в двоичном виде.

К двухмодульным кодам с количеством контрольных разрядов, зависящим от длины информационного вектора m , принадлежат предложенные в [25, 26] модифицированные коды с суммированием, такие как RS -, $RSM(m,k)$ -коды. Принцип построения таких кодов заключается в подсчете модифицированного веса информационного вектора по формуле: $W = \alpha M + r \pmod{M}$, где α – специальный поправочный коэффициент, равный сумме по модулю двух заранее выбранных информационных разрядов. Стоит отметить, что код Бергера [27] – $S(m,k)$ -код – имеет модуль $M = m + 1$ и также может быть отнесен к двухмодульным кодам с варьируемым значением контрольных разрядов в зависимости от длины m .

Раскрывая правую ветвь двухмодульных кодов с фиксированным количеством контрольных разрядов (см. рис. 3), можно представить следующую классификацию кодов (рис. 4). Данная классификация (m,k) -кодов включает в себя уже известные модульные коды с суммированием для определенной величины k , где также выделены новые двухмодульные коды, которые расширяют данную классификацию.

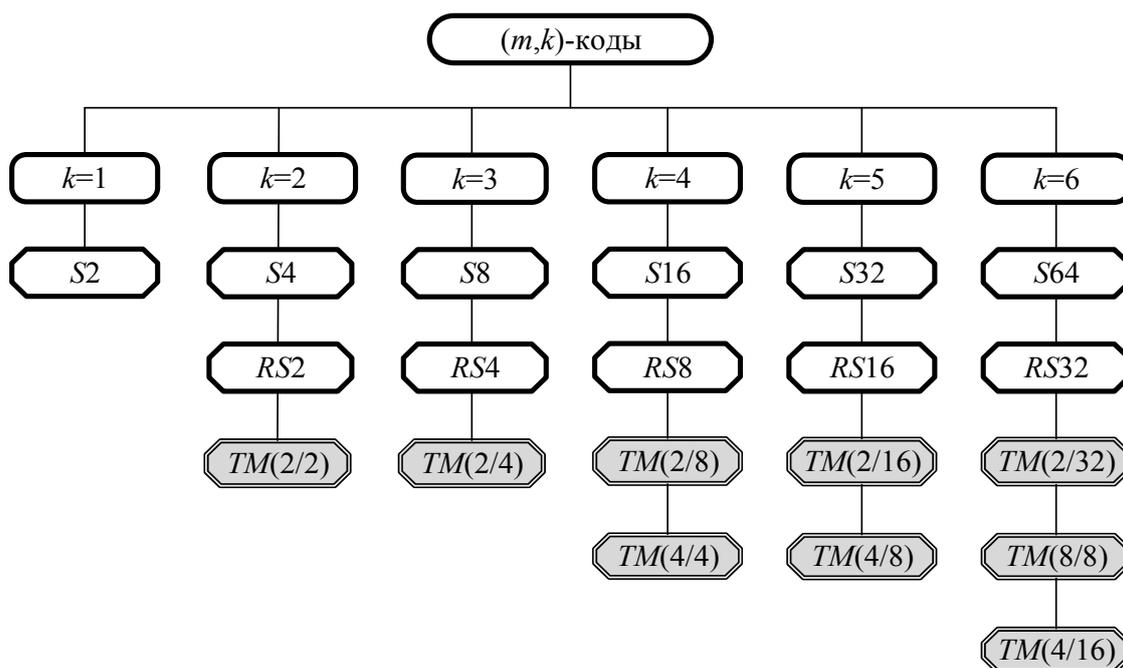


Рис. 4. Классификация двухмодульных кодов с фиксированным количеством контрольных разрядов

В соответствии со сказанным выше можно свести все коды с суммированием единичных информационных разрядов в одной матрице, где в каждой клетке отмечен конкретный код, характеризующийся выбором модулей M_1 и M_2 (рис. 5).

Представленная матрица систематизирует все ранее существующие способы построения кодов с суммированием и дает целостный образ класса кодов с суммированием единичных информационных разрядов.

$M_2 \backslash M_1$	–	2	4	8	...	$2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 2}$	$2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}$...	$m+1$
–	–	<i>S2</i>	<i>S4</i>	<i>S8</i>	...	<i>SM</i>	<i>SM</i>	...	<i>S</i>
2	<i>S2</i>	<i>RS2</i>	<i>RS4</i>	<i>RS8</i>	...	<i>RSM</i>	<i>RS</i>	...	–
4	<i>S4</i>	<i>RS4</i>	<i>TM</i>	<i>TM</i>	...	<i>TM</i>	–	...	–
8	<i>S8</i>	<i>RS8</i>	<i>TM</i>	<i>TM</i>	...	–	–	...	–
...
$2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 2}$	<i>SM</i>	<i>RSM</i>	–	–	...	–	–	...	–
$2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}$	<i>SM</i>	<i>RS</i>	–	–	...	–	–	...	–
...
$m+1$	<i>S</i>	–	–	–	...	–	–	...	–

Рис. 5. Матрица двухмодульных кодов с суммированием

3. Анализ характеристик по обнаружению ошибок класса двухмодульных кодов

Классический код Бергера имеет важное свойство: обнаруживается 100 % монотонных ошибок в информационных векторах. Однако ввиду неравномерности распределения информационных слов между контрольными не обнаруживается достаточно большое общее количество ошибок. Введение модуля для подсчета веса информационного вектора позволяет достигнуть более равномерного распределения информационных слов между контрольными, что обеспечивает уменьшение количества необнаруживаемых ошибок. Улучшенными свойствами в сравнении с классическим кодом Бергера обладают $RS(m,k)$ -коды.

В статье [28] показано, что свойства кодов могут быть улучшены, так как любой разделимый (m,k) -код, у которого $k < m$, может быть сравним с некоторым оптимальным кодом по критерию минимума необнаруживаемых ошибок с помощью специального коэффициента эффективности $\xi_{m,k}$, вычисляемого по следующей формуле:

$$\xi_{m,k} = \frac{N_{m,k}^{\min}}{N_m} \cdot 100 \%,$$

где $N_{m,k}^{\min}$ – минимальное количество необнаруживаемых ошибок m,k -кодом, вычисляемое как $N_{m,k}^{\min} = 2^m (2^{m-k} - 1)$; N_m – фактическое количество необнаруживаемых ошибок m,k -кодом.

Так, например, для кода Бергера коэффициент эффективности составляет 35,152 %, а для $RS(m,k)$ -кода 72,322 %.

Двухмодульные коды могут быть сравнимы с S -, $RS(m,k)$ -кодами при длинах информационных векторов $m = 8 \dots 15$.

В таблице 1 представлен результат расчета коэффициента эффективности для S -, $RS(m,k)$ -, $TM(4+4)(m,k,D_1/D_2)$ -кодов при длине информационного вектора $m = 8$ [21].

Таблица 1. Сравнение коэффициентов эффективности S -, RS -, $TM(m,k)$ -кодов

D_1/D_2	Количество необнаруживаемых ошибок N_m			$N_{m,k}^{\min}$	Коэффициент эффективности $\xi_{m,k}$		
	S	RS	TM		S	RS	TM
8/2	12614	6216	6080	3840	30,442	61,776	63,158
8/3			5184				74,074
8/4			4928				77,922
8/5			5184				74,074
8/6			6080				63,158
8/7			8064				47,619
8/8			16 256				23,622
7/2			6016				63,83
7/3			5056				75,949
7/4			4672				82,192
7/5			4672				82,192
7/6			5056				75,949
7/7			6016				63,83
7/8			8064				47,619
6/2			6080				63,158
6/3			5056				75,949
6/4			4608				83,333
6/5			4480				85,714
6/6			4608				83,333
6/7			5056				75,949
6/8			6080				63,158
5/3			5184				74,074
5/4			4672				82,192
5/5			4480				85,714
5/6			4480				85,714
5/7			4672				82,192
5/8			5184				74,074
4/4			4928				77,922
4/5			4672				82,192
4/6			4608				83,333
4/7			4672				82,192
4/8			4928				77,922
Среднее значение							72,916

На рис. 6 представлены значения коэффициентов эффективности для большей наглядности.

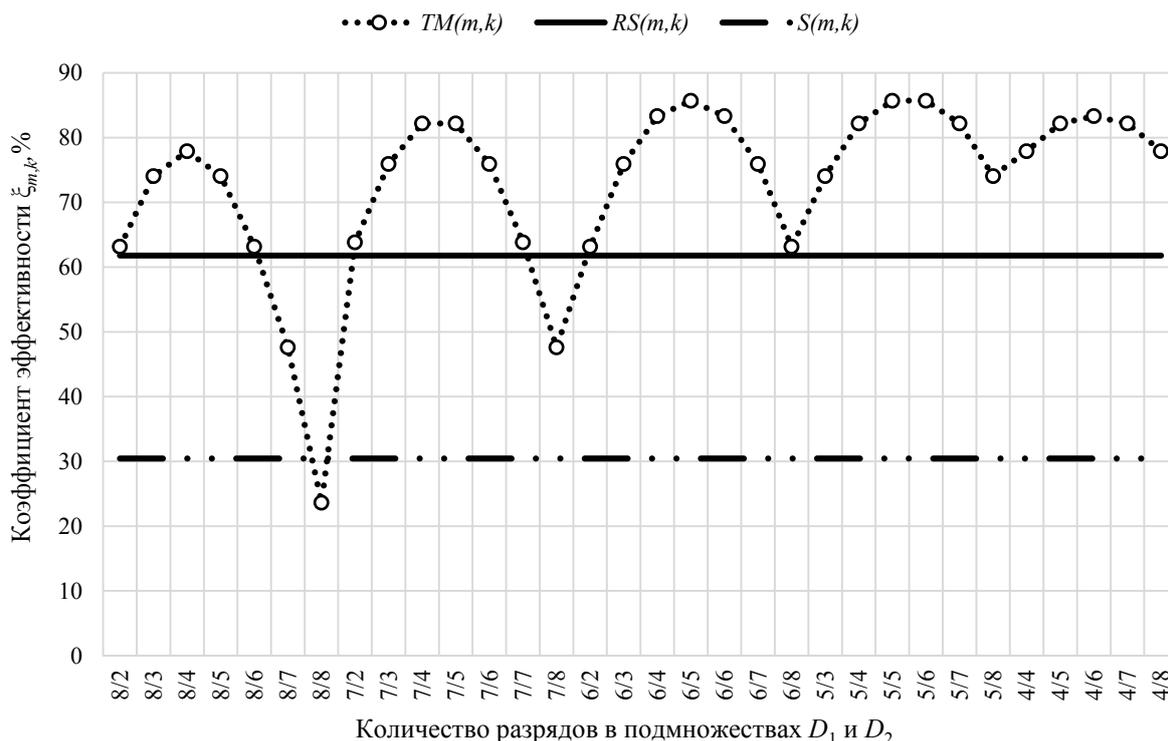


Рис. 6. Значения коэффициентов эффективности для S -, RS -, $TM(m,k)$ -кодов

Из графика видно, что для некоторых двухмодульных кодов, например при вариантах разбиения 6/5, 5/5, 7/4, значение коэффициента эффективности достигает почти 90 %. Это значит, что двухмодульные коды обладают наименьшим общим количеством необнаруживаемых ошибок, что фактически указывает на то, что они эффективнее используют свои контрольные разряды, чем сравниваемые с ним коды.

Покажем также результаты сравнения количества необнаруживаемых ошибок среди рассматриваемых кодов с суммированием, которые представлены в таблице 2. Для этого были выведены некоторые показатели ψ^S , ψ^{RS} , вычисляемые по следующим формулам:

$$\psi^S = \frac{N^S}{N^{TM}};$$

$$\psi^{RS} = \frac{N^{RS}}{N^{TM}},$$

где N^S , N^{RS} , N^{TM} – количество необнаруживаемых ошибок S -, RS -, $TM(m,k)$ -кодами соответственно.

Если значение показателей ψ^S , ψ^{RS} больше единицы, то $TM(m,k)$ -код имеет меньшее количество необнаруживаемых ошибок.

Таблица 2. Результаты расчета значений показателей Ψ^S , Ψ^{RS}

D_1/D_2	Количество необнаруживаемых ошибок N_m			Ψ^S	Ψ^{RS}
	$S(m,k)$	$RS(m,k)$	$TM(4+4)(m,k, D_1/D_2)$		
8/2	12614	6216	6080	2,075	1,022
8/3			5184	2,433	1,199
8/4			4928	2,560	1,261
8/5			5184	2,433	1,199
8/6			6080	2,075	1,022
8/7			8064	1,564	0,771
8/8			16 256	0,776	0,382
7/2			6016	2,097	1,033
7/3			5056	2,495	1,229
7/4			4672	2,700	1,330
7/5			4672	2,700	1,330
7/6			5056	2,495	1,229
7/7			6016	2,097	1,033
7/8			8064	1,564	0,771
6/2			6080	2,075	1,022
6/3			5056	2,495	1,229
6/4			4608	2,737	1,349
6/5			4480	2,816	1,388
6/6			4608	2,737	1,349
6/7			5056	2,495	1,229
6/8			6080	2,075	1,022
5/3			5184	2,433	1,199
5/4			4672	2,700	1,330
5/5			4480	2,816	1,388
5/6			4480	2,816	1,388
5/7			4672	2,700	1,330
5/8			5184	2,433	1,199
4/4			4928	2,560	1,261
4/5			4672	2,700	1,330
4/6			4608	2,737	1,349
4/7			4672	2,700	1,330
4/8			4928	2,560	1,261
Среднее значение				2,4	1,18

Анализируя таблицу 2, можно сказать, что в среднем системы функционального контроля, организованные на основе двухмодульных кодов, обнаруживают почти в 2,5 раза больше ошибок в информационных векторах, в отличие от классического кода с суммированием – $S(m,k)$ -кода. Для некоторых видов разбиения показатель Ψ^S стремится к значению 3.

Стоит отметить, что при такой модификации двухмодульные коды теряют свойства обнаруживать любые монотонные ошибки в информацион-

ных векторах, что присуще коду Бергера. Однако двухмодульные коды обнаруживают большее количество симметричных ошибок.

Распределение доли необнаруживаемых симметричных ошибок от общего их количества при длине информационного вектора $m = 9$ по кратностям представлено на рис. 8. Наблюдается некоторая зависимость количества необнаруживаемых ошибок от длины информационного вектора и количества разрядов в подмножестве D_1 . Так, при четном m , когда подмножество D_1 содержит четное количество разрядов, а подмножество D_2 содержит нечетное количество разрядов, или когда подмножество D_1 содержит нечетное количество разрядов, а количество разрядов в подмножестве D_2 не имеет значения, двухмодульными кодами обнаруживается 100 % симметричных ошибок кратности $d = m$. Если длина информационного вектора m – нечетное число, то двухмодульными кодами обнаруживается 100 % симметричных ошибок кратности $d = m - 1$ только в том случае, когда подмножества D_1 и D_2 содержат четное количество разрядов. Такая зависимость сохраняется и для $TM(8/4)(m,k,D_1/D_2)$ -кодов.

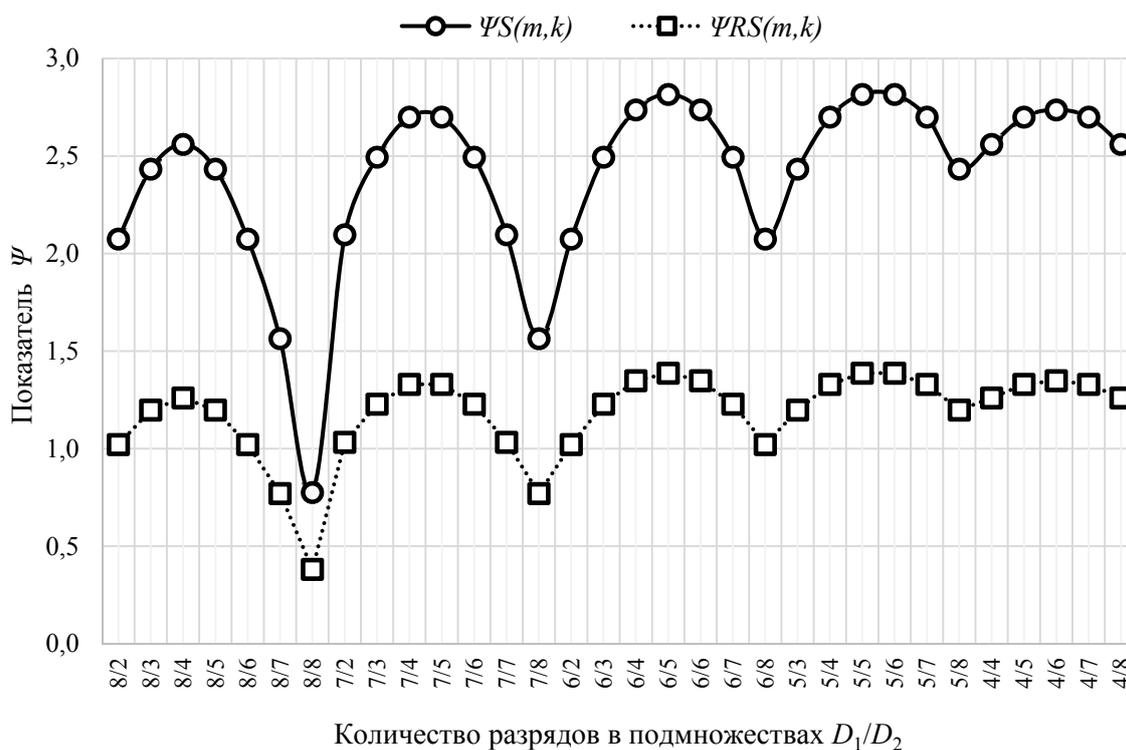


Рис. 7. Значения показателей Ψ^S , Ψ^{RS}

Опишем некоторые особенности обнаружения асимметричных ошибок двухмодульными кодами. Как и для симметричных ошибок, обнаружение асимметричных ошибок двухмодульными кодами также зависит от длины информационного вектора m и количества разрядов в первом и втором подмножествах D_1 и D_2 . Так, например, когда длина информационного вектора m является нечетным числом, тогда свойство обнаружения асим-

метричных ошибок кратности $d = m - 1$ будет такое же, как и при симметричных ошибках, а для обнаружения 100 % асимметричных ошибок кратности $d = m$ необходимо, чтобы соблюдалось условие: либо подмножество D_1 должно содержать четное количество разрядов и подмножество D_2 должно содержать нечетное количество разрядов, либо подмножество D_1 должно содержать нечетное количество разрядов независимо от того, какое количество разрядов будет содержаться во втором подмножестве D_2 и от длины информационного вектора m . При четном значении длины информационного вектора для обнаружения 100 % асимметричных ошибок кратностью $d = m - 1$ необходимо и достаточно, чтобы первое подмножество D_1 включало в себя четное количество разрядов. Двухмодульными кодами не обнаруживаются все ошибки кратностью $d = 6$. Кроме того, если одно из подмножеств содержит в себе всё множество разрядов, то двухмодульными кодами будут обнаружены все асимметричные ошибки кратностью $d = 1, 2, 3, 4, 5$.

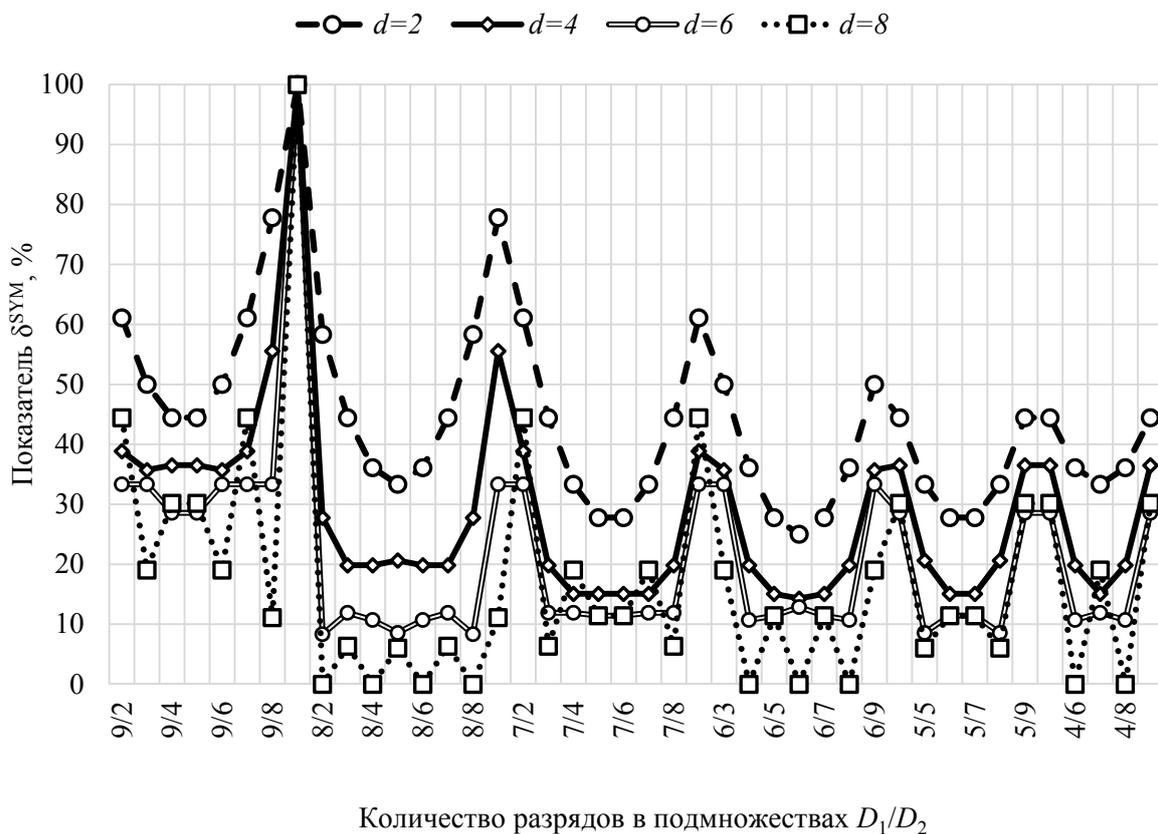


Рис. 8. Распределение доли необнаруживаемых симметричных ошибок по кратностям для $TM(4+4)(9,4,D_1/D_2)$

Стоит отметить, что, как и любые модульные коды с суммированием, двухмодульные коды сохраняют свойство не обнаруживать все монотонные ошибки кратности $d = M$. Все двухмодульные коды обнаруживают все

монотонные ошибки кратностью $d = 1, 2, 3$. На рис. 9 представлено распределение доли необнаруживаемых монотонных ошибок от общего их количества.

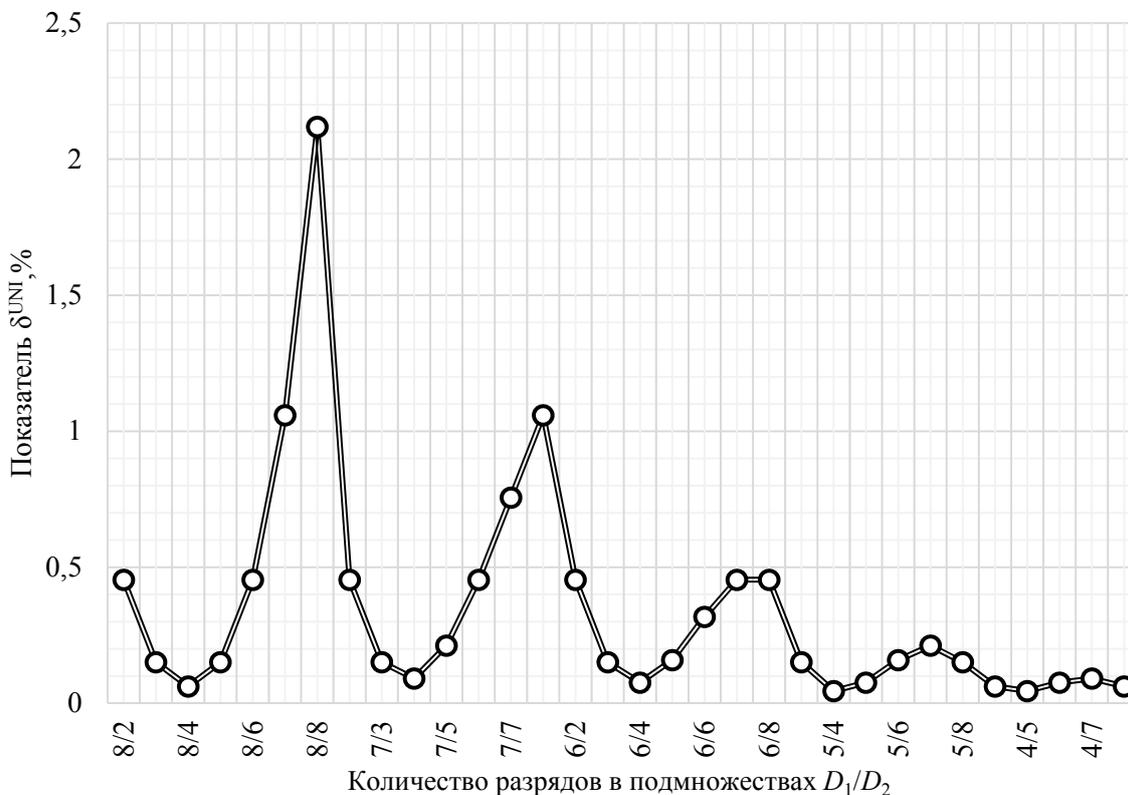


Рис. 9. Распределение доли необнаруживаемых монотонных ошибок для $TM(4+4)(8,4,D_1/D_2)$

Из графика видно, что наименьшим количеством необнаруживаемых ошибок обладают двухмодульные коды, в одном из подмножеств которых содержится количество разрядов, равное модулю счета M .

Немаловажно отметить еще одно свойство, которое заключается в том, что двухмодульными кодами обнаруживаются все ошибки нечетной кратности в том случае, если одно из подмножеств содержит в себе все разряды информационного вектора или одно из подмножеств дополняется до полного подмножества. Все указанные выше свойства принадлежат как $TM(4+4)(m,k,D_1/D_2)$ -кодам, так и $TM(8+4)(m,k,D_1/D_2)$ -кодам.

Таким образом, потеряв свойство обнаруживать 100 % однонаправленных ошибок, присущее S -, $RS(m,k)$ -кодам, $TM(M_1/M_2)(m,k,D_1/D_2)$ -коды за счет уменьшения количества необнаруживаемых симметричных ошибок способны уменьшать и общее количество необнаруживаемых ошибок, что делает эти коды своего рода «интересными» для дальнейшего их исследования и модификаций. Представленные выше утверждения о характеристиках обнаружения ошибок двухмодульными кодами могут быть полезны

для решения задач технической диагностики и организации систем с обнаружением неисправностей.

Известно, что системы функционального контроля обладают двумя основными характеристиками, такими как обнаруживающая способность и сложность технической реализации. Исследования этих характеристик подробно изложены в статье [21], где показано, что системы функционального контроля, организованные на основе двухмодульных кодов, имеют высокую обнаруживающую способность в сравнении с уже известными кодами с суммированием, а также меньшую структурную избыточность.

Заключение

Все модульные коды, классические и модифицированные коды с суммированием единичных информационных разрядов, изученные ранее, как теперь известно, являются частными случаями двухмодульных кодов. Исследование свойств и характеристик двухмодульных кодов позволило представить целостный образ кодов с суммированием. Главной особенностью описанного класса двухмодульных кодов является их многообразие и вариативность. Благодаря уникальным свойствам каждого двухмодульного кода разработчику на этапе проектирования системы функционального контроля предоставляется возможность подобрать такой код, который будет удовлетворять заданным требованиям как по обнаруживающей способности системы, так и по сложности ее реализации.

Надо отметить, что предложенный способ образования контрольных разрядов не является единственным, в дальнейшем контрольные слова могут быть образованы за счет не только суммирования по модулю единичных разрядов информационного вектора, но и весов этих разрядов, а также переходов между ними [29–31]. Показанное в статье превосходство двухмодульных кодов по сравнению с уже существующими кодами с суммированием дает перспективу дальнейшего их изучения и модификации.

Библиографический список

1. Pradhan D. K. Fault-Tolerant Computer System Design. – New York : Prentice Hall, 1996. – 560 p.
2. Ubar R., Raik J., Vierhaus H.-T. Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source). – Information Science Reference, Hershey – New York, IGI Global, 2011. – 578 p.
3. Hahanov V. Cyber Physical Computing for IoT-driven Services. – New York, Springer International Publishing AG, 2018. – 279 p.
4. Theeg G., Vlasenko S. Railway Signalling & Interlocking: 2nd Edition. – Germany, Hamburg: PMC Media House GmbH, 2018. – 458 p.

5. Сапожников В. В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов, Д. В. Гавзов ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : Транспорт, 1995. – 272 с.
6. Goessel M., Graf S. Error Detection Circuits. – London : McGraw-Hill, 1994. – 261 p.
7. Borecký J., Kohlík M., Kubátová H. Parity Driven Reconfigurable Duplex System // *Microprocessors and Microsystems*. – 2017. – Vol. 52. – Pp. 251–260. – DOI: 10.1016/j.micpro.2017.06.015.
8. Согомоян Е. С., Слабаков Е. В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. – М. : Радио и связь, 1989. – 208 с.
9. Nicolaidis M., Zorian Y. On-Line Testing for VLSI – A Compendium of Approaches // *Journal of Electronic Testing: Theory and Application*. – 1998. – Vol. 12. – Issue 1–2. – Pp. 7–20. – DOI: 10.1023/A:1008244815697.
10. Дрозд А. В. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем / А. В. Дрозд, В. С. Харченко, С. Г. Антошук и др. ; под ред. А. В. Дрозда и В. С. Харченко. – Харьков : Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2012. – 614 с.
11. Ryan W. E., Lin S. Channel Codes: Classical and Modern. – Cambridge University Press, 2009. – 708 p.
12. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov V. Generalized Algorithm of Building Summation Codes for the Tasks of Technical Diagnostics of Discrete Systems // *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. – Pp. 365–371. – DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110126.
13. Sellers F. F., Hsiao M.-Y., Bearson L. W. Error Detecting Logic for Digital Computers. – New York : McGraw-Hill, 1968, XXI + 295 p.
14. Piestrak S.J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. – Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. – 111 p.
15. Fujiwara E. Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. – John Wiley & Sons, 2006. – 720 p.
16. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды Хэмминга в системах функционального контроля логических устройств. – СПб. : Наука, 2018. – 151 с.
17. Stempkovskiy A., Telpukhov D., Gurov S., Zhukova T., Demeneva A. R-code for concurrent error detection and correction in the logic circuits // *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 29 January – 1 February 2018, Moscow, Russia. – Pp. 1430–1433. – DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317365.
18. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov V. Generic Two-Modulus Sum Codes for Technical Diagnostics of Discrete Systems Problems // *Proceedings of 14th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016)*, Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016. – Pp. 256–260. – DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807713.
19. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov V., Schagina V. The Analysis of Two-Modulus Codes Detection Ability with Summation of Unit Data Bits Compared to Classical and Modified Berger Codes // *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. – Pp. 141–148. – DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110134.
20. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. Two-Modulus Codes with Summation of One-Data Bits for Technical Diagnostics of Discrete Systems // *Automatic Control and Computer Sciences*. – 2018. – Vol. 52. – Issue 1. – Pp. 1–12. – DOI: 10.3103/S0146411618010029.
21. Сапожников В. В. Двухмодульные коды с суммированием единичных информационных разрядов в эксперименте по анализу структурной избыточности и обнаруживающей способности систем функционального контроля / В. В. Сапожников,

- Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, В. А. Щагина // Информатика и системы управления. – 2018. – № 1. – С. 75–87. – DOI: 10.22250/isu.2018.55.75-87.
22. Ефанов Д. В. Исследование двухмодульных кодов с суммированием единичных разрядов со счетом по модулю четыре / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Электронное моделирование. – 2018. – Том 40. – № 4. – С. 29–54. – DOI: 10.15407/emodel.40.04.029.
 23. Ефанов Д. В. Двухмодульные коды с суммированием – эффективный класс разделимых кодов для синтеза диагностического обеспечения устройств и систем управления // Информационные технологии. – 2019. – Том 25. – № 1. – С. 26–34. – DOI: 10.17587/it.25.26-34.
 24. Das D., Touba N.A. Synthesis of Circuits with Low-Cost Concurrent Error Detection Based on Bose-Lin Codes // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. – 1999. – Vol. 15. – Issue 1–2. – Pp. 145–155. – DOI: 10.1023/A:1008344603814.
 25. Блюдов А. А. О кодах с суммированием единичных разрядов в системах функционального контроля / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 8. – С. 131–145.
 26. Сапожников В. В. Эффективный способ модификации кодов с суммированием единичных информационных разрядов / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Известия вузов. Приборостроение. – 2017. – Т. 60. – № 11. – С. 1020–1032. – DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-11-1020-1032.
 27. 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.
 28. Блюдов А. А. Построение модифицированного кода Бергера с минимальным числом необнаруживаемых ошибок информационных разрядов / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Электронное моделирование. – 2012. – Том 34. – № 6. – С. 17–29.
 29. Сапожников В. В. Новые структуры систем функционального контроля логических схем / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, В. В. Дмитриев // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 2. – С. 127–143.
 30. Сапожников В. В. Модульно-взвешенные коды с суммированием с наименьшим общим числом необнаруживаемых ошибок в информационных векторах / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Электронное моделирование. – 2017. – Том 39. – № 4. – С. 69–88.
 31. Дмитриев В. В. Коды с суммированием с эффективным обнаружением двукратных ошибок для организации систем функционального контроля логических устройств / В. В. Дмитриев, Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2018. – № 4. – С. 105–122.

Vladislava A. Schagina

«Automation and remote control on railways» department
Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university

Two-modulo codes with summation for the organization of automation systems with fault detection

The article analyzes the methods of formation of codes with the summation of data bits. It is noted that the well-known modular codes with summation (either residual codes or Bose-Lin codes) are not the only class of codes with low redundancy that can be used in solving

problems of technical diagnostics and synthesis of test-able digital systems. The concept of multi-module code with summation and its subclass – two-module code is introduced. The results of studies of two-module codes with summation are presented, the advantages and disadvantages of two-module codes with summation are noted. The classification of codes with the summation of data bits is given.

technical diagnostics, digital systems, code with summation, Berger code, modular code with summation, Bose-Lin code, two-module code, data vector, error in the data vector.

References

1. Pradhan D. K. (1996) *Fault-Tolerant Computer System Design*. – New York : Prentice Hall, 1996. – 560 p.
2. Ubar R., Raik J., Vierhaus H.-T. (2011) *Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source)*. – Information Science Reference, Hershey – New York, IGI Global, 2011. – 578 p.
3. Hahanov V. (2018) *Cyber Physical Computing for IoT-driven Services*. – New York, Springer International Publishing AG. – 279 p.
4. Theeg G., Vlasenko S. (2018) *Railway Signalling & Interlocking: 2nd Edition*. – Germany, Hamburg: PMC Media House GmbH, 2018. – 458 p.
5. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Khristov Kh. A., Gavzov D. V. (1995) *Methods for building safety microelectronic systems for railway automatics [Metody postroeniya bezopasnyh mikroelektronnyh sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki]*, ed. Vl. V. Sapozhnikov, Moscow : Transport, 1995. – 272 p.
6. Goessel M., Graf S. (1994) *Error Detection Circuits*. – London : McGraw-Hill, 1994. – 261 p.
7. Borecky J., Kohlik M., Kubatova H. (2017) Parity Driven Reconfigurable Duplex System, *Microprocessors and Microsystems*, 2017, Vol. 52. – Pp. 251–260. – DOI: 10.1016/j.micpro.2017.06.015.
8. Sogomonyan E. S., Slabakov E. V. (1989) *Self-checking devices and fault-tolerant systems [Samoproveryaemye ustrojstva i otkazoustojchivye sistemy]*. Moscow : Radio & Communication [Radio i svyaz’], 1989. – 208 p.
9. Nicolaidis M., Zorian Y. (1998) On-Line Testing for VLSI – A Compendium of Approaches, *Journal of Electronic Testing: Theory and Application*, 1998, Vol. 12, Issue 1–2. – Pp. 7–20. – DOI: 10.1023/A:1008244815697.
10. *Objects and Methods of On-Line Testing for Safe Instrumentation and Control Systems [Rabochee diagnostirovanie bezopasnyh informatsionno-upravlyayushchih sistem]*, A. V. Drozd, V. S. Harchenko, S. G. Antoshchuk, Yu. V. Drozd, M. A. Drozd, Yu. Yu. Sulima, Pod red. A. V. Drozda i V. S. Harchenko. – Khar’kov : Natsional’nyj aerokosmicheskij universitet im. N. E. Zhukovskogo «KhAI», 2012. – 614 p.
11. Ryan W.E., Lin S. (2009) *Channel Codes: Classical and Modern*. – Cambridge University Press, 2009. – 708 p.
12. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl. (2017) Generalized Algorithm of Building Summation Codes for the Tasks of Technical Diagnostics of Discrete Systems // *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS’2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. – Pp. 365–37. – DOI:10.1109/EWDTS.2017.8110126.

13. Sellers F. F., Hsiao M.-Y., Bearnson L. W. (1968) Error Detecting Logic for Digital Computers. – New York : McGraw-Hill, 1968, XXI + 295 p.
14. Piestrak S. J. (1995) Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. – Wrocław : Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. – 111 p.
15. Fujiwara E. (2006) Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. – John Wiley & Sons, 2006. – 720 p.
16. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2018) Hamming Codes in Concurrent Error Detection Systems of Logic Devices [Kody Hemminga v sistemah funkcional'nogo kontrolya logicheskikh ustrojstv], St. Petersburg: Science [Nauka], 2018. – 151 p.
17. Stempkovskiy A., Telpukhov D., Gurov S., Zhukova T., Demeneva A. (2018) Rcode for concurrent error detection and correction in the logic circuits // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 29 January – 1 February 2018, Moscow, Russia. – Pp. 1430–1433. – DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317365.
18. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl. (2016) Generic Two-Modulus Sum Codes for Technical Diagnostics of Discrete Systems Problems // Proceedings of 14th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016. – Pp. 256–260. – DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807713.
19. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Schagina V. (2017) The Analysis of Two-Modulus Codes Detection Ability with Summation of Unit Data Bits Compared to Classical and Modified Berger Codes // Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. – Pp. 141–148. – DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110134.
20. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. (2018) Two-Modulus Codes with Summation of One-Data Bits for Technical Diagnostics of Discrete Systems // Automatic Control and Computer Sciences. – 2018. – Vol. 52. – Issue 1. – Pp. 1–12. – DOI: 10.3103/S0146411618010029.
21. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V., Schagina V. A. (2018) Two-modulus on-bits sum codes in the experiment with analysis of structural redundancy and detection capacity of functional control systems [Dvuhmodul'nye kody s summirovaniem edinichnyh informacionnyh razryadov v ehksperimente po analizu strukturnoj izbytochnosti i obnaruzhivayushchej sposobnosti sistem funkcional'nogo kontrolya], Information Science and Control Systems [Informatika i sistemy upravleniya], 2018, Issue 1. – Pp. 75–87. – DOI: 10.22250/isu.2018.55.75-87.
22. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. (2018) The research of two-modulus codes with summation of ones in data bits with calculation by modulo «four» [Issledovanie dvuhmodul'nyh kodov s summirovaniem edinichnyh razryadov so schetom po modulyu chetyre], Electronic Modeling [Elektronnoe modelirovanie]. – 2018, Vol. 40, Issue 4. – Pp. 29–54. – DOI: 10.15407/emodel.40.04.029.
23. Efanov D. V. (2019) Two-modulus codes with summation – an effective class of separable codes for the synthesis of diagnostic support for devices and control systems [Dvuhmodul'nye kody s summirovaniem – ehffektivnyj klass razdelimyyh kodov dlya sinteza diagnosticheskogo obespecheniya ustrojstv i sistem upravleniya], [Informacionnye tekhnologii], 2019, Vol. 25, Issue 1. – Pp. 26–34. – DOI:10.17587/it.25.26-34.
24. 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, 1999, Vol. 15, Issue 1–2. – Pp. 145–155. – DOI: 10.1023/A:1008344603814.

25. Blyudov A. A., Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V. (2014) On codes with summation of data bits in concurrent error detection systems [O kodah s summirovaniem edinichnyh razryadov v sistemah funkcional'nogo kontrolya], Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika], 2014, Issue 8. – Pp. 131–145.
26. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V., Efanov D. V. (2017) Effective method of modifying code with on-bits summation [Effektivnyj sposob modifikacii kodov s summirovaniem edinichnyh informacionnyh razryadov], Journal of Instrument Engineering [Izvestiya vuzov. Priborostroenie], 2017, Vol. 60, Issue 11. – Pp. 1020–1032, doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-11-1020-1032.
27. Berger J. M. (1961) 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.
28. Blyudov A. A., Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V. (2012) Formation of the Berger Modified Code with Minimum Number of Undetectable Errors of Informational Bits [Postroenie modifitsirovannogo koda Bergera s minimal'nym chislom neobnaruzhivaemyh oshibok informacionnyh razryadov], Electronic Modeling [Elektronnoe modelirovanie], 2012, Vol. 34, Issue 6. – Pp. 17–29.
29. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V., Efanov D. V., Dmitriev V. V. (2017) New structures of the concurrent error detection systems for logic circuits [Novye struktury sistem funkcional'nogo kontrolya logicheskikh skhem], Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika], 2017, Issue 2. – Pp. 127–143.
30. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V., Efanov D. V. (2017) Modulo weighted codes with summation with minimum number of undetectable errors in data vectors [Modul'no-vzveshennye kody s summirovaniem s naimen'shim obshchim chislom neobnaruzhivaemyh oshibok v informacionnyh vektorah], Electronic Modeling [Elektronnoe modelirovanie], 2017, Vol. 39, Issue 4. – Pp. 69–88.
31. Dmitriev V. V., Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V. (2018) Sum codes with efficient detection of twofold errors for organization of concurrent error-detection systems of logical devices [Kody s summirovaniem s ehffektivnym obnaruzheniem dvukratnyh oshibok dlya organizacii sistem funkcional'nogo kontrolya logicheskikh ustrojstv], Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika], 2018, Issue 4. – Pp. 105–122.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии В. И. Хахановым
Поступила в редакцию 01.11.2018, принята к публикации 25.01.2019*

ЩАГИНА Владислава Александровна – студентка кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» факультета «Автоматизация и интеллектуальные технологии» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I;

e-mail: vladislava1997@inbox.ru

© Щагина В. А., 2019

Подписано в печать с оригинал-макета 17.06.2019.
Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 17,25 Уч.-изд. л. 8,25.
Установочный тираж 500 экз. Заказ 911.

Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО ПГУПС,
190031, СПб., Московский пр., 9.