Автоматика на транспорте

Automation on Transport

№ 4

Том 3

Декабрь, 2017
December, 2017

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

ISSN 2412-9186
Индекс Роспечати 80525

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий (решение Президиума ВАК Минобрнауки РФ от 18.12.2017)

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 *Ю. А. Фаттаховой*
Литературное редактирование и корректура *И. А. Шабранской*
Верстка *А. А. Стукановой*

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017

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
ПИ № ФС77-61375 dd. 10.04.2015 issued by the Federal service for the monitoring of communications, information technologies and mass communications

ISSN 2412-9186
Index of Rospechat – 80525

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

Address
190031, Russia, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9, «Automation and remote control on railways» department,
+7 (812) 457-8579
at.pgups@gmail.com

Journal staff
English translation
Yu. A. Fattakhova
Editing and proofreading
Irina A. Shabranskaya
Layout *Anna A. Stukanova*

© PSTU, 2017

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

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

Виктор Кустов
кандидат техн. наук, профессор,
Украинская государственная академия
железнодорожного транспорта,
Харьков, Украина

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

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

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

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

Ефанов Дмитрий Викторович
кандидат техн. наук, научный редактор,
ответственный секретарь журнала
«Автоматика на транспорте»,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Баранов Леонид Аврамович
доктор техн. наук, профессор,
РУТ (МИИТ), Москва

Бестемьянов Петр Филимонович
доктор техн. наук, профессор,
РУТ (МИИТ), 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

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

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

Марлей Владимир Евгеньевич
доктор техн. наук, профессор,
ГУМРФ, Санкт-Петербург

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

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

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

Шаманов Виктор Иннокентьевич
доктор техн. наук, профессор,
РУТ (МИИТ), Москва

Ходаковский Валентин Аветикович
доктор техн. наук, профессор,
ПГУПС, Санкт-Петербург

International editorial board

Valeriy Sapozhnikov
D. Sc., Professor, 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

Alexander Dundua
D. Sc., Professor, Georgian technical university, Tbilisi, Georgia

Victor Kustov
Ph. D., Professor, Ukranian state railway transport academy, Kharkiv, Ukraine

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

Funian Hu
Ph. D., Professor, School of electrical engineering of Jiangsu normal university, Xuzhou City, China

Vladimir Hahanov
D. Sc., Professor, Kharkov national university of radio electronics, Kharkiv, Ukraine

Khristo Khristov
D. Sc., Professor, Technical university, Sofia, Bulgaria

Editorial team

Alexander B. Nikitin
D. Sc., Professor, deputy editor-in-chief of «Automation on Transport», Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university, St. Petersburg

Dmitry V. Efanov
Ph. D., executive editor and science editor of «Automation on transport», Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university, St. Petersburg

Leonid A. Baranov
D. Sc., Professor, Russian university of transport, Moscow

Petr 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

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

Vladimir E. Marley
D. Sc., Professor, Admiral Makarov state university of maritime and inland shipping, 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

Vladimir Vl. Sapozhnikov
D. Sc., Professor, 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

Володарский В. А.
Исследование надежности постовых устройств МПЦ EBILock 950 477

Богданов А. Г., Скороходов Д. А.
Принципы сбора данных об отказах элементов систем управления транспортными средствами 491

Системы и устройства автоматики и телемеханики

Долгий И. Д., Розенберг И. Н., Баяндурова А. А.
Синтез тесно интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы локомотива на основе аналитической модели его движения 506

Никитин Д. А.
Повышение информативности системы интервального регулирования движения поездов АЛС-ЕН путем использования модульно взвешенного кода с суммированием 526

Электронное моделирование

Никитчин А. А., Богданов Н. А., Рыбкин В. С.
Анализ существующих программных комплексов для построения геоинформационной системы управления работой структурных подразделений ОАО «РЖД» 546

Автоматизация проектирования

Седых Д. В., Зуев Д. В., Гордон М. А.
Отраслевой формат технической документации на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики. Часть 4: Представление элементов 563

Проектирование и тестирование логических устройств

Сапожников Вал. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.
Выбор модифицированного кода с суммированием единичных информационных разрядов для логических устройств с известной топологией 578

Пивоваров Д. В.
Организация систем функционального контроля комбинационных логических схем на основе метода логического дополнения по равновесному коду «1 из 5» 605

Из истории автоматики

Лупал Н. В.
Развитие устройств СЦБ в период империализма (1906–1917 гг.). Часть 4: Устройства защиты 625

Краткие сообщения

Ефанов Д. В.
Третья олимпиада по теоретическим дисциплинам кафедры автоматики и телемеханики на железных дорогах Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I 636

Список статей, опубликованных в 2017 году 646

CONTENTS

Viability, reliability, safety

V. A. Volodarskiy
The study of EBILock 950 interlocking tower equipment reliability 477

A. G. Bogdanov, D. A. Skorokhodov
Principles of data gathering about refusals of the equipment of vehicles at their operation 491

Systems and devices of automation and remote control

I. D. Dolgy, I. N. Rozenberg, A. A. Bayandurova
The synthesis of the tight coupling inertial-satellite navigation system locomotive based on the analytical model of it's movement 506

D. A. Nikitin
Information capacity improvement of collision avoidance system for integrated continous automatic cab signaling trains movement by means of modular weighted summation code 526

Electronic simulation

A. A. Nikitchin, N. A. Bogdanov, V. S. Rybkyn
The analysis of the existing software systems with the purpose of building a geographic information control system of JSC «Russian Railways» departments 546

Computer-aided design

D. V. Sedykh, D. V. Zuyev, M. A. Gordon
Branch format of technical documentation on devices of railway automation and remote control. Part 4. Presentation of elements 563

Design and test of logical devices

Val. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov
The selection of a modified code with summation of unit data bits for logical units with a given topology 578

D. V. Pyvovarov
Organization of concurrent error-detection systems of combinational logical circuits on the basis of Boolean complement method with «1-out-of-5» constant-weight code 605

History of automation

N. V. Lupal
Signals and interlocking development during imperialism (1906-1917). Part 4: Safety devices 625

Brief papers

D. V. Efanov
The third Olympiad on theoretical disciplines of automation and remote control on railways department at Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university 636

List of articles published in 2017 646

Живучесть, надежность, безопасность

УДК 621.3.019

В. А. Володарский, канд. техн. наук
Кафедра «Системы обеспечения движения поездов»,
Красноярский институт железнодорожного транспорта

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПОСТОВЫХ УСТРОЙСТВ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ЦЕНТАРЛИЗАЦИИ EBILOCK 950

В статье представлена структурная схема и изложены результаты исследований надежности работы постовых устройств микропроцессорной централизации EBILock 950 как без учета, так и с учетом технического обслуживания. Показана возможность «управления» значением интенсивности отказов резервированных подсистем постовых устройств МПЦ посредством технического обслуживания. Приведен сравнительный анализ надежности работы постовых устройств системы микропроцессорной централизации EBILock 950 и систем электрической релейной централизации в реальных условиях эксплуатации Красноярской дороги.

элемент; подсистема; резервирование; система; наработка до отказа; интенсивность отказов; техническое обслуживание

Введение

Повышение надежности технических средств в эксплуатации – одно из важнейших условий эффективной и безопасной работы железнодорожного транспорта [1]. В связи с этим одна из задач при создании системы управления ресурсами, рисками и анализом надежности (УРРАН) – разработка методологии управления надежностью объектов железнодорожного транспорта, включая систему показателей эксплуатационной надежности, методы их расчета и анализа [2]. Появившиеся в последние годы на сети российских железных дорог микропроцессорные системы автоматики и телемеханики обусловливают новые требования к определению их надежностных характеристик [3].

Известно, что для обеспечения высокой надежности работы любой системы необходимо комбинированное применение как структурного резервирования, так и профилактического обслуживания [4]. Согласно [5] достижение надежности систем в эксплуатации зависит от технического обслуживания (ТО), его организации и необходимых ресурсов. Различают два вида ТО [5]:

1) профилактическое – для обнаружения скрытых неисправностей и снижения вероятности отказов;

2) корректирующее – для восстановления функционирования после отказов.

Эксплуатируемая на сети железных дорог микропроцессорная система централизации (МПЦ) EBILock 950 относится к обслуживаемым системам с широким применением и структурным резервированием.

Цель статьи – исследование надежности работы постовых устройств МПЦ EBILock 950.

1 Структурная схема для исследования надежности

В результате анализа функционирования составлена структурная схема для исследования надежности работы постовых устройств МПЦ EBILock 950 (рис. 1), в состав которой входят следующие подсистемы:

A – подсистема органов управления и контроля автоматизированного рабочего места дежурного по станции (АРМ ДСП), включающая два системных блока, связанные с двумя мониторами и более, двумя клавиатурами и манипуляторами типа «мышь»;

B – подсистема локальной вычислительной сети между АРМ ДСП и центарльным процессором (ЦП), включающая в себя коммутаторы, кабели типа «витая пара» UTP (в связи с небольшой длиной в расчете показателей надежности кабели приняты как абсолютно надежные);

C – подсистема обработки зависимостей и логики, включающая в себя два комплекта центрального процессора;

D – подсистема волоконно-оптической и (или) кабельной линии связи между ЦП и концентраторами информации, включающая в себя коммутаторы, волоконно-оптические кабели и (или) кабели связи с медными жилами (в связи с небольшой длиной в расчете показателей надежности кабели связи с медными жилами приняты как абсолютно надежные);

E – подсистема концентраторов информации, включающая в себя резервированные в нагруженном режиме интерфейсные платы COM3, OCT и кабели связи (в связи с небольшой длиной в расчете показателей надежности кабели приняты как абсолютно надежные);

F – подсистема устройств сопряжения с объектами железнодорожной автоматики (объектные контроллеры), включающая в себя интерфейсные платы управления напольными и постовыми устройствами автоматики (CCM, MOT1, LMP, SRC).

Как видно, структурная схема представляет собой последовательную схему соединенных между собой пяти резервированных подсистем, кроме подсистемы F, в которой объектные контроллеры логически соединены последовательно, без резерва. При этом связь между центральным процессором и концентраторами информации организована посредством резервированной

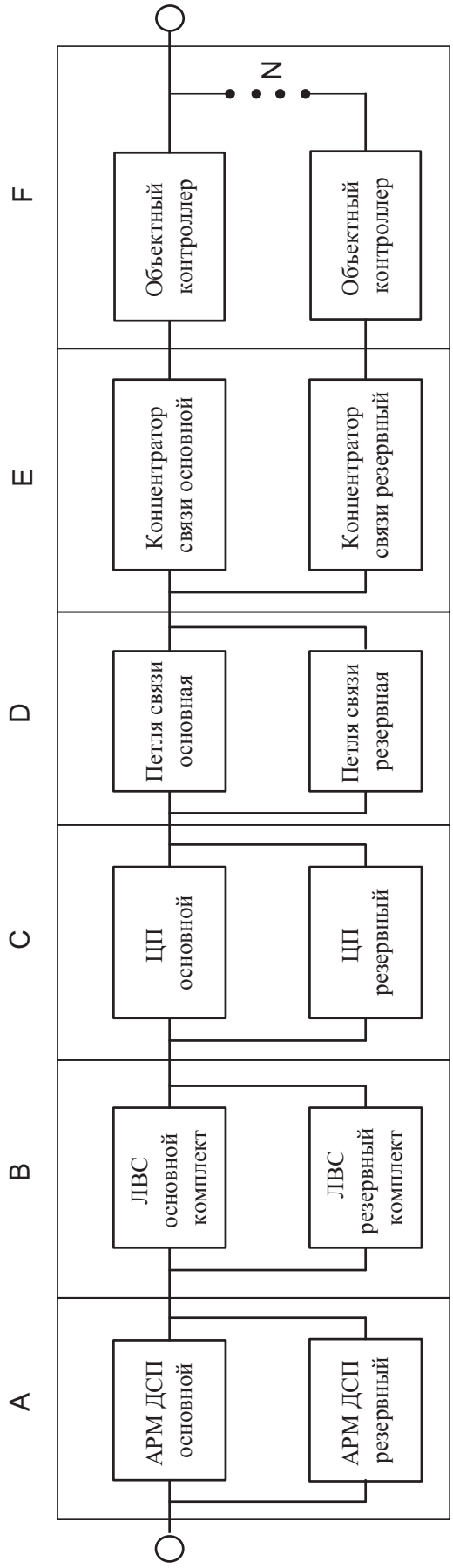


Рис. 1. Структурная схема для исследования надежности

в нагруженном режиме петли связи. Связь между концентратором информации и объектными контроллерами реализована по шине данных – логической схеме «звезда». В одну петлю связи включается до 8 объектных контроллеров. Количество петель связи и интерфейсных плат (MOT1, LMP, SRC) объектных контроллеров зависит от оснащенности станции устройствами СЦБ.

2 Исследования надежности без учета технического обслуживания

Для определения показателей надежности МПЦ использованы выражения, представленные в [6], при выводе которых приняты следующие допущения:

1) рассматриваются только внезапные отказы, когда наработка элементов до отказа описывается экспоненциальным законом распределения; в связи с этим под элементами нестареющего типа будем понимать такие, которые подвержены только внезапным отказам с постоянной интенсивностью;

2) время восстановления отказавших элементов намного меньше наработки их до отказа;

3) все отказы элементов независимы друг от друга, а вероятность одновременного отказа двух и более элементов практически равна нулю;

4) переключение на резервную подсистему происходит практически мгновенно.

Исходные данные для расчета надежности МПЦ EBILock 950 предоставлены разработчиком системы ООО «Бомбардье Транспортейшн (Сигнал)».

Показатели надежности, согласно [6], без учета ТО:

– интенсивность отказов цепи из последовательно соединенных элементов:

$$\lambda_{\text{ц}} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i,$$

где λ_i – интенсивность отказов i-го элемента;

– наработка до отказа цепи из последовательно соединенных элементов:

$$T_{\text{ц}} = 1 / \lambda_{\text{ц}};$$

– наработка до отказа резервируемой подсистемы:

$$T_{\text{пс}} = 1{,}5 / \lambda_{\text{ц}}.$$

Результаты расчетов перечисленных показателей надежности подсистем МПЦ представлены в табл. 1. Как видно из таблицы, самой ненадежной является подсистема органов управления и контроля (подсистема А на рис. 1).

Интенсивность отказов резервированных подсистем без учета ТО определяется по формуле [6]

$$\lambda(t)_{\text{пс}} = \frac{2\lambda_{\text{ц}}(1 - e^{-\lambda_{\text{ц}} \cdot t})}{2 - e^{-\lambda_{\text{ц}} \cdot t}}.$$

Таблица 1. Показатели надежности подсистем МПЦ

Цепь	**Подсистема**	**Интенсивность отказов цепи $\lambda_{\text{ц}} \cdot (1 \cdot 10^{-6}/\text{ч})$**	**Наработка до отказа цепи $T_{\text{ц}}$ (год)**	**Наработка до отказа подсистемы $T_{\text{пс}}$ (год)**
Системный блок АРМ, монитор, клавиатура, манипулятор «мышь»	Органы управления и контроля	72,5	1,6	2,4
Коммутатор (медь) и кабель «витая пара»	Локальная вычислительная сеть между АРМ ДСП и ЦП	3,03	37	56
Центральный процессор	Обработка зависимостей и логики	26,55	4,3	6,4
Коммутатор, волоконно-оптические кабели и (или) кабели связи с медными жилами	Волоконно-оптические и (или) кабельные линии связи между ЦП и концентраторами информации	5,28	21,6	32,4
Интерфейсные платы COM3, ОСТ и кабели связи	Концентраторы информации	5,53	20,6	30,9

Результаты расчетов представлены в виде зависимостей интенсивности отказов резервированных подсистем от времени эксплуатации на рис. 2–6 (на рисунках: *1* – интенсивность отказов цепи из последовательно соединенных элементов; *2* – интенсивность отказов резервированной подсистемы; *3* – среднее результирующее значение интенсивности отказов).

На рис. 7 представлена зависимость интенсивности отказов постовых устройств МПЦ EBILock 950 от времени эксплуатации как геометрическая сумма интенсивностей отказов составляющих ее последовательно соединенных резервированных подсистем, представленных кривыми *2* на рис. 2–6.

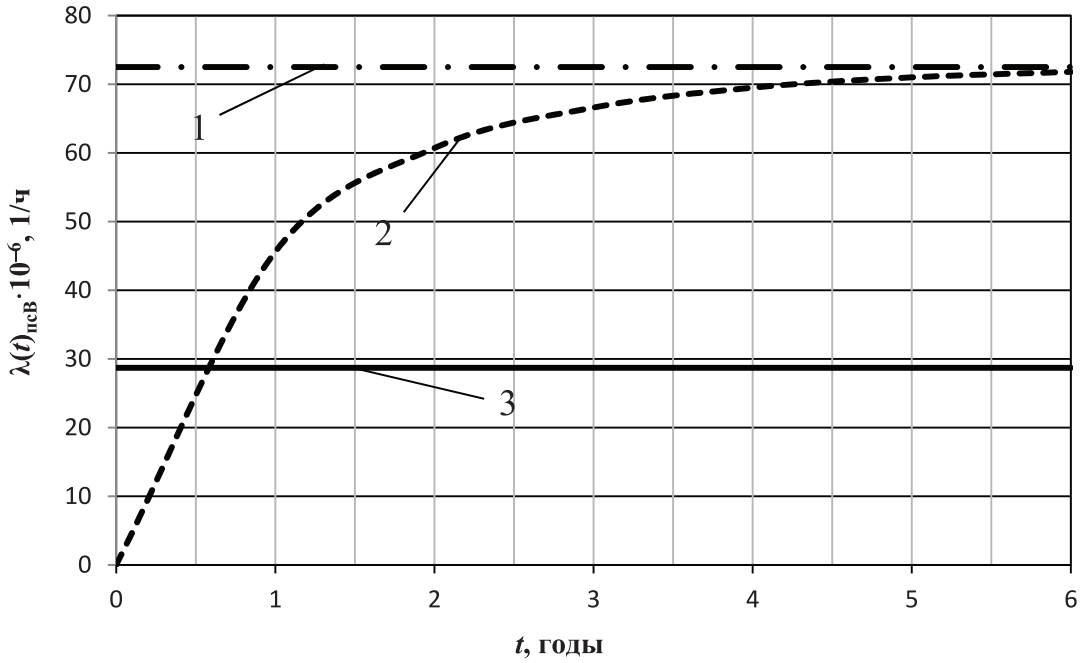


Рис. 2. Зависимости интенсивности отказов подсистемы А от времени эксплуатации

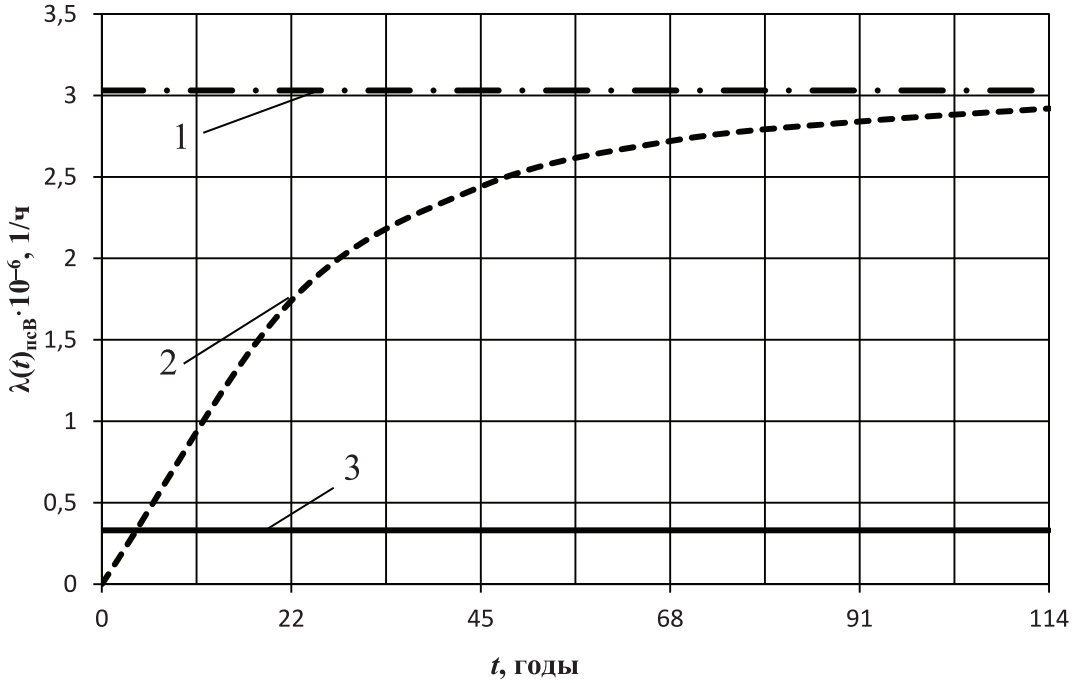


Рис. 3. Зависимости интенсивности отказов подсистемы В от времени эксплуатации

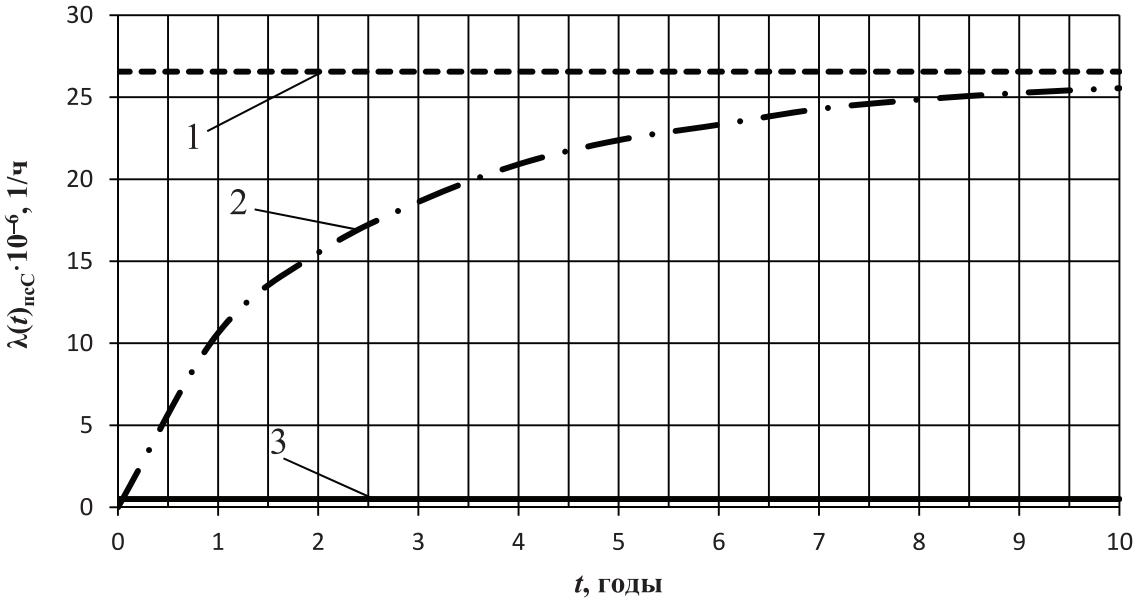


Рис. 4. Зависимости интенсивности отказов подсистемы C от времени эксплуатации

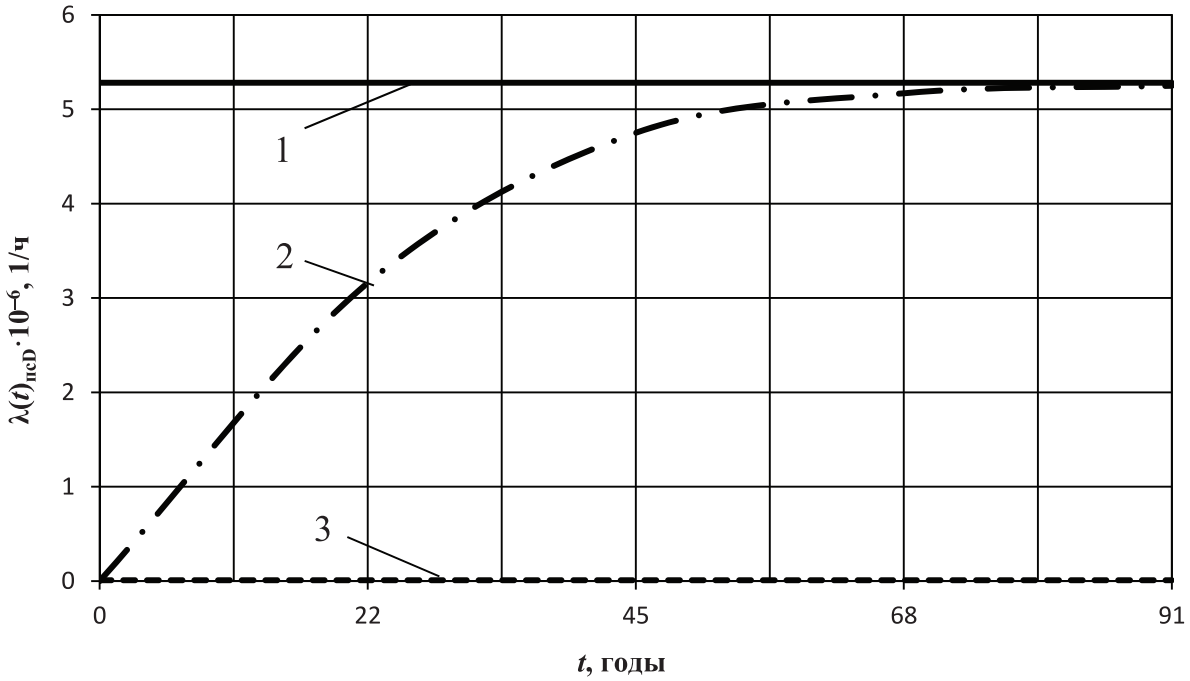


Рис. 5. Зависимости интенсивности отказов подсистемы D от времени эксплуатации

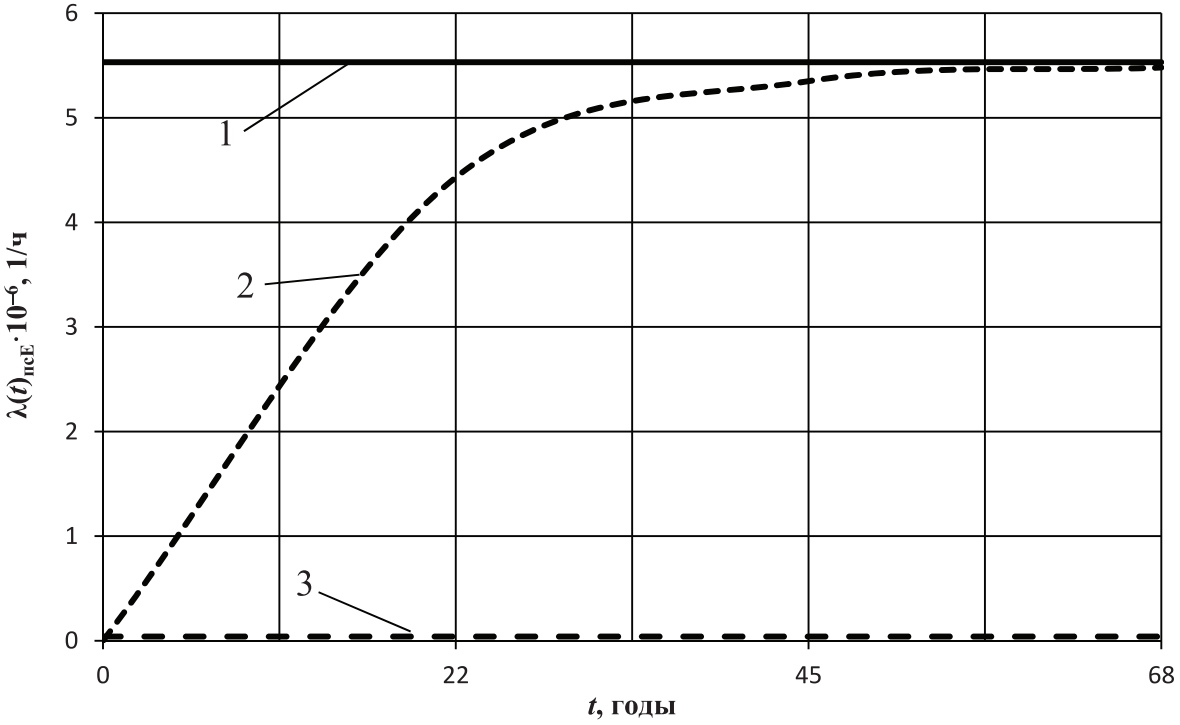


Рис. 6. Зависимости интенсивности отказов подсистемы Е от времени эксплуатации

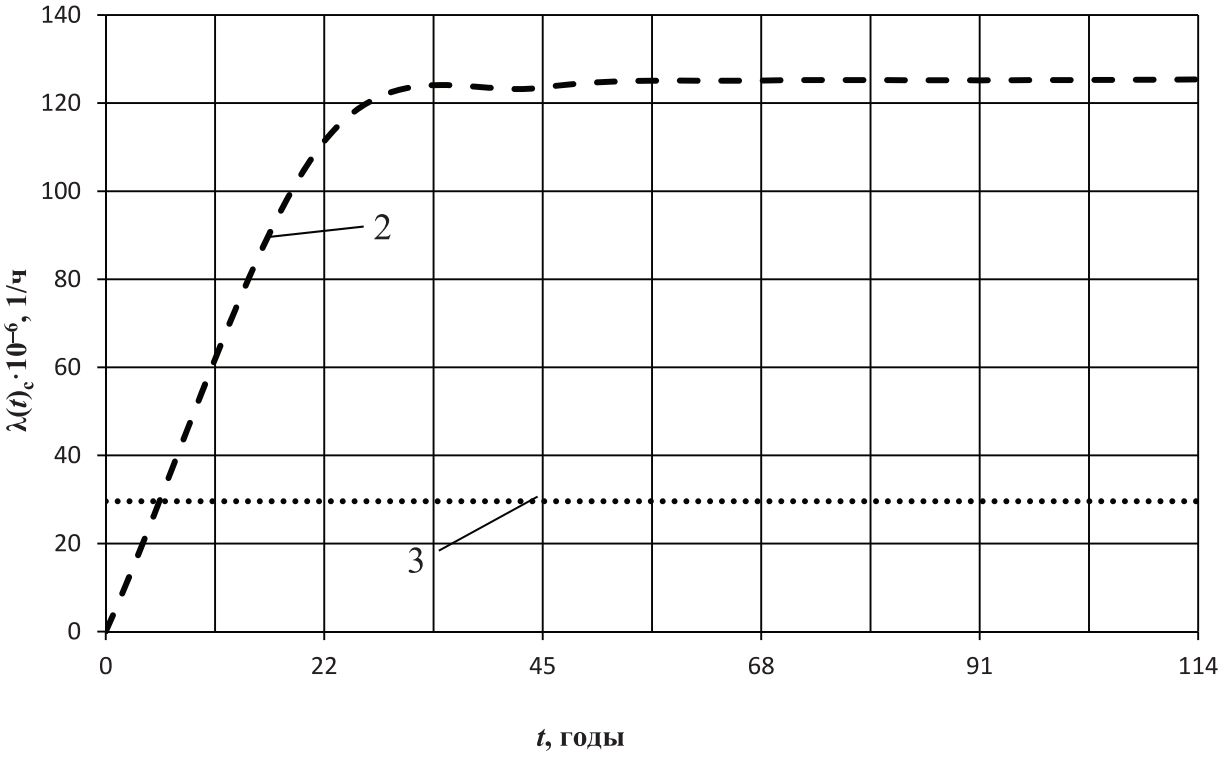


Рис. 7. Зависимость интенсивности отказов постовых устройств МПЦ EBILock 950 от времени эксплуатации

Исследования показывают, что самым наглядным показателем надежности является интенсивность отказов подсистем и постовых устройств МПЦ EBILock 950 в целом. Как видно из представленного графического материала, характерной особенностью резервированных структур является плавное возрастание интенсивности отказов от нулевого значения до интенсивности отказов нерезервированной цепи. Поэтому появляется возможность активного воздействия на интенсивность отказов посредством ТО.

3 Исследования надежности с учетом технического обслуживания

При проведении в соответствии с нормативными документами [7–9] профилактического технического обслуживания резервированных подсистем с периодичностью τ и диагностированием состояния и заменой элементов при необходимости плавные кривые интенсивности отказов от времени эксплуатации заменяются на пилообразные кривые с размахом от нуля до $\lambda(\tau)$, а затем от $\lambda(\tau)$ до нуля, как показано на рис. 8. Таким образом, после проведения ТО прерывается рост интенсивности отказов и «время жизни» резервированных подсистем как бы «возвращается» к нулевому значению. При уменьшении периодичности ТО максимумы пилообразных кривых снижаются.

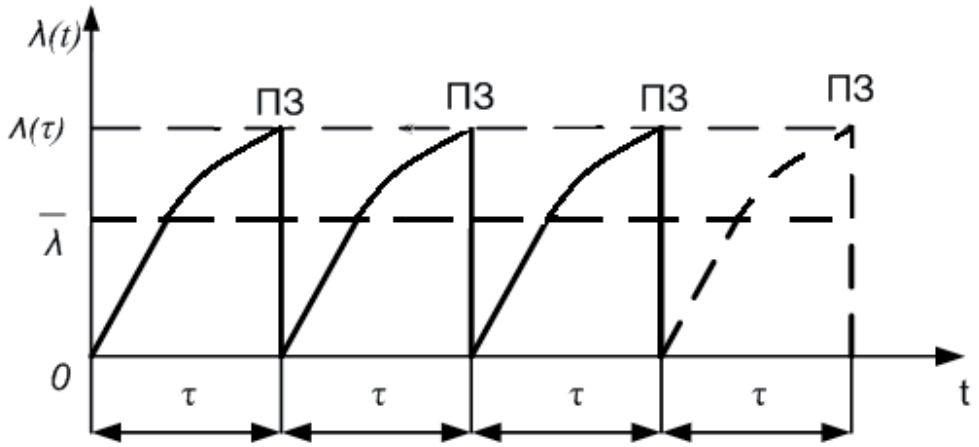


Рис. 8. Изменение интенсивности отказов при техническом обслуживании резервированных подсистем

Среднее результирующее значение интенсивности отказов резервированных подсистем $\overline{\lambda}_{\text{пс}}$ (см. рис. 8) определяется согласно [4]:

$$\lambda_{\text{пс}} = \lambda_{\text{ц}} - (\ln(2 - e^{-\lambda_{\text{ц}}\tau})) / \tau .$$

Как видно из этого выражения, изменяя периодичность технического обслуживания τ, можно «управлять» значением интенсивности отказов ре-

зервированных подсистем. Очевидно, что чем чаще проводится ТО, тем ниже среднее результирующее значение интенсивности отказов. Результаты расчетов значений $\overline{\lambda}_{пс}$ при существующей периодичности технического обслуживания подсистем представлены в табл. 2 и прямыми *3* на рис. 2–6. Среднее результирующее значение интенсивности отказов постовых устройств МПЦ EBILock 950 определяется как арифметическая сумма значений $\overline{\lambda}_{пс}$, представленных в табл. 2, которая равна $29{,}59 \cdot 10^{-6}$ 1/ч (см. рис. 7, прямая *3*).

Таблица 2. Средние результирующие значения интенсивности отказов при существующей периодичности технического обслуживания подсистем

№	Цепь	Подсистема	Среднее результирующее значение интенсивности отказов подсистемы $\overline{\lambda}_{пс}$ $(1 \cdot 10^{-6}/ч)$	Периодичность технического обслуживания
1	Системный блок АРМ, монитор, клавиатура, манипулятор «мышь»	Органы управления и контроля	28,7	1 раз в год
2	Коммутатор (медь) и кабель «витая пара»	Локальная вычислительная сеть между АРМ ДСП и ЦП	0,33	1 раз в год
3	Центральный процессор	Обработка зависимостей и логики	0,51	1 раз в месяц
4	Коммутатор, волоконно-оптические кабели и (или) кабели связи с медными жилами	Волоконно-оптические и (или) кабельные линии связи между ЦП и концентраторами информации	0,008	2 раза в год
5	Интерфейсные платы COM3, ОСТ и кабели связи	Концентраторы информации	0,04	1 раз в месяц

Как видно из полученных результатов, наибольшую величину среднего результирующего значения интенсивности отказов имеют устройства подсистемы органов управления и контроля (подсистема А). Следовательно, необходимо чаще проводить ТО этой подсистемы с изменением содержания, предусматривающего профилактическую замену ненадежных элементов (вентиляторов, конденсаторов, аккумуляторов и др.), или применять более надежные элементы, как это показано в [4]. Например, при изменении перио-

дичности и содержания технического обслуживания АРМ ДСП с одного раза в год до одного раза в квартал среднее результирующее значение интенсивности отказов постовых устройств МПЦ может быть снижено на 67% (за счет снижения среднего результирующего значения интенсивности отказов подсистемы А с $28{,}7 \cdot 10^{-6}$ до $9 \cdot 10^{-6}$ 1/ч).

Таким образом, варьируя периодичность и содержание технического обслуживания, можно обеспечить заданное согласно [10, 11] допустимое значение интенсивности отказов постовых устройств МПЦ EBILock 950. В этом заключается одно из основных преимуществ функционирования постовых устройств МПЦ EBILock 950 по сравнению с релейными нерезервируемыми системами электрической централизации.

Для примера сравним попарно надежность работы постовых устройств МПЦ и релейных систем электрической централизации двух малых и двух средних станций с равной технической оснащенностью, эксплуатируемых на линии первого класса Красноярской железной дороги:

– Сорокино (МПЦ EBILock 950, 18 стрелок) и Филимоново (ЭЦ-9, 19 стрелок);

– Заозерная (МПЦ EBILock 950, 56 стрелок) и Канск-Енисейский (МРЦ-9, 47 стрелок).

За последние три года эксплуатации (2014–2016) на станции Сорокино отказов постовых устройств МПЦ не было. На станции Филимоново допущен один отказ – невозможность открытия выходного светофора по причине переходного сопротивления в плате реле НМШМ2-3000. На станции Заозерная допущен один отказ – потеря контроля положения стрелки по причине неисправности интерфейсной платы МОТ, находящейся в нерезервируемой подсистеме объектных контроллеров. При этом на станции Канск-Енисейский допущено три отказа: ложная занятость рельсовых цепей по причине неисправности реле ФУ2М-1 и невозможность открытия светофоров по причине переходных сопротивлений в плате блоков ВП.

Представленные данные подтверждают результаты исследований и вывод о эффективности применения резервирования и технического обслуживания в целях повышения надежности функционирования постовых устройств МПЦ EBILock 950.

Заключение

Исследования показали, что самым эффективным методом обеспечения надежности работы постовых устройств МПЦ EBILock 950 является совместное применение резервирования и технического обслуживания. Кроме того, за счет использования резервирования в системе EBILock 950 возможно проводить техническое обслуживание без отключения устройств, что, в свою

очередь, позволяет значительно снизить интенсивность отказов. При этом, варьируя периодичность и содержание технического обслуживания, можно обеспечить заданное допустимое значение интенсивности отказов постовых устройств МПЦ EBILock 950. Это подтверждается и сравнительным анализом надежности работы постовых устройств системы МПЦ EBILock 950 и систем электрической релейной централизации в реальных условиях эксплуатации на Красноярской железной дороге.

Таким образом, после внедрения МПЦ EBILock 950 появляется возможность обеспечения практически безотказной работы постовых устройств на станциях. В результате снижается риск нарушения безопасности движения поездов.

Библиографический список

1. Гапанович В. А. Обеспечивать надежную работу технических средств / В. А. Гапанович // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 9. – С. 2–5.
2. Гапанович В. А. Развитие и внедрение технологии УРРАН на железнодорожном транспорте / В. А. Гапанович // Надежность. – 2013. – № 4. – С. 3–10.
3. Шалягин Д. В. Надежность и безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Шалягин, И. Б. Шубинский // Автоматика, связь, информатика. – 2005. – № 5. – С. 23–25.
4. Володарский В. А. Сравнение методов повышения надежности / В. А. Володарский // Методы менеджмента качества. – 2016. – № 5. – С. 50–54.
5. ГОСТ 27.601–2011. Надежность в технике. Управление надежностью. Техническое обслуживание и его обеспечение. – М. : Стандартинформ, 2012. – 29 с.
6. Володарский В. А. О расчете надежности систем из элементов нестареющего типа / В. А. Володарский // Методы менеджмента качества. – 2017. – № 3. – С. 42–47.
7. Инструкция по техническому обслуживанию и ремонту устройств и систем сигнализации, централизации и блокировки : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 30.12.2015. № 3168 р. – М. : ОАО «РЖД», 2011. – 35 с.
8. Технологические карты по техническому обслуживанию МПЦ EBILock 950 : утв. ЦШ от 30.03.2006. – М. : Трансиздат, 2006. – 207 с.
9. Методические указания по техническому обслуживанию микропроцессорных систем и устройств железнодорожной автоматики и телемеханики сервисным методом : утв. распоряжением ОАО «РЖД» № ИСХ-23008 от 11.12.2009. – М. : ОАО «РЖД», 2009. – 34 с.
10. СТО РЖД 1.19.004–2008. Автоматизированные системы управления движения поездов на станциях. Общие технические требования : утв. распоряжением ОАО «РЖД» № 2898 р от 30.12.2008. – М. : ОАО «РЖД», 2008. – 36 с.
11. Методическое руководство по управлению ресурсами и рисками в хозяйстве автоматики и телемеханики на основе методологии УРРАН : утв. ОАО «РЖД» от 08.12.2012. – М. : ОАО «РЖД», 2012. – 167 с.

Vladislav A. Volodarskiy
«Propulsion system of trains» chair
Krasnoyarsk institute of railway transport

The study of EBILock 950 interlocking tower equipment reliability

A type diagram of EBILock 950 microprocessor interlocking tower equipment, as well as the research results of the tower equipment reliability, was presented in the article, both taking into account and without considering maintenance. The ability to «control» the level of failure rate of redundant subsystems of interlocking tower equipment by means of maintenance was demonstrated. The comparative analysis of EBILock 950 microprocessor interlocking tower equipment reliability and electrical relay interlocking systems under actual Krasnoyarsk road operating conditions was given.

element; subsystem; backup; system; time to failure; failure rate; maintenance

References

1. Gapanovich V.A. (2008). Ensure reliable operation of technical means [Obespechivat' nadezhnuyu rabotu tekhnicheskih sredstv]. Raylways Transport [Zheleznodorozhnyj transport], issue 9. – Pp. 1–6.
2. Gapanovich V.A. (2013). Development and introduction of URAN technology in railway transport [Razvitie i vnedrenie tekhnologii URRAN na zheleznodorozhnom transporte]. Reliability [Nadezhnost'], issue 4. – Pp. 3–10.
3. Shalyagin D.V., Shubinskij I.B. (2005). Reliability and safety of railway automation and telemechanics [Nadezhnost' i bezopasnost' zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki]. Automation, communication, information science [Avtomatika, svyaz', informatika], issue 5. – Pp. 23–25.
4. Volodarskij V.A. (2016). Comparison of reliability improvement methods [Sravnenie metodov povysheniya nadezhnosti]. Methods of quality management [Metody menedzhmenta kachestva], issue 5. – Pp. 50–54.
5. GOST 27.601–2011. Reliability in engineering. Reliability management. Maintenance and support [GOST 27.601–2011. Nadezhnost' v tekhnike. Upravlenie nadezhnost'yu. Tekhnicheskoe obsluzhivanie i ego obespechenie]. Moscow, National Standard of the Russian Federation [Nacional'nyj standart rossijskoj federacii]. – 29 p.
6. Volodarskij V.A. (2017). On the calculation of the reliability of systems of non-aging type elements [O raschete nadezhnosti sistem iz ehlementov nestareyushchego tipa].Methods of quality management [Metody menedzhmenta kachestva], issue 3. – Pp. 50–55.
7. The instruction on maintenance and repair of devices and systems of signaling, centralization and blocking, approved by the decree of JSC «Russian Railways» dated 30.12.2015 N 3168p [Instrukciya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu ustrojstv i sistem signalizacii, centralizacii i blokirovki, utverzhdena rasporyazheniem

OAO «RZHD» ot 30.12.2015. N 3168r]. Moscow, JSC «Russian railways» [OAO «RZHD»]. – 35 p.
8. Technological maintenance cards for microprocessor interlocking EBILock 950, approved by the TSh of March 30, 2006 [Tekhnologicheskie karty po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu MPC EBILock 950, utverzhdeny CSH ot 30.03.2006 g]. Moscow, Transizdat [Izdatel'stvo «Tranzisdat»]. – 207 p.
9. Methodical instructions for maintenance of microprocessor systems and railway automation and telemechanics devices by the service method are approved by the decree of JSC «Russian railways» N ISH-23008 dd. 11.12.2009 [Metodicheskie ukazaniya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu mikroprocessornyh sistem i ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki servisnym metodom, utverzhdeny rasporyazheniem OAO «RZHD» N ISKH-23008 ot 11.12.2009]. Moscow, JSC «Russian railways» [OAO «RZHD»]. – 34p.
10. STO RZhD 1.19.004–2008. Automated train control systems at stations. General technical requirements, approved by the decree of JSC «Russian Railways» N 2898r dated 30.12.2008 [STO RZHD 1.19.004–2008. Avtomatizirovannye sistemy upravleniya dvizheniya poezdov na stanciyah. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya, utverzhden rasporyazheniem OAO «RZHD» N 2898r ot 30.12.2008]. Moscow, JSC «Russian Railways» [OAO «RZHD»]. – 36p.
11. Methodical guide for managing resources and risks in the economy of automatics and teleautomatics on the basis of the URAN methodology, approved by JSC «Russian railways» of 08.12.2012 [Metodicheskoe rukovodstvo po upravleniyu resursami i riskami v hozyajstve avtomatiki i telemekhaniki na osnove metodologii URRAN, utverzhdeno OAO «RZHD» ot 08.12.2012 g]. Moscow, JSC «Russian Railways» [OAO «RZHD»]. – 167 p.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А. Б. Никитиным
Поступила в редакцию 19.06.2017, принята к публикации 25.08.2017

ВОЛОДАРСКИЙ Владислав Афанасьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры «Системы обеспечения движения поездов» Красноярского института железнодорожного транспорта.
e-mail: volodarsky.vladislav@yandex.ru

© Володарский В. А., 2017

УДК 681.518.54:629.12.066

А. Г. Богданов
ЗАО «Центральный научно-исследовательский институт
судового машиностроения»

Д. А. Скороходов, д-р техн. наук
Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко
Российской академии наук

ПРИНЦИПЫ СБОРА ДАННЫХ ОБ ОТКАЗАХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ СРЕДСТВАМИ

В статье рассмотрены принципы сбора статистических данных об отказах и ремонте элементов систем управления транспортных средств, обеспечивающие возможность получения характеристик их надежности во время эксплуатации. Представлена математическая модель функционирования систем управления в процессе их эксплуатации. Сбор статистических данных об отказах усложняется тем обстоятельством, что сложные системы работают в режиме смены отказавших элементов. При таком режиме работы предложено не только фиксировать время между отказами, но и учитывать факты замен данного отказавшего элемента. Заполняя карточку отказов, недостаточно указать их вид, причину и дату, необходимо в каждом случае отказа анализировать весь журнал эксплуатации данного устройства. При анализе надежности необходимо, чтобы математическая модель функционирования оборудования в процессе его эксплуатации соответствовала реальной эксплуатации объекта. Математические модели, в соответствии с теорией надежности, строятся в предположении, что достоверно известно время между отказами каждого элемента сложной системы при условии непрерывной их работы. Тогда можно определить любой показатель надежности.

данные; модель; надежность; объект; оборудование; отказ; принципы; сбор; характеристики; эксплуатация

Введение

Работы по анализу надежности [1–7] касались расчета показателей отдельных систем, характеризуемых особенностями эксплуатации, но, к сожалению, в них не принимался во внимание сбор практических данных эксплуатации, позволяющих получить реальные характеристики надежности тех или иных систем. Сбор статистических данных об отказах и ремонтах элементов систем управления, если таковой и происходил, чаще всего не был автоматизирован. Эту работу выполнял обслуживающий персонал. Получить в этом случае объективную статистику о надежности систем управления в процессе ее эксплуатации чрезвычайно трудно. Это объясняется следующими причинами:

1. Отказы иногда возникают по вине обслуживающего персонала. «Человеческий фактор» сказывается и на том, что статистика ведется небрежно, а факты отказов часто скрываются.

2. Во многих случаях сбор статистики ведется неквалифицированно.

3. Полученные данные не дают возможности объективно судить о надежности техники, так как не отражают физической сущности явлений, а поэтому не поддаются математической обработке.

Рассмотрим эти вопросы более подробно.

При сборе статистических данных об отказах необходимо иметь в виду, что случайной величиной при оценке надежности является время между отказами, а при оценке ремонтопригодности – длительность времени ремонта. Получить эти данные легко лишь в том случае, если техника работает непрерывно, без выключения. Тогда достаточно фиксировать лишь дату отказа. На практике же техника, как правило, работает с перерывами, вызванными отсутствием необходимости ее использования, профилактическими мероприятиями, ремонтами, плохой организацией эксплуатации и другими причинами. При сборе статистических данных об отказах в этих условиях необходимо фиксировать не только дату отказа, но также суммарное время работы между отказами, исключив время нерабочего состояния техники.

Сбор статистических данных о надежности в настоящее время ведется в большинстве случаев не с целью определения численных характеристик надежности техники. Преследуются иные, более узкие, цели: предъявление рекламаций изготовителям, определение слабых мест техники с целью ее доработок, оправдание своих действий юридически в случае необходимости, обоснование наличия необходимого объема запасных частей, продление технического ресурса и т. п. Для этих целей нет надобности в строгой научно обоснованной методике сбора статистических данных об отказах элементов, узлов, устройств и систем. Достаточно указать дату, место и причину неисправности или отказа. В отрасли отсутствует единая система сбора статистических данных о надежности техники. Поэтому журналы, в которых регистрируются сведения об эксплуатации техники, не однообразны, показатели различны, они часто не согласуются друг с другом. Все это позволяет оценить технические средства исследуемого объекта в основном по показателям надежности.

1 Анализ надежности

При анализе надежности необходимо, чтобы математическая модель функционирования систем управления в процессе эксплуатации соответствовала их реальной эксплуатации. Математические модели в соответствии с теорией надежности строятся в предположении, что достоверно известно время между отказами каждого элемента системы управления при условии

непрерывной их работы. Тогда можно определить любой показатель надежности. Рассмотрим это на примере существующей методики определения интенсивностей отказов элементов по данным эксплуатации.

Интенсивность отказов элементов определяется по формуле [8]:

$$\lambda(\Delta t)=\frac{n(\Delta t)}{N_{\text{ср}}\Delta t}, \tag{1}$$

где $n(\Delta t)$ – число отказавших элементов за время Δt; $N_{\text{ср}}$ – среднее число элементов, исправно работающих на участке Δt.

Интенсивность отказов характеризует надежность невосстанавливаемых устройств только до первого отказа. Поэтому для определения $\lambda(\Delta t)$ необходимо проводить опыт без учета отказавших элементов. Отказавшие элементы не должны заменяться исправными.

При отказе сложной системы из-за отказа ее элемента система не снимается с экплуатации. Данный элемент заменяется исправным и в опыте остается постоянное число элементов. В этом случае среднее число исправно работающих элементов $N_{\text{ср}}$ на участке Δt остается постоянным и равным первоначальному их количеству. Тогда обработка статистических данных по формуле (1) дает не интенсивность отказов элементов, а параметр потока отказов (среднюю частоту отказов) $\omega(t)$, являющийся характеристикой надежности восстанавливаемых систем. Ошибки не будет лишь в единственном частном случае, когда распределение времени между отказами подчиняется закону Пуассона и $\omega(t)=\lambda(t)=\text{const}$. На практике закон Пуассона в большинстве случаев не отражает физику отказов, так как имеют место приработка и старение элементов. В заблуждение несведущего исследователя также вводит следующее свойство параметра потока отказов [9]:

$$\lim_{t\to\infty}\omega(t)=\frac{1}{T}, \tag{2}$$

где T – наработка до первого отказа.

Поскольку для экспоненциального закона $\lambda=\frac{1}{T}$, то на основании (2) ошибочно отождествляют параметр потока и интенсивность отказов, т. е. считают $\lambda(t)=\omega(t)$. В действительности же $\lambda(t)$ может быть убывающей или возрастающей функцией времени, а $\omega(t)$ при достаточно длительном времени эксплуатации становится практически постоянной величиной.

Получив из опыта эксплуатации недостоверные данные о надежности элементов, разработчик использует их для оценки надежности вновь проек-

тируемой аналогичной техники. При этом, вычисляя показатели надежности сложной системы, он пользуется следующими формулами:

$$\lambda_{\text{с}} = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i, \quad T_{\text{с}} = \frac{1}{\lambda_{\text{с}}}, \quad P_{\text{с}}(t) = e^{-\lambda_{\text{с}} t}, \quad K_{\text{г}} = \frac{T_{\text{с}}}{T_{\text{с}} + T_{\text{в}}},$$

где $\lambda_{\text{с}}, T_{\text{с}}, P_{\text{с}}(t)$ – интенсивность отказов, наработка на отказ и вероятность безотказной работы системы; λ_i – интенсивность отказов *i*-го элемента, полученная по данным эксплуатации; $T_{\text{в}}$ – среднее время восстановления системы; n – число элементов в системе.

Такие расчеты могут привести к большим ошибкам, особенно в случае анализа надежности сложных систем. Здесь три источника ошибок. Во-первых, неверны расчетные формулы; во-вторых, параметр потока отказов системы не равен сумме параметров потоков отказов элементов; в-третьих, $\lambda_i(t) \neq \omega_i(t)$.

Отсутствие обоснованных данных о надежности техники затрудняет планирование ее эксплуатации, не дает возможности оценить качество и эффективность сложных объектов, не позволяет выполнять расчеты надежности в процессе проектирования. Поэтому создание единой системы сбора и обработки статистических данных об отказах техники является инженерной задачей большой важности. Статистические данные об отказах должны:

– подтверждать характеристики надежности технических устройств и систем, указанные разработчиком и изготовителем;

– дать возможность получить показатели надежности элементов, узлов, устройств для их использования в процессе проектирования и производства сложных технических систем;

– быть простыми, не требующими большой работы инженерно-технического персонала, занимающегося эксплуатацией техники;

– включать методики, алгоритмы и программы сбора и обработки статистических данных об отказах.

Анализ критериев и показателей надежности технических средств объекта, а также принцип подхода к статистическим данным об отказах и системе их сбора и обработки позволили разработать карту отказов, которую должен заполнять персонал, эксплуатирующий технические средства объекта. Карта имеет вид таблицы 1.

Статистические данные этой таблицы позволяют получить все показатели надежности. Методики, алгоритмы и программы получения показателей надежности по данным таблицы достаточно просты и основаны на методах математической статистики и зависимостях, известных в теории надежности.

Дальнейшее упрощение сбора статистики, по нашему мнению, невозможно.

Таблица 1. Карта отказов технических устройств

Тип отказавшего устройства	Из-за какого элемента произошел отказ	Время начала эксплуатации устройства	Дата отказа устройства	Общее время наработки отказавшего элемента от начала эксплуатации устройства	Время наработки устройства от момента последнего восстановления до данного отказа	Время восстановления
...	...	...	...	...	...	...

Методики и алгоритмы сбора информации об отказах разработаны на базе аналитических и топологических методов, основанных на теории марковских и немарковских процессов [8]. Они могут служить основой для анализа надежности, сравнения и выбора вариантов вновь разрабатываемых и модернизируемых объектов транспорта.

Комплекс методик позволяет учесть следующие факторы эксплуатации:

– восстановление отказавших элементов при техническом обслуживании в работоспособной системе;

– состояние резерва (нагруженный, облегченный, ненагруженный);

– последствия отказов;

– число ремонтных бригад;

– дисциплина обслуживания отказавших элементов;

– произвольные законы распределения времени безотказной работы и времени восстановления элементов.

Общими допущениями представленных методик являются следующие:

– объект транспорта имеет два возможных состояния – работоспособное и неработоспособное;

– состояние объекта в каждый момент времени однозначно определяется набором состояний всех его частей;

– функционирование оборудования контролируется непрерывно, т. е. момент отказа элемента (составной части оборудования) фиксируется сразу после его возникновения;

– восстановление элемента начинается немедленно после его отказа при наличии свободной ремонтной бригады, обслуживающей данный элемент; при отсутствии свободной ремонтной бригады отказавший элемент становится в очередь на обслуживание;

– ремонт элемента после отказа полностью восстанавливает его свойства по надежности.

Каждая конкретная методика имеет свои дополнительные ограничения и допущения помимо вышеуказанных.

Для оценки надежности необходимы следующие исходные данные:

– перечень элементов исследуемого объекта и структура их соединения в виде надежностно-функциональной схемы;

– характеристики безотказности и ремонтопригодности элементов;

– стратегия восстановления отказавших элементов (количество ремонтных бригад, приоритет обслуживания);

– сведения о начальном состоянии процесса функционирования оборудования;

– время непрерывной работы оборудования.

Методики позволяют вычислять следующие показатели и характеристики надежности объекта:

– вероятность безотказной работы за определенное время $[0,t]$;

– среднюю наработку до отказа T_1;

– наработку на отказ T;

– среднее время восстановления $T_{\text{в}}$;

– коэффициент готовности $K_{\text{г}}$;

– функцию готовности $K_{\text{г}}(t)$ в момент t.

Компьютерные программы, которые в качестве самостоятельных модулей могут быть включены в пакет прикладных программ оценки надежности объекта, позволяют разработать следующие методики и алгоритмы:

– методика и алгоритм расчета надежности по формулам;

– методика и алгоритм расчета надежности, основанные на интегральном представлении показателей надежности;

– методика и алгоритм, основанные на теории марковских процессов;

– аналитико-статистическая методика и алгоритм оценки надежности систем с большим числом элементов;

– методика и алгоритм оценки надежности систем при произвольных законах распределения.

Рассмотрим реализацию каждой методики.

2 Методики и алгоритмы расчета надежности

2.1 Методика и алгоритм расчета надежности по формулам

Методика предназначена для расчета характеристик и показателей надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых типовых структур с учетом экспоненциального распределения времени безотказной работы и времени восстановления элементов [9].

Под типовой структурой будем понимать такое соединение элементов в систему, для которой известны готовые формулы вычисления надежности. К типовым структурам относятся: основное соединение элементов; параллельное соединение при равнонадежных и неравнонадежных элементах с нагруженным, облегченным или ненагруженным резервом; параллельное соединение с последействием отказов; мажоритарное и мостиковое соединение элементов. Результатами расчетов являются для невосстанавливаемого объекта вероятность безотказной работы и средняя наработка до отказа, для восстанавливаемого объекта – средняя наработка до отказа, среднее время восстановления, наработка на отказ, коэффициент готовности.

Алгоритм расчета включает в себя следующие процедуры:

1. Ввод исходных данных:

– параметры типовых структур;

– числовые значения безотказности и ремонтопригодности элементов рассчитываемой типовой структуры;

– время работы типовой структуры (задается только в случае расчеты вероятности безотказной работы).

2. Ввод массива данных, который содержит интенсивности отказов и интенсивности восстановления элементов типовой структуры.

При этом осуществляется вывод следующей информации:

– данные паспортов;

– результаты проверки возможности расчета показателей надежности и обращение к необходимым формулам;

– результаты расчета показателей надежности в соответствии с выбранными формулами;

Возможна печать полученных результатов.

2.2 Методика и алгоритм расчета надежности, основанные на интегральном представлении показателей надежности

Методика предназначена для расчета надежности сложного последовательно-параллельного соединения объекта практически с любым числом элементов [10, 11]. Она имеет следующие основные допущения и ограничения:

– законы распределения времени безотказной работы и времени восстановления элементов являются экспоненциальными;

– резервирование осуществляется элементами, идентичными основным элементам;

– отказы элементов возможны лишь во время работы системы;

– восстановление ограниченное, т. е. осуществляется одной ремонтной бригадой.

При сделанных допущениях функционирование системы описывается марковским процессом с конечным числом состояний и графом переходов типа дерева. С увеличением числа элементов в системе число возможных состояний быстро возрастает, что не дает возможности построить граф переходов и вычислить вероятности состояний системы даже с помощью ПЭВМ. Предлагаемая методика устраняет проблему размерности, она позволяет определить стационарные показатели надежности, такие как наработка на отказ, среднее время восстановления и коэффициент готовности без построения графа переходов и вычисления стационарных вероятностей состояний.

Исходными данными для расчета надежности являются:

– количество последовательно соединенных узлов N;

– число k_i основных элементов i-го узла;

– число m_i элементов нагруженного резерва i-го узла;

– число l_i элементов ненагруженного резерва i-го узла;

– интенсивность отказов λ_i элементов i-го узла;

– интенсивность восстановления μ_i элементов i-го узла.

Расчет показателей надежности производится на основе их интегральных представлений. Показатели надежности выражаются через несобственные интегралы от многочленов с экспоненциальным весом. Коэффициенты многочленов однозначно определяются набором исходных данных. Вычисление интегралов осуществляется с помощью квадратурных формул Гаусса – Лагерра.

2.3 Методика и алгоритм, основанные на теории марковских процессов

Методикой, основанной на теории марковских процессов, будем считать методику расчета характеристик и показателей надежности по линейным дифференциальным уравнениям типа уравнений массового обслуживания [11]. Допустим, что процессы отказов и восстановления объектов являются марковскими случайными процессами, и предположим, что законы распределения времени безотказной работы и времени восстановления каждого элемента, входящего в систему, являются экспоненциальными.

Методика позволяет рассчитать надежность невосстанавливаемых и восстанавливаемых, нерезервированных и структурно-резервированных систем при любом состоянии резерва (ненагруженном, облегченном, нагруженном), при любом количестве ремонтных бригад и произвольной дисциплине обслуживания. Она позволяет вычислять вероятность безотказной работы, среднюю наработку до отказа, наработку на отказ, среднее время восстановления, коэффициент и функцию готовности объекта.

Исходными данными для расчета надежности являются:

– надежностно-функциональная схема;

– интенсивности отказов и восстановлений каждого элемента системы;

– количество ремонтных бригад;

– приоритет обслуживания отказавших элементов;

– начальное состояние процесса функционирования;

– время непрерывной работы системы.

Расчет характеристик и показателей надежности проводится в такой последовательности:

– построение графа состояний;

– составление системы уравнений: алгебраических для вычисления стационарных показателей надежности или дифференциальных – для вычисления нестационарных характеристик надежности;

– определение вероятностей состояний объекта;

– вычисление показателей и характеристик надежности.

2.4 Аналитико-статистическая методика и алгоритм оценки надежности объектов с большими составными частями

Современный сложный объект, как правило, имеет множество составных частей (элементов), выполняющих различные функции, характеризуется наличием различных видов резервирования, последействием отказов, для него возможны разнообразные стратегии обслуживания. Оценка надежности такого объекта с удовлетворительной точностью немыслима без вычислительной техники. Аналитико-статистический метод оценки надежности [8], наряду с общими допущениями о функционировании объекта, имеет дополнительное ограничение, состоящее в экспоненциальном характере законов распределения времени безотказной работы и восстановления всех элементов**.**

Расчет надежности по предлагаемой методике состоит из следующих этапов:

– построение свернутого графа состояний;

– вычисление интенсивностей переходов свернутого графа;

– составление систем линейных алгебраических или дифференциальных уравнений и их решение;

– расчет показателей надежности.

Свернутый граф состояний имеет на каждом уровне не более двух узлов, соответствующих работоспособным состояниям и состояниям отказа объекта. Он получается путем объединения соответствующих узлов полного графа, отвечающего процессу функционирования всей системы, и укрупнения состояний.

Укрупненные узлы соединяются ветвями переходов, которым приписываются интенсивности, рассчитанные по приближенным формулам.

Для вычисления интенсивностей переходов учитываются лишь выборочные пути графа, ведущие из начального узла. Выборка осуществляется по равномерному закону, а соответствующая величина интенсивности умножается на число ветвей, выходящих из данного узла.

Нахождение интенсивностей переходов связано с двумя видами погрешностей, одна из которых возникает из-за приближенного способа вычисления интенсивностей, а другая является следствием относительно небольшого объема выборки путей графа.

В случае высоконадежного объекта методика позволяет оценить точность полученных результатов и указать нижние и верхние граничные значения для наработки на отказ, среднего времени восстановления и коэффициента готовности. Контрольные просчеты показывают, что эти значения достаточно близки между собой и показатели надежности имеют невысокую погрешность, вполне приемлемую для инженерных расчетов.

2.5 Методика и алгоритм оценки надежности объекта транспорта при произвольных законах распределения

Анализ надежности объекта, элементы которого имеют неэкспоненциальные законы распределения времени безотказной работы и времени восстановления, как правило, может быть выполнен, если его функционирование представлено в виде соответствующей математической модели. В некоторых случаях удается получить математическое описание функционирования системы с помощью теории полумарковских процессов (процессы функционирования и обслуживания рассматриваются в специально подобранные моменты времени) или многомерных марковских процессов (предполагающих введение дополнительных переменных). Однако возможности применения указанных методов ограничены, поскольку в общем виде на их основе не удается описать работу восстанавливаемого объекта с учетом структурной избыточности и любой дисциплины ремонта.

Применение метода статистического моделирования для получения достоверной оценки надежности сложного объекта требует больших затрат машинного времени и для высоконадежного объекта не всегда реализуемо.

Известные в настоящее время методы расчета надежности технических систем не позволяют, вообще говоря, дать оценку погрешности, которая удовлетворила бы инженера-практика. Более того, при надлежащем выборе законов распределения показатели надежности, полученные, например, асимптотическими методами, могут совершенно исказить истинное значение даже при дополнительном условии быстрого восстановления элементов. Важным

звеном анализа надежности объекта является в связи с этим разработка инженерных методов вычисления показателей надежности, имеющих достаточно высокую точность.

Основой таких методов служит возможность математического описания функционирования объекта с произвольными законами распределения элементов с помощью системы интегральных уравнений или эквивалентной системы дифференциальных уравнений в частных производных. Это описание может быть выполнено формальным путем, исходя из структурной схемы расчета надежности или ее словесной характеристики, условий отказа системы, числа ремонтных органов и способа обслуживания отказавших элементов.

Алгоритм вычисления стационарных показателей надежности, основанный на данной методике, состоит из следующих этапов:

– ввод исходных данных;

– формирование матрицы состояний и матрицы переходов системы;

– вычисление приближенных значений вероятностей состояний и параметров переходов системы из состояния в состояние;

– вычисление интенсивностей переходов;

– составление и решение системы линейных уравнений, описывающей стационарный процесс функционирования системы;

– расчет показателей надежности и оценка их погрешностей.

Методика позволяет также найти вероятность безотказной работы объекта на начальном и стационарном участках его функционирования. Для экспоненциальных законов распределения обе эти функции совпадают. В общем случае они представляют собой оценки для истинного значения вероятности безотказной работы, точность которых можно установить программным путем.

Заключение

Выбор наилучшего по надежности варианта системы управления в процессе ее проектирования требует выполнения расчетов надежности различных структур и схемных решений по большому числу критериев.

Для облегчения расчетов предлагается рассматривать проектируемую сложную систему управления как развивающуюся. Развивающейся считается такая система, которая образована из некоторой другой, являющейся ее прототипом с известными количественными характеристиками надежности, полученными по данным эксплуатации или расчетным путем. Тогда надежность развивающейся системы управления можно оценить путем сравнения исходного (коренного) и развивающегося варианта.

Такой подход позволил получить простые формулы для определения показателей надежности невосстанавливаемого и восстанавливаемого, нере-

зервированного и резервированного варианта системы управления при общем резервировании и таких способах обслуживания, при которых функционирование системы управления можно описать графом типа дерева.

Расширить область применения метода развивающегося варианта системы управления можно, если воспользоваться методом эквивалентных систем. В соответствии с этим методом находятся такие две системы, надежность которых может быть легко вычислена. При этом одна из них более надежна, а другая менее надежна, чем основная. Тогда полученные характеристики надежности эквивалентных систем будут верхней и нижней оценками.

Необходимо выбирать в качестве эквивалентных систем такие, которые имеют равнонадежные элементы с одинаковыми интенсивностями отказов и восстановлений, равными некоторым средним величинам. Такой подход дает возможность получать рекуррентные соотношения, позволяющие оценить надежность проектируемой системы управления как системы развивающейся при достаточно сложной ее структуре, не описываемой графом типа дерева.

Библиографический список

1. Поляков А. С. Принципы обработки информации по оценке надежности оборудования транспорта / А. С. Поляков, Д. А. Скороходов // Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы : науч. аналитический журнал. – 2013. – № 3. – С. 65–69.
2. Артамонов В. С. Экспертный метод прогноза уровня надежности и безопасности железнодорожного транспорта / В. С. Артамонов, А. С. Поляков, Д. А. Скороходов // Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы : науч. аналитический журнал. – 2013. – № 2. – С. 36–42.
3. Александров М. А. Анализ методики и алгоритма оценки надежности объекта транспортной системы при произвольных законах распределения / М. А. Александров, Д. А. Скороходов // Морской вестник. – 2013. – № 4 (48). – С. 100–102.
4. Копытов Ю. В. Определение ресурса насосов в различных режимах работы / Ю. В. Копытов, Д. А. Скороходов // Морской вестник. – 2015. – № 1 (53). – С. 52–54.
5. Гаврилова А. Н. Расчетные исследования системы очистки и охлаждения отработавших газов теплового двигателя / А. Н. Гаврилова, Д. А. Скороходов // Морской вестник. – 2015. – № 3 (55). – С. 47–48.
6. Верхоланцев А. А. Принципы измерений сверхмалых деформаций гребного вала / А. А. Верхоланцев, А. Н. Войтюк, Д. А. Скороходов // Морские интеллектуальные технологии. – 2009. – № 2. – С. 47–48.
7. Паньков К. Ю. Функциональная надежность систем управления движением подводных лодок / К. Ю. Паньков, Д. А. Скороходов // Гироскопия и навигация. – 2005. – № 1 (48). – С. 108.

8. Володин В. В. Надежность в технике. Научно-технические, экономические и правовые аспекты надежности / В. В. Володин. – М. : Институт машиноведения им. А. А. Благонравова ; МНТК «Надежность машин» РАН, 1993. – С. 119–123.
9. Рябинин И. А. Надежность, живучесть и безопасность корабельных электроэнергетических систем / И. А. Рябинин. – СПб. : ВМА им. Н. Г. Кузнецова, 1997. – 433 с.
10. Буравлёв А. И. Управление техническим состоянием динамическим систем / А. И. Буравлёв, Б. И. Доценко, И. Е. Казаков ; под общ. ред. И. Е. Казакова. – М. : Машиностроение, 1995. – 240 с.
11. Ивченко Б. П. Теоретические основы информационно статистического анализа сложных систем / Б. П. Ивченко, Л. А. Мартыщенко, М. Л. Монастырский. – СПб. : Лань, 1997. – 247 с.

Andrey G. Bogdanov
Dmitriy A. Skorokhodov
Institute of transport problems after N. S. Solomenko
Russian academy of science

Principles of data gathering about refusals of the equipment of vehicles at their operation

The article describes the principles of collecting statistical data about failures and repairs of control systems of vehicles, providing the ability to characterize their reliability during operation. The mathematical model of functioning of control systems in the process of their operation. Collecting statistical data about failures is complicated by the fact that complex systems work in the change mode of failed elements. In this mode of operation is proposed to record not only the time between failures, but also to consider the possibility of replacement in the past, this failed element. At the same time to fill card bounce is not enough to indicate the type of failures, their reason and date. It is necessary in every case of failure to analyze the entire log of the operation of this device. In the reliability analysis requires that a mathematical model of the functioning of the equipment during its operation consistent with the actual operation of the facility. Mathematical model in accordance with the theory of reliability are based on the assumption that the known times between failures of each element of a complex system subject to continuous their work. Then you can determine any measure of reliability.

the data model, reliability, facility, equipment, failure, principles, Assembly, characteristics, operation

References

1. Polyakov A. S., Skorokhodov D. A. (2013). Principles of information processing on the evaluation of the reliability of the equipment transport [Principy obrabotki informacii po ocenke nadyozhnosti oborudovaniya transporta]. Scientific magazine «Vestnik of Saint-Petersburg University of state fire service» [Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby], N 3. – Pp. 65–69.
2. Artamonov V. S., Polyakov A. S., Skorokhodov D. A. (2013). The Expert method of forecasting the reliability and safety of railway transport [Ekspertnyj metod prognoza urovnya nadyozhnosti i bezopasnosti zheleznodorozhnogo transporta]. The Scientific-analytical journal «Vestnik of Saint-Petersburg University of state fire service» [Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby], N 2. – Pp. 36–42.
3. Aleksandrov M. A., Skorokhodov D. A. (2013). Analysis of methods and algorithms of reliability evaluation of the object transport system with arbitrary distributions [Analiz metodiki i algoritma ocenki nadyozhnosti ob'ekta transportnoj sistemy pri proizvol'nyh zakonah raspredeleniya]. Sea Bulletin [Morskoj vestnik], N 4 (48). – Pp. 100–102.
4. Kopytov V. Y., Skorokhodov D. A. (2015). Determination of the life of pumps in multiple modes of operation [Opredelenie resursa nasosov v razlichnyh rezhimah raboty]. Sea Bulletin [Morskoj vestnik], N 1 (53). – Pp. 52–54.
5. Gavrilov A. N., Skorokhodov D. A. (2015). Computational studies of the purification and cooling of exhaust gases of a heat engine [Raschyotnye issledovaniya sistemy ochistki i ohlazhdeniya otrabotavshih gazov teplovogo dvigatelya]. Sea Bulletin [Morskoj vestnik], N 3 (55). – Pp. 47–48.
6. Verholantsev A. A., Voytyuk A. N., Skorokhodov D. A. (2009). Principles of measurement of ultra-small deformations of the propeller shaft [Principy izmerenij sverhmalyh deformacij grebnogo vala]. Marine intellectual technologies [Morskie intellektual'nye tekhnologii], N 2. – Pp. 47–48.
7. Pan'kov K. Yu., Skorokhodov D. A. (2008). Functional reliability of submarine traffic control systems [Funkcional'naya nadyozhnost' sistem upravleniya dvizheniem podvodnyh lodok]. Gyroscopy and navigation [Giroskopiya i navigaciya], N 2. – Pp. 49–54.
8. Volodin V. V. (1993). Reliability in technique. Scientific, technical, economic and legal aspects of reliability [Nadezhnost' v tekhnike. Nauchno-tekhnicheskie, ekonomicheskie i pravovye aspekty nadezhnosti]. Moscow, Institute of machines science named. A. A. Blagonravova, MNTK «Reliability of machines» [Institut mashinovedeniya im. A. A. Blagonravova, MNTK «Nadezhnost' mashin» RAS]. – Pp. 119–123.
9. Ryabinin I. A. (1997). Reliability, survivability and safety shipboard electric power systems [Nadezhnost', zhivuchest' i bezopasnost' korabel'nyh ehlektroehnergeticheskih system]. St. Petersburg, VMA im. N. G. Kuznetsov. – 433 p.
10. Buravlev A. I., Dotsenko B. I., Kazakov I. E., Ls. Ed. I. E. Kazakov (1995).Technical condition control of dynamic systems [Upravlenie tekhnicheskim sostoyaniem dinamicheskim system]. Moscow, Mechanical Engineering [Mashinostroenie]. – 240 p.

11. Ivchenko B. P., Martyshchenko L. A., Monastersky M. L. (1997). The theoretical foundations of information and statistical analysis of complex systems [Teoreticheskie osnovy informacionno statisticheskogo analiza slozhnyh system]. St. Petersburg. – 247 p.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Вл. В. Сапожниковым
Поступила в редакцию 19.06.2017, принята к публикации 28.07.2017

БОГДАНОВ Андрей Геннадьевич – заместитель директора ЗАО «Центральный научно-исследовательский институт судового машиностроения».
e-mail: sudmash@sudmash.ru

СКОРОХОДОВ Дмитрий Алексеевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук.
e-mail: skorohodda@mail.ru

© Богданов А. Г., Скороходов Д. А., 2017

Системы и устройства автоматики и телемеханики

УДК 621.391; 629.78

И. Д. Долгий, д-р техн. наук
Кафедра «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте»,
Ростовский государственный университет путей сообщения

И. Н. Розенберг, д-р техн. наук,
А. А. Баяндурова
Кафедра «Геодезия, геоинформатика и навигация»,
Российский университет транспорта (МИИТ)

СИНТЕЗ ТЕСНО ИНТЕГРИРОВАННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНО-СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ЛОКОМОТИВА НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЕГО ДВИЖЕНИЯ

Рассматривается возможность использования аналитической модели траектории движения локомотива при синтезе его тесно интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы. Ввиду того что алгоритмы интеграции бесплатформенных инерциальных навигационных систем и спутниковых навигационных систем сформированы в большинстве случаев либо на основе дифференциальной модели движения локомотива, либо на основе уравнений ошибок инерциальных навигационных систем, информация об изменении траектории локомотива весьма ограниченна в точности, что влечет за собой значительные ошибки инерциально-спутниковых систем при их тесной интеграции или быструю расходимость процесса фильтрации при пропадании спутниковых сообщений. Поскольку локомотивы движутся по заранее известным высокоточным пространственным траекториям, предлагается использовать пространственные модели пути, которые значительно упростят решение навигационной задачи. Показано, что применение данной модели сокращает размерность оцениваемого вектора навигационных параметров, уменьшая вычислительные затраты, и позволяет принципиально решить задачу апостериорной оценки параметров движения автономными измерителями при пропадании спутниковых сообщений. Точность, достигнутая при исследовании, указывает на возможность эффективного использования предложенного подхода и реализацию заявленных преимуществ.

инерциальные навигационные системы; спутниковые навигационные системы; пространственные модели пути; тесная интеграция; апостериорная оценка; нелинейная фильтрация

Введение

В настоящее время алгоритмы интеграции бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) и спутниковых навигационных систем (СНС) формируются в основном или на основе дифференциальной модели движения локомотива [1], или на основе так называемых уравнений ошибок инерциальной системы [2]. Оба случая предполагают априорную информацию об изменении траектории локомотива во времени, что для подавляющего большинства локомотивов возможно лишь с весьма ограниченной точностью и на небольших интервалах времени. Последнее обстоятельство приводит или к значительным ошибкам инерциально-спутниковых систем в режиме их тесной интеграции, или к быстрой расходимости процесса фильтрации при пропадании спутниковых сообщений [3]. В то же время для навигации локомотивов, движущихся по заранее известным с высокой точностью пространственным траекториям, возможно использование пространственных моделей пути, существенно упрощающих решение навигационной задачи и повышающих его точность [4]. При этом необходимо подчеркнуть, что данные модели формируются на основе геодезических измерений или соответствующей картографической информации и инвариантны по отношению к характеру движения локомотива и виду его модели.

1 Постановка задачи

Задача настоящего исследования – показать, что использование подобных пространственных моделей не требует линеаризации навигационных уравнений (как при построении уравнений ошибок), повышает точность позиционирования; сокращает размерность оцениваемого вектора навигационных параметров, уменьшая вычислительные затраты; расширяет вектор наблюдений, позволяя принципиально решить задачу апостериорной оценки параметров движения автономными измерителями при пропадании спутниковых сообщений.

Рассмотрим механизм возникновения этих преимуществ подробнее.

2 Математическая модель тесно интегрированной навигационной системы

При описании движения локомотива будем использовать следующие правые системы координат (СК) [2, 5]:

– приборную СК *J Oxyz*, начало которой расположено в центре масс локомотива, а оси направлены по взаимно ортогональным осям чувствительности приборов измерительного комплекса БИНС;

– инерциальную СК $I\ O\eta\xi\zeta$ с началом в центре Земли;

– вращающуюся вместе с Землей гринвичскую СК $G\ O\eta_1\xi_1\zeta_1$;

– сопровождающую *S OXYZ*, начало которой совпадает с центром масс локомотива, ось *Y* совпадает с направлением местного меридиана, ось *Z* направлена к центру Земли, а ось *X* дополняет систему до правой.

Допустим также, что в измерительный комплекс БИНС входят три акселерометра и три датчика угловой скорости [6]. В качестве модели шумов измерений чувствительных элементов примем белый гауссовский шум [7]. Такой подход не накладывает принципиальных ограничений на решение поставленной задачи, поскольку путем расширения вектора состояния за счет введения формирующих фильтров можно, как известно, получить модель помехи чувствительных элементов с заданными статистическими характеристиками.

При сделанном выборе системы координат система уравнений навигационных параметров исследуемой БИНС, инвариантная к характеру движения локомотива и виду его физической модели, как показано в [5], имеет следующий вид:

$$\begin{vmatrix}\dot{\alpha}\\ \dot{\beta}\\ \dot{\gamma}\end{vmatrix} = \begin{vmatrix}\frac{\sin\gamma}{\cos\beta} & \frac{\cos\gamma}{\cos\beta} & 0\\ \cos\gamma & -\sin\gamma & 0\\ \sin\gamma\operatorname{tg}\beta & \cos\gamma\operatorname{tg}\beta & 1\end{vmatrix}(Z_d - W_d) = \Phi(\beta,\gamma)(Z_d - W_d);$$

$$\begin{vmatrix}\dot{\lambda}\\ \dot{\varphi}\end{vmatrix} = \begin{vmatrix}0 & (\cos\varphi)^{-1}\\ -1 & 0\end{vmatrix}\begin{vmatrix}-V_Y\\ V_X\end{vmatrix}(r+h)^{-1}; \qquad (1)$$

$$\begin{vmatrix}\dot{V}_X\\ \dot{V}_Y\\ \dot{V}_Z\end{vmatrix} = C^T(\alpha,\beta,\gamma,\lambda,\varphi)Z_a + \left(\left(2\begin{vmatrix}0\\ \Omega\cos\varphi\\ \Omega\sin\varphi\end{vmatrix} + (r+h)^{-1}\begin{vmatrix}-V_Y\\ V_X\\ V_X\operatorname{tg}\varphi\end{vmatrix}\right)\times\begin{vmatrix}V_X\\ V_Y\\ V_Z\end{vmatrix}\right) -$$

$$-\begin{vmatrix}0\\ -\Omega^2(r+h)\cos\varphi\sin\varphi\\ \Omega^2(r+h)\cos^2\varphi + g\end{vmatrix} - C^T(\alpha,\beta,\gamma,\lambda,\varphi)W_a,\ \ \dot{h} = V_Z,$$

где α, β, γ – углы Эйлера, определяющие ориентацию трехгранника приборной СК относительно инерциальной СК; $Z_d = \left| Z_x \quad Z_y \quad Z_z \right|^T$ – вектор измерений трех ортогональных датчиков угловой скорости; $W_d = \left| W_x \quad W_y \quad W_z \right|^T$ – вектор аддитивных помех измерения этих датчиков (белый гауссовский шум с нулевым средним и матрицей интенсивностей D_d); λ – долгота; φ – широта; h – высота локомотива; V_X, V_Y, V_Z – проекции линейной скорости локомотива на соответствующие оси сопровождающей СК; r – радиус Земли; Ω – угловая скорость вращения Земли; g – гравитационное ускорение; $Z_a = \left| Z_{ax} \quad Z_{ay} \quad Z_{az} \right|^T$ – вектор выходных сигналов акселерометров; $W_a = \left| W_{a_x} \quad W_{a_y} \quad W_{a_z} \right|^T$ – вектор помех акселерометров (белый гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и матрицей интенсивностей D_a); $C(\alpha,\beta,\gamma,\lambda,\varphi) = D(\alpha,\beta,\gamma) B^T(\lambda,\varphi)$ – матрица направляющих косинусов, определяющая ориентацию сопровождающей СК относительно приборной СК; $D(\alpha,\beta,\gamma)$ – матрица поворота 2-го рода [8], определяющая ориентацию приборной СК относительно инерциальной СК (2); $B = D(\lambda + \Omega t = \psi, -\varphi, 0)$ – матрица 2-го рода, определяющая ориентацию сопровождающей СК относительно инерциальной СК;

$$D(\alpha,\beta,\gamma) = \begin{vmatrix} \sin\beta\sin\alpha\sin\gamma + \cos\beta\cos\gamma & \cos\alpha\sin\gamma & \cos\beta\sin\alpha\sin\gamma - \sin\beta\cos\gamma \\ \sin\beta\sin\alpha\cos\gamma - \cos\beta\sin\gamma & \cos\alpha\cos\gamma & \cos\beta\sin\alpha\cos\gamma + \sin\beta\sin\gamma \\ \sin\beta\cos\alpha & -\sin\alpha & \cos\beta\cos\alpha \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Следует подчеркнуть, что наблюдение (а следовательно, и апостериорная оценка на основе существующих методов теории стохастической фильтрации) приведенного полного вектора навигационных параметров возможно только с помощью внешних измерителей (в частности, СНС), так как информационные модели всех параметров уже использованы в уравнениях вектора состояния БИНС. Используя в качестве системы внешних измерений СНС, далее рассмотрим только кодовые и доплеровские измерения как дающие полное представление о принципах решения задачи построения интегрированной навигационной системы (НС) на основе пространственных моделей пути.

В стандартном (автономном) режиме информационный сигнал кодовых измерений (псевдодальность) может быть записан следующим образом [1, 9]:

$$Z_R = \sqrt{(\xi_c - \xi)^2 + (\eta_c - \eta)^2 + (\zeta_c - \zeta)^2} + W_{Z_R}, \quad (3)$$

где ξ_c, η_c, ζ_c – известные координаты спутника в гринвичской СК; ξ, η, ζ – текущие координаты локомотива в гринвичской СК; W_{Z_R} – белый гауссовский шум с нулевым средним и известной дисперсией $D_{Z_R}(t)$, обусловленный алгоритмически нескомпенсированными ошибками часов спутников и приемника, задержками сигнала при прохождении ионосферы и тропосферы, ошибками многолучевости и инструментальными погрешностями.

Информационный сигнал доплеровских измерений (псевдоскорости) Z_V в автономном режиме может быть представлен формулой [1, 9]:

$$Z_V = [(\xi_c - \xi)(V_{\xi c} - V_\xi) + (\eta_c - \eta)\ (V_{\eta c} - V_\eta) + (\zeta_c - \zeta)(V_{\zeta c} - V_\zeta)] \times$$

$$\times\ (\sqrt{(\xi_c - \xi)^2 + (\eta_c - \eta)^2 + (\zeta_c - \zeta)^2}\ )^{-1} + W_{Z_V}, \qquad (4)$$

где $V_{\xi c}, V_{\eta c}, V_{\zeta c}$ – проекции вектора скорости спутника на оси гринвичской СК; V_ξ, V_η, V_ζ – проекции вектора скорости локомотива на оси гринвичской СК; W_{Z_V} – белый гауссовский шум с нулевым средним и известной дисперсией $D_{Z_V}(t)$, обусловленный аппаратурными погрешностями приемника локомотива и передатчика спутника, погрешностями многолучевости и случайными погрешностями измерения.

Для возможности использования измерительных сигналов (3), (4) в качестве наблюдателей вектора состояния НС, описываемого системой (1), выразим входящие в них переменные через навигационные параметры в сопровождающей СК. Для координат локомотива имеем:

$$\xi = (r+h)\cos\varphi\ \sin\lambda,\ \eta = (r+h)\sin\varphi,\ \zeta = (r+h)\cos\varphi\ \cos\lambda. \qquad (5)$$

При определении проекций скорости учтем, что связь вектора скорости в гринвичской СК $V_G = \left| V_\xi\ V_\eta\ V_\zeta \right|^T$ с вектором скорости $V_S = \left| V_X\ V_Y\ V_Z \right|^T$ в сопровождающей СК определяется матрицей $B = D(-\varphi, \lambda, 0) = B(\varphi, \lambda)$ ориентации сопровождающей СК относительно гринвичской СК: $V_S = B(\varphi, \lambda)\ V_G$, откуда прямо следует возможность представления вектора V_G через навигационные параметры локомотива:

$$V_G = B^T(\varphi, \lambda)\ V_S. \qquad (6)$$

Исходя из (5), (6), сигналы кодовых и доплеровских измерений можно представить как информационные модели наблюдателей вектора состояния НС (1):

$$Z_R =$$

$$= \sqrt{(\xi_c - (r+h)\cos\varphi \sin\lambda)^2 + (\eta_c - (r+h)\sin\varphi)^2 + (\zeta_c - (r+h)\cos\varphi \cos\lambda)^2} +$$

$$+ W_{Z_R} = H_R(\varphi,\lambda,h) + W_{Z_R};$$

$$Z_V = [(\xi_c - (r+h)\cos\varphi \sin\lambda)(V_{\xi c} - B^T_{(1)}(\varphi,\lambda)V_S) + (\eta_c -$$

$$- (r+h)\sin\varphi)(V_{\eta c} - B^T_{(2)}(\varphi,\lambda)V_S) +$$

$$+ (\zeta_c - (r+h)\cos\varphi \cos\lambda)(V_{\zeta c} - B^T_{(3)}(\varphi,\lambda)V_S)] \times$$

$$\times \left(\sqrt{(\xi_c - (r+h)\cos\varphi\sin\lambda)^2 + (\eta_c - (r+h)\sin\varphi)^2 + (\zeta_c - (r+h)\cos\varphi\cos\lambda)^2}\right)^{-1} +$$

$$+ W_{Z_V} = H_V(\varphi,\lambda,h,V_S) + W_{Z_V}, \qquad (7)$$

где $B^T_{(i)}(\varphi,\lambda)$ – i-я строка матрицы $B^T(\varphi,\lambda)$.

Анализируя полученные уравнения спутниковых наблюдателей, можно сделать вывод о том, что сигналы измерения (7) содержат информацию обо всех навигационных параметрах линейного движения локомотива, но не обеспечивают наблюдения параметров вращения приборного трехгранника относительно центра масс локомотива (подобная ситуация является типичной для существующих алгоритмов фильтрации в сопровождающей НС [10, 11]). Другими словами, использование только спутниковых измерений может привести к неустойчивости процесса оценки угловых параметров локомотива. Использование пространственных моделей пути принципиально меняет ситуацию.

3 Анализ и синтез пространственных моделей пути

Предварительно сделаем два допущения, не касающихся принципа использования пространственных моделей пути при интеграции НС [12], но существенно упрощающих построение самих моделей изменения долготы λ и высоты h. Будем считать, что на известных заданных N участках пространственной траектории углы ее наклона по отношению к местному меридиану (азимутальные углы) известны, постоянны и равны A_i, а по отношению к плоскости местного горизонта (углы возвышения) также известны, постоянны и равны ϑ_i, $i = 1, ..., N$. Эти предположения для железных дорог справедливы с высокой точностью. Для долготы λ аналитическая модель ее из-

менения при постоянном азимутальном угле пространственной траектории A известна – это так называемая локсодромическая модель [1]:

$$\lambda(\varphi) = \lambda_0 + \operatorname{tg}A \cdot \ln \frac{\left|\operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}+\frac{\pi}{4}\right)\right|}{\left|\operatorname{tg}\left(\frac{\varphi_0}{2}+\frac{\pi}{4}\right)\right|} = \lambda_0 + \operatorname{tg}A \cdot \ln\left(C\left|\operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}+\frac{\pi}{4}\right)\right|\right),$$

где $C = \left|\operatorname{tg}\left(\frac{\varphi_0}{2}+\frac{\pi}{4}\right)\right|^{-1} = \text{const}$; λ_0 – начальное значение долготы участка пути с постоянным известным азимутальным углом A; φ_0 – начальное значение его широты.

Это позволяет представить обобщенную модель для всей траектории в виде

$$\lambda(\varphi) = \sum_{i=1}^{N}\left[\lambda_{i0} + \operatorname{tg}A_i \cdot \ln\left(C_i\left|\operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}+\frac{\pi}{4}\right)\right|\right)\right]\delta(A - A_i),$$

где $\delta(A - A_i)$ – дельта-функция; λ_{i0} – начальное значение долготы участка пути с постоянным известным азимутальным углом A_i; N – число участков пути с постоянным известным азимутальным углом.

Для высоты h модель ее изменения при постоянном угле возвышения пространственной траектории ϑ получим исходя из следующих построений.

Используя приведенные в (1) уравнения широты и высоты:

$$\dot{\varphi} = V_Y (r+h)^{-1}, \quad \dot{h} = V_Z,$$

а также представления проекций линейной скорости V_Y, V_Z с учетом принятых допущений:

$$V_Z = \sqrt{V_X^2 + V_Y^2 + V_Z^2} \cdot \sin\vartheta; \; V_Y = \sqrt{V_X^2 + V_Y^2 + V_Z^2} \cdot \cos\vartheta\cos A; \; A, \; \vartheta = \text{const},$$

разделим уравнение высоты на уравнение широты. Получим уравнение:

$$\frac{dh}{d\varphi} = \frac{\sin\vartheta\,(r+h)}{\cos\vartheta\cos A},$$

которое легко интегрируется методом разделения переменных:

$$\int_{h_0}^{h} \frac{dh}{(r+h)} = tg\vartheta \sec A \int_{\varphi_0}^{\varphi} d\varphi,$$

т. е. $\ln \frac{(r+h)}{(r+h_0)} = \mathrm{tg}\vartheta \sec A(\varphi - \varphi_0),$ откуда находим искомую аналитическую модель высоты в зависимости от изменения широты локомотива:

$$h = (r+h_0)\ \exp(\mathrm{tg}\vartheta \sec A(\varphi - \varphi_0)) - r,$$

где h – текущее изменение высоты; h_0, φ_0 – начальные значения высоты и широты на участке постоянных углов A и ϑ.

Найденная зависимость позволяет построить на основе кусочно-постоянной аппроксимации изменения углов A и ϑ обобщенную кусочно-нелинейную модель высоты на всем протяжении пути аналогично приведенной выше модели долготы:

$$h(\varphi) = \sum_{i=1}^{N} ((r+h_i)\ \exp(tg\vartheta_i \sec A_i(\varphi - \varphi_i)) - r)\delta(A - A_i)\delta(\vartheta - \vartheta_i),$$

где $\delta(A - A_i)$, $\delta(\vartheta - \vartheta_i)$ – двумерная дельта-функция; h_i, φ_i – начальные значения высоты и широты участка пути с постоянными известными углами A_i, ϑ_i; N – число участков пути с постоянными углами A_i, ϑ_i.

Последующий синтез навигационных алгоритмов проведем только для одного участка траектории с известными углами A и ϑ, имея в виду возможность элементарного перенесения полученных результатов на все остальные ее участки. Перед использованием рассмотренных выше пространственных моделей пути отметим предварительно следующий двойной эффект от их применения.

Во-первых, сокращается размерность уравнений состояния НС (1), так как отпадает необходимость в уравнениях, описывающих динамику изменения λ, h, а следовательно, и проекций скорости V_X, V_Z.

Проекции скорости V_Z, V_X в этом случае определяются через проекцию линейной скорости V_Y : $V_Z = V_Y \sec A\ \mathrm{tg}\vartheta$, $V_X = V_Y \mathrm{tg}A$.

Во-вторых, принципиальным обстоятельством здесь является то, что отсутствие необходимости использования уравнений проекций V_X, V_Z в уравнениях вектора состояния позволяет использовать их, как будет показано ниже, для построения автономного наблюдателя этого вектора, обеспечивающего апостериорную оценку при пропадании спутниковых измерений. Рассмотрим построение навигационного фильтра при использовании данных пространственных моделей пути более подробно.

4 Синтез навигационных алгоритмов тесно интегрированной инерциально-спутниковой системы

При синтезе навигационных алгоритмов уравнения состояния приобретают достаточно простой вид:

$$\begin{vmatrix}\dot{\alpha}\\ \dot{\beta}\\ \dot{\gamma}\end{vmatrix} = \Phi(\beta,\gamma)(Z_d - W_d); \tag{8}$$

$$\dot{V}_Y = C^T_{(2)}(\alpha,\beta,\gamma,\varphi)Z_a - (2\Omega\sin\varphi + V_Y tgA\ tg\varphi\left(r+h(\varphi)\right)^{-1})\ V_Y \mathrm{tg}A -$$
$$- V_Y^2\left(r+h(\varphi)\right)^{-1}\sec A\ \mathrm{tg}\vartheta + \Omega^2\left(r+h(\varphi)\right)\cos\varphi\sin\varphi - C^T_{(2)}(\alpha,\beta,\gamma,\varphi)W_a,$$

где $C^T_{(2)}(\alpha,\beta,\gamma,\varphi)$ – 2-я строка матрицы $C^T(\alpha,\beta,\gamma,\lambda(\varphi),\varphi)$.

В векторной форме Ланжевена, исходной для построения апостериорных оценок, уравнения (8) описываются следующим образом:

$$\dot{Y} = F(Y,t) + F_1(Y,t)\xi, \tag{9}$$

где $Y = \left|\alpha\ \ \beta\ \ \gamma\ \ \varphi\ \ V_Y\right|^T$, $Y(0) = Y_0$, $\xi = \left|W_d^T\ \ \ W_a^T\right|^T$; функции $F(Y,t), F_1(Y,t)$ приведены ниже:

$$F(Y,t) = \begin{vmatrix} \Phi(\beta,\gamma)Z_d \\ V_Y\left(r+h(\varphi)\right)^{-1} \\ C^T_{(2)}(\alpha,\beta,\gamma,\varphi)Z_a - (2\Omega\sin\varphi + V_Y\mathrm{tg}A\ \mathrm{tg}\varphi\left(r+h(\varphi)\right)^{-1})\ V_Y\mathrm{tg}A - \\ -V_Y^2\left(r+h(\varphi)\right)^{-1}\sec A\ \mathrm{tg}\vartheta + \Omega^2\cos\varphi\,\mathrm{s}\left(r+h(\varphi)\right)\mathrm{in}\,\varphi \end{vmatrix};$$

$$F_1(Y,t) = \begin{vmatrix} -\Phi(\beta,\gamma) & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -C^T_{(2)}(\alpha,\beta,\gamma,\varphi) \end{vmatrix}. \tag{10}$$

При использовании спутниковых измерений (7) в качестве наблюдателя вектора Y они также трансформируются соответствующим образом: вместо

переменных h, λ записываются их функциональные зависимости от $\varphi - h(\varphi)$, $\lambda(\varphi)$, а вектор V_S представляется как

$$V_S = \left| V_Y \mathrm{tg}A V_Y V_Y \sec A \,\mathrm{tg}\vartheta \right|^T = \left| \mathrm{tg}A 1 \sec A \,\mathrm{tg}\vartheta \right|^T V_Y,$$

т. е. в данном случае измерения и функции наблюдения СНС выглядят как

$$Z_R = H_R(\varphi) + W_{Z_R}, \quad Z_V = H_V(\varphi, V_Y) + W_{Z_V}. \tag{11}$$

Но главное в приведенной трансформации вектора состояния – это возможность построения автономного наблюдателя навигационных параметров на основе выходных сигналов акселерометров. С этой целью представим уравнения проекций скорости V_X, V_Z (не вошедшие в (8)) следующим образом (учитывая связи проекций линейной скорости $V_X = V_Y \ \mathrm{tg}A$, $V_Z = V_Y \sec A \ \mathrm{tg}\vartheta$):

$$\dot{V}_Y \mathrm{tg}A = C^T_{(1)}(\alpha,\beta,\gamma,\varphi) Z_a + \left(2\Omega \sin\varphi + V_Y \mathrm{tg}A \ \mathrm{tg}\varphi \left(r + h(\varphi)\right)^{-1}\right) V_Y -$$
$$- \left(2\Omega \cos\varphi + V_Y \mathrm{tg}A \left(r + h(\varphi)\right)^{-1}\right) V_Y \sec A \ \mathrm{tg}\vartheta - C^T_{(1)}(\alpha,\beta,\gamma,\varphi) W_a;$$

$$\dot{V}_Y \sec A \ \mathrm{tg}\vartheta = C^T_{(3)}(\alpha,\beta,\gamma,\varphi) Z_a + \left(2\Omega \cos\varphi + V_Y \mathrm{tg}A \ \left(r + h(\varphi)\right)^{-1}\right) V_Y \mathrm{tg}A +$$
$$+ V_Y{}^2 \left(r + h(\varphi)\right)^{-1} - \Omega^2 \left(r + h(\varphi)\right) \cos^2\varphi - g - C^T_{(3)}(\alpha,\beta,\gamma,\varphi) W_a.$$

Выражая в данных уравнениях производную скорости $\dot{V}_Y$ из ее уравнения, входящего в систему (8), имеем:

$$\left[C^T_{(2)}(\alpha,\beta,\gamma,\varphi) Z_a - \left(2\Omega \sin\varphi + V_Y \mathrm{tg}A \ \mathrm{tg}\varphi \left(r + h(\varphi)\right)^{-1}\right) V_Y \mathrm{tg}A -\right.$$
$$- V_Y^2 \sec A \ \mathrm{tg}\vartheta \left(r + h(\varphi)\right)^{-1} + \Omega^2 \left(r + h(\varphi)\right) \cos\varphi \sin\varphi -$$
$$\left. - C^T_{(2)}(\alpha,\beta,\gamma,\varphi) W_a\right] \mathrm{tg}A = C^T_{(1)}(\alpha,\beta,\gamma,\varphi) Z_a + \left(2\Omega \sin\varphi + V_Y \mathrm{tg}A \ \mathrm{tg}\varphi \left(r + h(\varphi)\right)^{-1}\right) V_Y -$$
$$- \left(2\Omega \cos\varphi + V_Y \mathrm{tg}A \left(r + h(\varphi)\right)^{-1}\right) V_Y \sec A \ \mathrm{tg}\vartheta - C^T_{(1)}(\alpha,\beta,\gamma,\varphi) W_a;$$

$$\left[C^T_{(2)}(\alpha,\beta,\gamma,\varphi) Z_a - \left(2\Omega \sin\varphi + V_Y \mathrm{tg}A \ \mathrm{tg}\varphi \left(r + h(\varphi)\right)^{-1}\right) V_Y \mathrm{tg}A -\right.$$
$$\left. - V_Y^2 \sec A \ \mathrm{tg}\vartheta \left(r + h(\varphi)\right)^{-1} + \Omega^2 \left(r + h(\varphi)\right) \cos\varphi \sin\varphi - C^T_{(2)}(\alpha,\beta,\gamma,\varphi) W_a\right] \sec A \ \mathrm{tg}\vartheta =$$
$$= C^T_{(3)}(\alpha,\beta,\gamma,\varphi) Z_a + \left(2\Omega \cos\varphi + V_Y \mathrm{tg}A \ \left(r + h(\varphi)\right)^{-1}\right) V_Y \mathrm{tg}A +$$
$$+ V_Y{}^2 \left(r + h(\varphi)\right)^{-1} - \Omega^2 \left(r + h(\varphi)\right) \cos^2\varphi - g - C^T_{(3)}(\alpha,\beta,\gamma,\varphi) W_a.$$

Выразим из полученных уравнений вектор выходных сигналов двух акселерометров, расположенных, например, по осям приборной СК Ox и Oy (выбор осей здесь не принципиален):

$$\begin{vmatrix} Z_{ax} \\ Z_{ay} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (c_{12}\mathrm{tg}A - c_{11}) & (c_{22}\mathrm{tg}A - c_{21}) \\ (c_{12}\sec A\,\mathrm{tg}\vartheta - c_{13}) & (c_{22}\sec A\,\mathrm{tg}\vartheta - c_{23}) \end{vmatrix}^{-1} \times$$

$$\times\Bigg\{ \begin{vmatrix} (c_{31} - c_{32}\mathrm{tg}A)Z_{az} + \\ +[\left(2\Omega\sin\varphi + V_Y\mathrm{tg}A\ \mathrm{tg}\varphi\left(r + h(\varphi)\right)^{-1}\right)V_Y\mathrm{tg}A + \\ + V_Y^2\sec A\ \mathrm{tg}\vartheta\left(r + h(\varphi)\right)^{-1} - \Omega^2\left(r + h(\varphi)\right)\cos\varphi\sin\varphi]\mathrm{tg}A + \\ + \left(2\Omega\sin\varphi + V_Y\mathrm{tg}A\ \mathrm{tg}\varphi\left(r + h(\varphi)\right)^{-1}\right)V_Y - \\ - \left(2\Omega\cos\varphi + V_Y\mathrm{tg}A\left(r + h(\varphi)\right)^{-1}\right)V_Y\sec A\ \mathrm{tg}\vartheta \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} (c_{33} - c_{32}\sec A\ \mathrm{tg}\vartheta)Z_{az} + \\ +[\ \left(2\Omega\sin\varphi + V_Y\mathrm{tg}A\ \mathrm{tg}\varphi\left(r + h(\varphi)\right)^{-1}\right)V_Y\mathrm{tg}A + \\ + V_Y^2\sec A\ \mathrm{tg}\vartheta\left(r + h(\varphi)\right)^{-1} - \\ - \Omega^2\left(r + h(\varphi)\right)\cos\varphi\sin\varphi \end{vmatrix}\sec A\ \mathrm{tg}\vartheta + \\ + \left(2\Omega\cos\varphi + V_Y\mathrm{tg}A\ \left(r + h(\varphi)\right)^{-1}\right)V_Y\mathrm{tg}A + \\ + V_Y{}^2\left(r + h(\varphi)\right)^{-1} - \Omega^2\left(r + h(\varphi)\right)\cos^2\varphi - g \end{vmatrix} + \tag{12}$$

$$+ \begin{vmatrix} C_{(2)}^T(\alpha,\beta,\gamma,\varphi)\mathrm{tg}A - C_{(1)}^T(\alpha,\beta,\gamma,\varphi) \\ C_{(2)}^T(\alpha,\beta,\gamma,\varphi)\sec A\ \mathrm{tg}\vartheta - C_{(3)}^T(\alpha,\beta,\gamma,\varphi) \end{vmatrix} W_a\Bigg\} = H_a(Y,t) + H_w(Y,t)W_a,$$

где $c_{ij} = c_{ij}(\alpha,\beta,\gamma,\varphi)$ – ij-й элемент матрицы $C(\alpha,\beta,\gamma,\varphi)$; $C_{(i)}^T(\alpha,\beta,\gamma,\varphi)$ – i-я строка матрицы $C^T(\alpha,\beta,\gamma,\varphi)$; функции $H_a(Y,t)$, $H_w(Y,t)$ приведены ниже;

$$H_a(Y,t) = \begin{vmatrix} (c_{12}\mathrm{tg}A - c_{11}) & (c_{22}\mathrm{tg}A - c_{21}) \\ (c_{12}\sec A\,\mathrm{tg}\vartheta - c_{13}) & (c_{22}\sec A\,\mathrm{tg}\vartheta - c_{23}) \end{vmatrix}^{-1} \times$$

$$\times \begin{vmatrix} (c_{31}-c_{32}\mathrm{tg}A)Z_{az}+\big[\ \Big(2\Omega\sin\varphi+V_Y\mathrm{tg}A\ \mathrm{tg}\varphi\big(r+h(\varphi)\big)^{-1}\Big)V_Y\mathrm{tg}A+ \\ +V_Y^2\sec A\ \mathrm{tg}\vartheta\big(r+h(\varphi)\big)^{-1}-\Omega^2\big(r+h(\varphi)\big)\cos\varphi\sin\varphi\big]\mathrm{tg}A+ \\ +\Big(2\Omega\sin\varphi+V_Y\mathrm{tg}A\ \mathrm{tg}\varphi\big(r+h(\varphi)\big)^{-1}\Big)V_Y- \\ -\Big(2\Omega\cos\varphi+V_Y\mathrm{tg}A\big(r+h(\varphi)\big)^{-1}\Big)V_Y\sec A\ \mathrm{tg}\vartheta \\ \\ (c_{33}-c_{32}\sec A\ \mathrm{tg}\vartheta)Z_{az}+\big[\ \Big(2\Omega\sin\varphi+V_Y\mathrm{tg}A\ \mathrm{tg}\varphi\big(r+h(\varphi)\big)^{-1}\Big)V_Y\mathrm{tg}A+ \\ +V_Y^2\sec A\ \mathrm{tg}\vartheta\big(r+h(\varphi)\big)^{-1}-\Omega^2\big(r+h(\varphi)\big)\cos\phi\sin\varphi\ \ \big]\sec A\ \mathrm{tg}\vartheta+ \\ +\Big(2\Omega\cos\varphi+V_Y\mathrm{tg}A\ \big(r+h(\varphi)\big)^{-1}\Big)V_Y\mathrm{tg}A+ \\ +V_Y{}^2\big(r+h(\varphi)\big)^{-1}-\Omega^2\big(r+h(\varphi)\big)\cos^2\varphi-g \end{vmatrix}; \tag{13}$$

$$H_w(Y,t)=\begin{vmatrix} (c_{12}\mathrm{tg}A-c_{11}) & (c_{22}\mathrm{tg}A-c_{21}) \\ (c_{12}\sec A\,\mathrm{tg}\vartheta\ -c_{13}) & (c_{22}\sec A\,\mathrm{tg}\vartheta\ -c_{23}) \end{vmatrix}^{-1}\times$$

$$\times\begin{vmatrix} C^T_{(2)}(\alpha,\beta,\gamma,\varphi)\mathrm{tg}A-C^T_{(1)}(\alpha,\beta,\gamma,\varphi) \\ C^T_{(2)}(\alpha,\beta,\gamma,\varphi)\sec A\ \mathrm{tg}\vartheta-C^T_{(3)}(\alpha,\beta,\gamma,\varphi) \end{vmatrix}.$$

Аналогичным образом могут быть построены уравнения автономного наблюдения и для других пар акселерометров, в информационном отношении эквивалентные (12).

Несмотря на более сложную модель информационного сигнала по сравнению со спутниковыми измерениями, дополнительным преимуществом данного наблюдателя (помимо автономности) является возможность явного наблюдения всех навигационных переменных (в том числе угловых параметров), что принципиально влияет на точность оценки вектора состояния БИНС.

Уравнения (9), (12), представленные в классической форме «объект – наблюдатель», позволяют дать теоретически строгую апостериорную оптимальную оценку навигационного вектора по выбранному вероятностному критерию. Поскольку точное решение задачи связано с необходимостью интегрирования интегродифференциального уравнения в частных производных (уравнения Стратоновича) для апостериорной плотности вероятности, то, с целью уменьшения вычислительных затрат, используем далее субоптимальную оценку навигационного вектора на основе гауссовской аппроксимации апостериорной плотности вероятности (так называемый нелинейный, или обобщенный, фильтр Калмана) [13]:

$$\dot{\hat{Y}} = F\left(\hat{Y},t\right)+ K\left(\hat{Y},t\right)\left[\left|\begin{matrix}Z_{ax}\\ Z_{ay}\end{matrix}\right| - H_a\left(\hat{Y},t\right)\right]; \tag{14}$$

$$K\left(\hat{Y},t\right)= \left\{R\frac{\partial H_a^T\left(\hat{Y},t\right)}{\partial \hat{Y}} + F_1\left(\hat{Y},t\right)D_A H_w^T\left(\hat{Y},t\right)\right\}\left(H_w\left(\hat{Y},t\right)D_a H_w^T\left(\hat{Y},t\right)\right)^{-1};$$

$$\dot{R}\left(\hat{Y},t\right)= \frac{\partial F\left(\hat{Y},t\right)}{\partial \hat{Y}}R\left(\hat{Y},t\right)+ R\left(\hat{Y},t\right)\frac{\partial F^T\left(\hat{Y},t\right)}{\partial \hat{Y}} + F_1\left(\hat{Y},t\right)D_\xi F_1^T\left(\hat{Y},t\right) -$$

$$-K\left(\hat{Y},t\right)\left(H_w\left(\hat{Y},t\right)D_a H_w^T\left(\hat{Y},t\right)\right)K^T\left(\hat{Y},t\right),$$

где $\hat{Y}_0 = M\left(Y_0\right);\ R_0 = M\{\left(Y_0-\hat{Y}_0\right)\left(Y_0-\hat{Y}_0\right)^T\};\ D_\xi = \left|\begin{matrix}D_d & 0\\ 0 & D_a\end{matrix}\right|,\ D_A = \left|\begin{matrix}0\\ D_a\end{matrix}\right|.$

Фильтр (14) необходимо использовать при отсутствии спутниковых измерений, обеспечивая непрерывность и устойчивость процесса оценки в целом. При наличии же спутниковых сигналов целесообразно их комплексировать с сигналами акселерометров. В этом случае уравнения комплексированного наблюдателя, учитывающие дискретный характер спутниковых сообщений, в векторной форме принимают следующий вид:

$$Z_{\text{к}}^{\text{инт}} = \left|\begin{matrix}Z_{ax}\\ Z_{ay}\\ Z_R\\ Z_V\end{matrix}\right| = \left|\begin{matrix}H_a\left(Y,\text{к}\right)\\ H_{\text{R}}(\varphi)\\ H_{\text{V}}(\varphi,V_Y)\end{matrix}\right| + \left|\begin{matrix}H_w\left(Y,\text{к}\right) & 0\\ 0 & E_2\end{matrix}\right|\left|\begin{matrix}W_a\\ W_R\\ W_V\end{matrix}\right| =$$

$$= H^{\text{инт}}\left(Y,\text{к}\right)+ H_0{}^{\text{инт}}\left(Y,\text{к}\right)\zeta_{\text{к}}^{\text{инт}}, \tag{15}$$

где E_2 – единичная матрица размерности 2; к – текущий такт поступления спутниковых измерений; $\zeta_{\text{к}}^{\text{инт}} = \left|W_a\ \ W_{Z_R}\ \ W_{Z_V}\right|^T$ – белый гауссовский шум с нулевым средним и матрицей интенсивности $D_{\text{инт}} = \left|\begin{matrix}D_a & 0 & 0\\ 0 & D_{Z_R} & 0\\ 0 & 0 & D_{Z_V}\end{matrix}\right|$.

Подобная задача относится уже к задачам непрерывно-дискретной фильтрации и просто с помощью фильтра Калмана решена быть не может [13].

В соответствии с [13] гауссовский алгоритм дискретной оценки непрерывного вектора Y для расширенного наблюдателя (15) на к-м такте измерения имеет вид:

$$\hat{Y}(t_K+0)=\hat{Y}_{K0}+R(t_K+0)\frac{\partial H^{\text{инт}T}\left(\hat{Y}_{K0},\text{к}\right)}{\partial\hat{Y}}\left(H_0{}^{\text{инт}}\left(\hat{Y}_{K0},\text{к}\right)D_{\text{инт}}H_0{}^{\text{инт}T}\left(\hat{Y}_{K0},\text{к}\right)\right)^{-1}\times$$

$$\times\left[Z_{\text{к}}^{\text{инт}}-H^{\text{инт}}\left(\hat{Y}_{K0},\text{к}\right)\right]; \qquad (16)$$

$$R(t_K+0)=R_{\text{к}0}-R_{\text{к}0}\frac{\partial H^{\text{инт}T}\left(\hat{Y}_{K0},\text{к}\right)}{\partial\hat{Y}}\times\left\{\frac{\partial H^{\text{инт}}\left(\hat{Y}_{K0},\text{к}\right)}{\partial\hat{Y}}R_{k0}\frac{\partial H^{\text{инт}T}\left(\hat{Y}_{K0},\text{к}\right)}{\partial\hat{Y}}+\right.$$

$$\left.+H_0{}^{\text{инт}}\left(\hat{Y}_{K0},\text{к}\right)D_{\text{инт}}H_0{}^{\text{инт}T}\left(\hat{Y}_{K0},\text{к}\right)\right\}^{-1}\frac{\partial H^{\text{инт}}\left(\hat{Y}_{K0},\text{к}\right)}{\partial\hat{Y}}R_{K0}.$$

При этом следует подчеркнуть, что непрерывный фильтр (14) используется только на временных интервалах $[t_{K-1}, t_K]$, $k = 1, 2, \ldots$, между дискретными спутниковыми измерениями (в том числе при их пропадании), поэтому начальные условия $\hat{Y}(t_{K-1}), R(t_{K-1})$ уравнений (14) на интервале $[t_{K-1}, t_K]$ формируются как результат дискретной оценки $\hat{Y}_{K-1}=\hat{Y}(t_{K-1}+0),.. = R(t_{K-1}+0)$ вектора состояния НС Y в момент времени t_{K-1}:

$$\hat{Y}(t_{K-1})=\hat{Y}_{K-1}=\hat{Y}(t_{K-1}+0),\ R(t_{K-1})=R_{K-1}=R(t_{K-1}+0).$$

В свою очередь, результат интегрирования $\hat{Y}(t_K), R(t_K)$ уравнений непрерывной оценки (14) в конце временного интервала $[t_{K-1}, t_K]$ является начальным условием $\hat{Y}(t_K-0)=\hat{Y}_{K0}, R(t_K-0)=R_{K0}$ для выполнения алгоритма дискретной оценки (16) в момент времени t_K:

$$\hat{Y}(t_K-0)=\hat{Y}_{K0}=\hat{Y}(t_K),\ R(t_K-0)=R_{K0}=R(t_K).$$

Подобная связь начальных и конечных условий алгоритмов дискретной и непрерывной оценки является одним из основных условий корректного функционирования режима тесной интеграции автономной БИНС и СНС [14, 15].

Для иллюстрации возможности эффективного использования предложенного алгоритма интеграции было проведено численное моделирование уравнений оценки (14), (16).

5 Пример

Моделирование осуществлялось на временном интервале $t \in [0; 1000]$ с с шагом $\Delta t = 0{,}01$ с методом Рунге – Кутты 4-го порядка. (Следует отметить, что размерность фильтра, с учетом симметричности ковариационной матрицы, сократилась по сравнению с оценкой полного вектора состояния (1) с 54 уравнений до 20.) Модуль скорости локомотива был выбран постоянным и равным 20 м/с, угол $A = \frac{\pi}{6}$, угол $\vartheta = \frac{\pi}{60}$. В качестве модели помех был использован аддитивный гауссовский вектор-шум с нулевым математическим ожиданием и интенсивностью для акселерометров – $(10^{-5}$ м/с$^2)^2$ с, кодовых измерений – 15 м$^2 \cdot$ с, доплеровских измерений – 0,5 м/с$^2 \cdot$ с. Моделирование пропадания спутниковых сигналов осуществлялось на 100-й и 500-й секундах на временном интервале 50 секунд. По окончании временного интервала моделирования – на интервале [900; 1000] с – максимальные ошибки компонентов вектора Y составили: по углам ориентации – $8 \cdot 10^{-5}$ рад, по проекции скорости $V_Y - 0{,}02$ м/с, по широте – $3 \cdot 10^{-7}$ рад.

Заключение

Рассмотренный подход к использованию пространственных моделей пути, сформированных на основе геодезических измерений или картографической информации, позволяет существенно упростить решение навигационной задачи позиционирования локомотивов и повышает его точность. Исследование показало, что использование таких моделей не требует линеаризации навигационных уравнений (как в случае построения уравнений ошибок), повышает точность позиционирования; сокращает размерность оцениваемого вектора навигационных параметров, так как отпадает необходимость в уравнениях, описывающих динамику изменения λ, h, а следовательно, и проекций скорости V_X, V_Z; расширяет вектор наблюдений, позволяя принципиально решить задачу апостериорной оценки параметров движения автономными измерителями при пропадании спутниковых сообщений.

Для описания движения локомотива были выбраны несколько правых систем координат, а также принят в качестве модели шумов белый гауссовский шум.

Наблюдение (а как следствие, и апостериорная оценка на основе существующих методов теории стохастической фильтрации) приведенного полного вектора навигационных параметров осуществимо только с помощью внешних измерителей (в частности, СНС), поскольку информационные модели всех параметров уже использованы в уравнениях вектора состояния БИНС.

С использованием в качестве системы внешних измерений СНС рассмотрены только кодовые и доплеровские измерения как дающие полное представление о принципах решения задачи построения интегрированной НС на основе пространственных моделей пути. Сигналы измерений содержат информацию обо всех навигационных параметрах линейного движения локомотива, но не обеспечивают наблюдения параметров вращения приборного трехгранника относительно центра масс локомотива (подобная ситуация является типичной для существующих алгоритмов фильтрации в СНС), т. е. использование только спутниковых измерений может привести к неустойчивости процесса оценки угловых параметров локомотива. Использование пространственных моделей пути принципиально меняет ситуацию.

Для иллюстрации возможности эффективного использования предложенного алгоритма интеграции было проведено численное моделирование уравнений оценки.

Полученная точность сопоставима с точностью оценки спутниковыми средствами параметров линейного движения (при том, что угловые параметры СНС оценить не позволяет) в дифференциальном режиме при непрерывном поступлении спутниковых измерений и свидетельствует о возможности эффективного практического использования предложенного подхода, реализующего все заявленные преимущества.

Библиографический список

1. Интегрированные инерциально-спутниковые системы : сб. статей и докладов / Сост. О. А. Степанов ; под общ. ред. академика РАН В. Г. Пешехонова. – СПб. : ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 2001. – 233 с.
2. Анучин О. Н. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных локомотивов / О. Н. Анучин, Г. И. Емельянцев ; под общей ред. академика РАН В. Г. Пешехонова. – СПб. : ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 2003. – 390 с.
3. Меерович В. Д. Стохастическая фильтрация навигационных параметров подвижных объектов с использованием комплексирования спутниковых и трекерных измерений / В. Д. Меерович, И. Д. Долгий // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер. Технические науки. – 2015. – № 1 (182). – С. 19–26.
4. Вдовиченко С. С. Интеграция инерциально-спутниковых навигационных систем на основе пространственных моделей движения / С. С. Вдовиченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 1 (49). – С. 65–71.
5. Соколов С. В. Основы синтеза многоструктурных бесплатформенных навигационных систем / С. В. Соколов, В. А. Погорелов.– М. : Физматлит, 2009. – 184 с.

6. Каперко А. Ф. Классификация элементов программно-технического комплекса бесплатформенной инерциальной навигационной системы / А. Ф. Каперко, В. Л. Легостаев // Датчики и системы. – 2010. – № 12. – С. 2–7.
7. Белицер Э. Н. Адаптивная фильтрация случайного сигнала в гауссовском белом шуме / Э. Н. Белицер, Ф. Н. Еникеева // Проблемы передачи информации. – 2008. – Т. 44. – № 4. – С. 39–51.
8. Ишлинский А. Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация / А. Ю. Ишлинский. – М. : Наука, 1976. – 672 с.
9. Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС (5.1 редакция). – М., 2008. – 74 с.
10. Соколов С. В. Навигационные алгоритмы интегрированных инерциально-спутниковых систем на основе пространственных моделей движения / С. В. Соколов, С. С. Вдовиченко // Авиакосмическое приборостроение. – 2012. – № 12. – С. 36–45.
11. Инсаров В. В. Алгоритмы комплексного оценивания в интегрированной системе наведения с использованием нескольких источников информации / В. В. Инсаров // XIII Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам : сб. материалов. – [СПб.], 2006. – С. 157–159.
12. Лёвин Б. А. Теория адаптивных систем навигации и управления железнодорожного транспорта на основе глобальной навигационной спутниковой системы глонасс и навигационных функций : монография / Б. А. Лёвин, С. И. Матвеев, И. Н. Розенберг // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 3–2. – С. 223а.
13. Тихонов В. И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В. И. Тихонов, В. Н. Харисов. – М. : Радио и связь, 1991. – 608 с.
14. Уманский В. И. Решение задачи интеграции спутниковых и инерциальных навигационных систем на основе теории нелинейной фильтрации / В. И. Уманский // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер. Технические науки. – 2011. – № 4. – С. 32–37.
15. Конев Д. С. Алгоритм навигационной задачи интегрированной навигационной системы транспортного средства / Д. С. Конев, И. В. Щербань, С. В. Соколов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 4. – С. 51–57.

Igor D. Dolgy
Department «Automation and telemechanics on railway transport»
Rostov state transport university
Igor N. Rosenberg,
Alexandra A. Bayandurova
Department «Geodesy, geoinformatics and navigation»
Russian university of transport

The synthesis of the tight coupling inertial-satellite navigation system locomotive based on the analytical model of it's movement

The possibility of using the analytical model of a trajectory of movement of the locomotive in the synthesis of its tight coupling inertial-satellite navigation system. In view of the fact that currently the integration algorithms of strapdown inertial navigation systems and satellite navigation systems are formed in most cases either on the basis of the differential model of motion of the locomotive, either on the basis of error equations of inertial navigation systems, information about the trajectory of the locomotive is very limited in accuracy, which leads to significant errors in the inertial-satellite systems in close integration, or the rapid divergence of the filtering process in case of satellite communications. However, as the locomotives are moving on a known high-precision spatial trajectories, it is proposed to use a spatial model of the way that will greatly simplify the solution of a navigational task. It is shown that application of this model reduces the dimension of the estimated vector of the navigation parameters, reducing the computational cost, and allows you to fundamentally solve the problem a posteriori estimates of the motion parameters of auxiliary gauges in case of satellite communications. These study precision indicates the possibility of effective use of the proposed approach and the implementation of the claimed benefits.

inertial navigation system; satellite navigation system; the spatial model of the track; tight integration; aposteriori estimation; nonlinear filtering

References

1. Integrated inertial-satellite systems. Sat. St. [Integrirovannye inercial'no-sputnikovye sistemy] (2001). Comp. O.A. Stepanov. Under total Ed. RAS academician V.G. Peshekhonov. St. Petersburg, GNTS RF-TSNII «Elektropribor». – 233 p.
2. Anuchin O.N., Yemelyantsev G. I. (2003). Integrated system of orientation and navigation for Maritime mobile locomotives [Integrirovannye sistemy orientacii i navigacii dlya morskih podvizhnyh lokomotivov]. Under the General editorship of the RAS Academician V.G. Peshekhonov. St. Petersburg, GNTS RF-TSNII «Elektropribor». – 390 p.
3. Meerovitsh V. D., Dolgii I.D. (2015). Stochastic filtering navigation parameters of moving objects using integration of satellite and tracker measurements [Stohastiches-

kaya fil'traciya navigacionnyh parametrov podvizhnyh ob'ektov s ispol'zovaniem kompleksirovaniya sputnikovyh i trekernyh izmerenij]. News of higher educational institutions. The Nth Caucasus region. Series: Technical sciences [Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Seriya: Tekhnicheskie nauki], N 1 (182). – Pp. 19–26.

4. Vdovichenko S. C. (2013). Integration of inertial-satellite navigation systems based on spatial models of movement [Integraciya inercial'no-sputnikovyh navigacionnyh sistem na osnove prostranstvennyh modelej dvizheniya]. Bulletin of the Rostov state transport university [Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya], N 1 (49). – Pp. 65–71.
5. Sokolov S. V., Pogorelov V. A. (2009). Fundamentals of the synthesis of multi-structured strapdown navigation systems [Osnovy sinteza mnogostrukturnyh besplatformennyh navigacionnyh system]. Moscow, Fizmatlit. – 184 p.
6. Kaperko A. F., Legostaev V. L. (2010). Classification of elements of program-technical complex of strapdown inertial navigation system [Klassifikaciya ehlementov programmno-tekhnicheskogo kompleksa besplatformennoj inercial'noj navigacionnoj sistemy]. Sensors and systems [Datchiki i sistemy], N 12. – Pp. 2–7.
7. Belitser E. N., Enikeeva F. N. (2008). Adaptive filtering of a random signal in Gaussian white noise [Adaptivnaya fil'traciya sluchajnogo signala v gaussovskom belom shume]. Problems of information transmission [Problemy peredachi informacii]. Vol. 44, N 4. – Pp. 39–51.
8. Ishlinskii A. Yu. (1976). Orientation, gyroscopes and inertial navigation [Orientaciya, giroskopy i inercial'naya navigaciya]. Moscow, Nauka. – 672 p.
9. The interface control document for GLONASS (5.1 edition) [Interfejsnyj kontrol'nyj dokument GLONASS] (2008), Moscow. – 74 p.
10. Sokolov S. V., Vdovichenko S. S. (2012). Navigation algorithms are the integrated inertial-satellite systems on the basis of spatial motion models [Navigacionnye algoritmy integrirovannyh inercial'no-sputnikovyh sistem na osnove prostranstvennyh modelej dvizheniya]. Aerospace instrument-making [Aviakosmicheskoe priborostroenie], N 12. – Pp. 36–45.
11. Insarov V. V. (2006). Algorithms for complex evaluation in the integrated guidance system using multiple sources of information [Algoritmy kompleksnogo ocenivaniya v integrirovannoj sisteme navedeniya s ispol'zovaniem neskol'kih istochnikov informacii], the book of the XIII Saint-Petersburg international conference on integrated navigation systems, the Collection of materials [v sbornike: XIII Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferenciya po integrirovannym navigacionnym sistemam Sbornik materialov]. – Pp. 157–159.
12. Levin B. A., Matveev S. I., Rozenberg I. N. (2015). The theory of adaptive systems navigation and control of rail transport on the basis of a global navigation satellite system GLONASS and navigational functions (monograph) [Teoriya adaptivnyh sistem navigacii i upravleniya zheleznodorozhnogo transporta na osnove global'noj navigacionnoj sputnikovoj sistemy glonass i navigacionnyh funkcij (monografiya)]. International journal of experimental education [Mezhdunarodnyj zhurnal ehksperimental'nogo obrazovaniya], N 3–2. – Pp. 223a.

13. Tikhonov V. I., Kharisov V. N. (1991). Statistical analysis both synthesis of radio engineering devices and systems [Statisticheskij analiz i sintez radiotekhnicheskih ustrojstv i sistem.]. Moscow, Radio and communication [Radio i svyaz'].– 608 p.
14. Umansky V. I. (2011). Solution of the problem of the integration of satellite and inertial navigation systems based on the theory of nonlinear filtering [Reshenie zadachi integracii sputnikovyh i inercial'nyh navigacionnyh sistem na osnove teorii nelinejnoj fil'tracii.]. News of higher educational institutions. The Nth Caucasus region. Series: Technical sciences [Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Seriya: Tekhnicheskie nauki], N 4.– Pp. 32–37.
15. Konev D. S., Scherban I. V., Sokolov S. V. (2013). The Algorithm of navigation the integrated navigation system of the vehicle [Algoritm navigacionnoj zadachi integrirovannoj navigacionnoj sistemy transportnogo sredstva]. Proceedings of Rostov state university of railways [Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya], N 4.– Pp. 51–57.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Вал. В. Сапожниковым
Поступила в редакцию 19.06.2017, принята к публикации 07.07.2017

ДОЛГИЙ Игорь Давидович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте» Ростовского государственного университета путей сообщения.
e-mail: mtn73@yandex.ru

РОЗЕНБЕРГ Игорь Наумович – доктор технических наук, профессор кафедры «Геодезия, геоинформатика и навигация» Российского университета транспорта (МИИТ).
e-mail: rozgeo@yandex.ru

БАЯНДУРОВА Александра Александровна – аспирантка кафедры «Геодезия, геоинформатика и навигация» Российского университета транспорта (МИИТ).
e-mail: alexandra.bayandurova@mail.ru

© Долгий И. Д., Розенберг И. Н., Баяндурова А. А., 2017

УДК 656.256.3

Д. А. Никитин, канд. техн. наук
Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»,
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ АЛС-ЕН ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДУЛЬНО ВЗВЕШЕННОГО КОДА С СУММИРОВАНИЕМ

Описываются назначение системы локомотивной сигнализации, основные функции, структурные схемы и их разновидности. Производится сравнительный анализ плюсов и минусов существующих систем локомотивной сигнализации. Более подробно рассмотрена система многозначной локомотивной сигнализации единого ряда АЛС-ЕН. Предложен метод модификации алгоритмов кодирования сигнала, передаваемого по рельсовой линии в системе АЛС-ЕН, проведен анализ помехоустойчивых свойств системы при замене модифицированного кода Бауэра на модульно взвешенный код с суммированием. Произведен анализ всех возможных ложных переходов кодовых комбинаций в канале передачи данных. Представляются результаты сравнения обнаруживающей способности рассматриваемых кодов в канале, а также основные причины отказов современных систем локомотивной сигнализации. Полученные методы модификации программных модулей шифрации и дешифрации данных позволили расширить значность системы в 4 раза – с 256 команд до 1024, отвечая всем требованиям безопасности при передаче данных.

локомотивная сигнализация; интервальное регулирование; значность системы; взвешивание разрядов; модульный код; избыточность; обнаруживающая способность

Введение

Система локомотивной сигнализации АЛС-ЕН предназначена для повышения безопасности движения поездов, увеличения пропускной способности и улучшения условий труда локомотивных бригад [1]. Системы локомотивной сигнализации разделяют на точечные и непрерывные. Точечные решения применялись ранее, и информация с путевого оборудования на локомотив поступала в определенные моменты пересечения поездом передающих устройств; в непрерывных системах локомотивной сигнализации информация постоянно передается с рельсовой линии на приемное оборудование локомотива посредством индуктивной связи по пути следования состава.

Системы АЛС состоят из напольного и локомотивного оборудования, которые позволяют решать следующие задачи:

1) ступенчатый контроль скорости поезда;

2) предоставление машинисту информации о состоянии участков пути;

3) предоставление информации о показаниях путевых светофоров, определяющих допустимую скорость движения;

4) повышение безопасности перевозочных процессов.

Наиболее распространенной системой локомотивной сигнализации на данный момент является АЛС непрерывного действия (АЛСН). В данной системе амплитудно-модулированный сигнал передается по рельсовой линии и с помощью приемных катушек на локомотиве поступает на дешифраторы локомотивного оборудования. АЛСН имеет следующие недостатки: малая значность системы (коды КЖ, Ж, З); низкая устойчивость к помехам за счет использования амплитудной модуляции; частые сбои из-за зависимости от напряжения; применение числового кода для кодирования информации; использование в конструкции электромагнитных реле; большое количество соединений; прием сигналов с соседних путей; прием сигналов с впередилежащего блок-участка.

С развитием высокоскоростных магистралей увеличилась длина тормозного пути поездов, появилась необходимость передачи информации не только о свободности пути, но и о допустимой скорости движения в зависимости от технического состояния пути (кривые участки, недостаточная прочность участков, искусственные сооружения) [1]. Таким образом, была разработана система АЛС-ЕН, позволяющая передавать на локомотив расширенную информацию, а именно:

1) о количестве свободных блок-участков (до 6);

2) скорости проследования следующего по ходу движения светофора (существует 16 градаций в диапазоне от 0 до 200 км/ч);

3) длине впередилежащего блок участка (длина больше или меньше тормозного пути нормативного поезда);

4) об отметке о движении поезда по главному пути или по отклонению на боковой путь;

5) сообщения о приближении к светофору с запрещающим проезд показанием, светофору с пригласительным огнем;

6) о номере пути (четный или нечетный) при двухпутной организации движения, что обеспечивает исключение подпиток с соседних путей;

7) о четном или нечетном блок-участке, что обеспечивает исключение подпиток от смежных блок-участков и из-под колес впередиидущего поезда.

Надежность системы АЛС-ЕН обеспечивается за счет использования элементов микросхем малой и средней степени интеграции, а также троирования напольного оборудования и дублирования локомотивных устройств. Для пере-

дачи информации по рельсовой линии используется сигнал несущей частоты 174,38 Гц фазоразностной модуляции, что дает некоторый выигрыш в помехозащищенности системы по сравнению с амплитудно-модулированным сигналом системы АЛСН. Информация передается по двум подканалам: по первому – информация о градации скоростей, а по второму – данные синхрогруппы для исключения подпиток [2].

1 Структура системы АЛС-ЕН

Напольные устройства системы АЛСН-ЕН (рис. 1) состоят из формирователя сигналов (ФС-ЕН), усилителя мощности (УМ), устройства защиты и согласования (УЗС), блока питания формирователя сигналов (БПФС), сетевого трансформатора (ПТ).

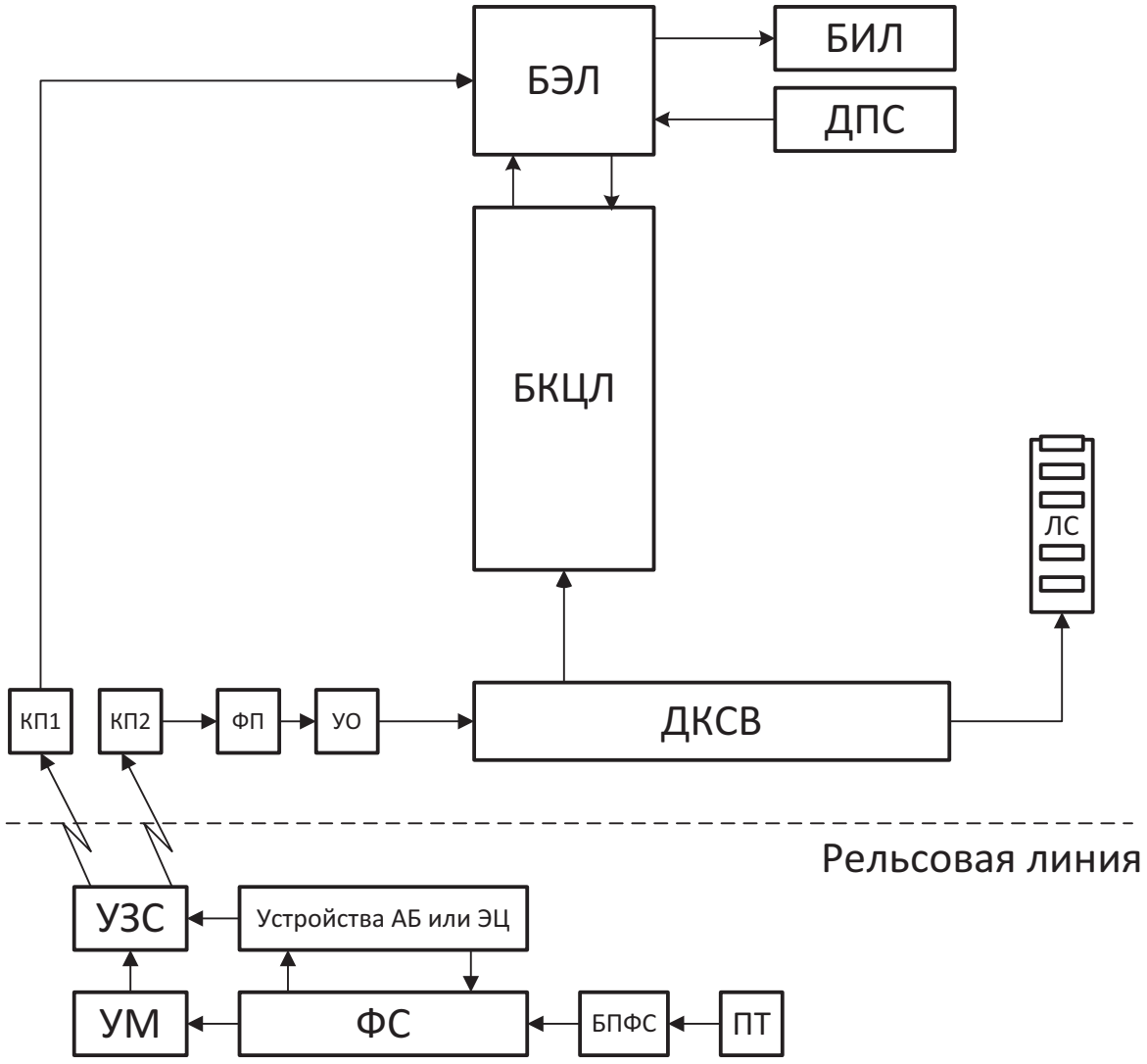


Рис. 1. Структурная схема АЛС-ЕН

Сетевой трансформатор ПТ обеспечивает подачу необходимых питающих напряжений на блок БПФС, который, в свою очередь, подает питание на формирователь сигналов (ФС). Блок ФС формирует фазоманипулированные сигналы частотой 174,38 Гц, которые в дальнейшем поступают на усилитель мощности и далее на блок УЗС, реализующий совместимость системы АЛС-ЕН и автоблокировки в рельсовой линии. Блок УМ питается от источника переменного тока частотой 50 Гц [2, 3].

ФС состоит из задающего генератора, датчиков кодовых комбинаций по двум подканалам, а также модулятора для модуляции сообщений, закодированных модифицированным кодом Бауэра [2]. Сигналы на блоке ФС формируются в зависимости от показаний устройств автоблокировки (АБ) или электрической централизации (ЭЦ); блок ФС имеет два выхода: частичного отказа, полного отказа. Это позволяет фиксировать сбои в режиме работы напольного оборудования АЛС-ЕН.

Блок УМ включает в себя сам усилитель мощности, а также кодовый трансформатор. УМ гарантирует необходимый ток на рельсовой линии.

Основные локомотивные устройства в системе АЛС-ЕН состоят из двух приемных катушек (КП1 и КП2), которые снимают показания с рельсовой линии за счет индуктивной связи, полосового фильтра (ФП), усилителя-ограничителя (УО), электронного блока (БЭЛ), блока индикации локомотива (БИЛ), а также блока коммутации цепей локомотива (БКЦЛ) и датчиков скорости (ДПС).

Катушки КП1 и КП2 работают для разных систем локомотивной сигнализации: КП1 для АЛС-ЕН, КП2 для АЛСН (в случае, когда локомотивная сигнализация АЛСН-ЕН невозможна). Обе системы, АЛСН и АЛСН-ЕН, реализованы в качестве локомотивного оборудования, переход осуществляется в автоматическом режиме в том случае, когда на катушку КП1 не приходят сигналы АЛС-ЕН. При возобновлении поступления сигналов АЛС-ЕН на катушке КП1 локомотивное оборудование вновь переключается на работу более современной системы сигнализации [2, 3].

С катушки КП1 на БЭЛ поступают кодовые сигналы. БЭЛ состоит из приемника сигналов системы АЛС-ЕН, измерителя скорости движения поезда, связанной с датчиком пути, датчика скорости ДПС, который устанавливается на редукторе или буксе локомотива. БЭЛ содержит декодер для сигналов системы АЛС, ячейку логической обработки для сравнения фактической скорости и допустимой в соответствии с информацией, полученной от декодера, устройство контроля правильной работы всей системы и усилитель сигналов управления экстренным торможением через БКЦЛ.

БИЛ, в соответствии с входными данными, может отображать количество свободных блок-участков, тип блок-участка (нормальный/укороченный), сигнал («красный»/«желтый с красным»/«желтый»/«зеленый»/«белый»/«белый мигающий»), маршрут следования (прямой/с отклонением), на циф-

ровых индикаторах – значение контролируемой скорости (скорости, которую поезду необходимо иметь в конце блок-участка), значение допустимой скорости (скорости, при которой будет применено экстренное торможение), индикаторы движения по перегону/по отклонению на боковой путь станции, индикаторы длины впередилежащего блок-участка [4].

БКЦЛ связан с различными датчиками, предоставляющими данные о состоянии локомотива. Контролируются контакты контроллера и рукоятки реверса, контакты рукоятки (педали) бдительности и кнопка выключения красного огня в случае, если поезд движется по участку без локомотивной сигнализации [2, 3].

Для обеспечения безопасности при использовании системы АЛС-ЕН путевая аппаратура строится с использованием трехкратного резервирования, а локомотивная – с двукратным резервированием основных блоков. Правильность функционирования блока ФС обеспечивается мажоритарной схемой «2 из 3» [4].

2 Принципы кодирования информации в системе АЛС-ЕН

При передаче данных с путевого оборудования на локомотивное в системе АЛС-ЕН в канале рельсовой линии сигнал имеет несущую частоту 174,38 Гц с применением двукратной фазоразностной модуляции и модифицированного кода Бауэра с количеством информационных битов $m = 4$, количеством контрольных битов $k = 4$ (табл. 2). Каждая посылка, состоящая из одного бита информации для подканала состоит из 16 периодов от несущей частоты (пример – на рис. 2). При условии использования разности фаз по каналу можно передавать двухбитную комбинацию одновременно, соответственно по двум подканалам передается информация, состоящая из 8-битовых сообщений, необходимых для регистрации обновленной информации на приемном оборудовании локомотива. Скорость передачи сообщений в таком канале составляет 10,9 бит/с.

Таблица 1. Информация в подканалах для различных фаз

Фазовый сдвиг (в градусах)	Информация в первом подканале	Информация во втором подканале
0	0	0
90	0	1
–90	1	0
180	1	1

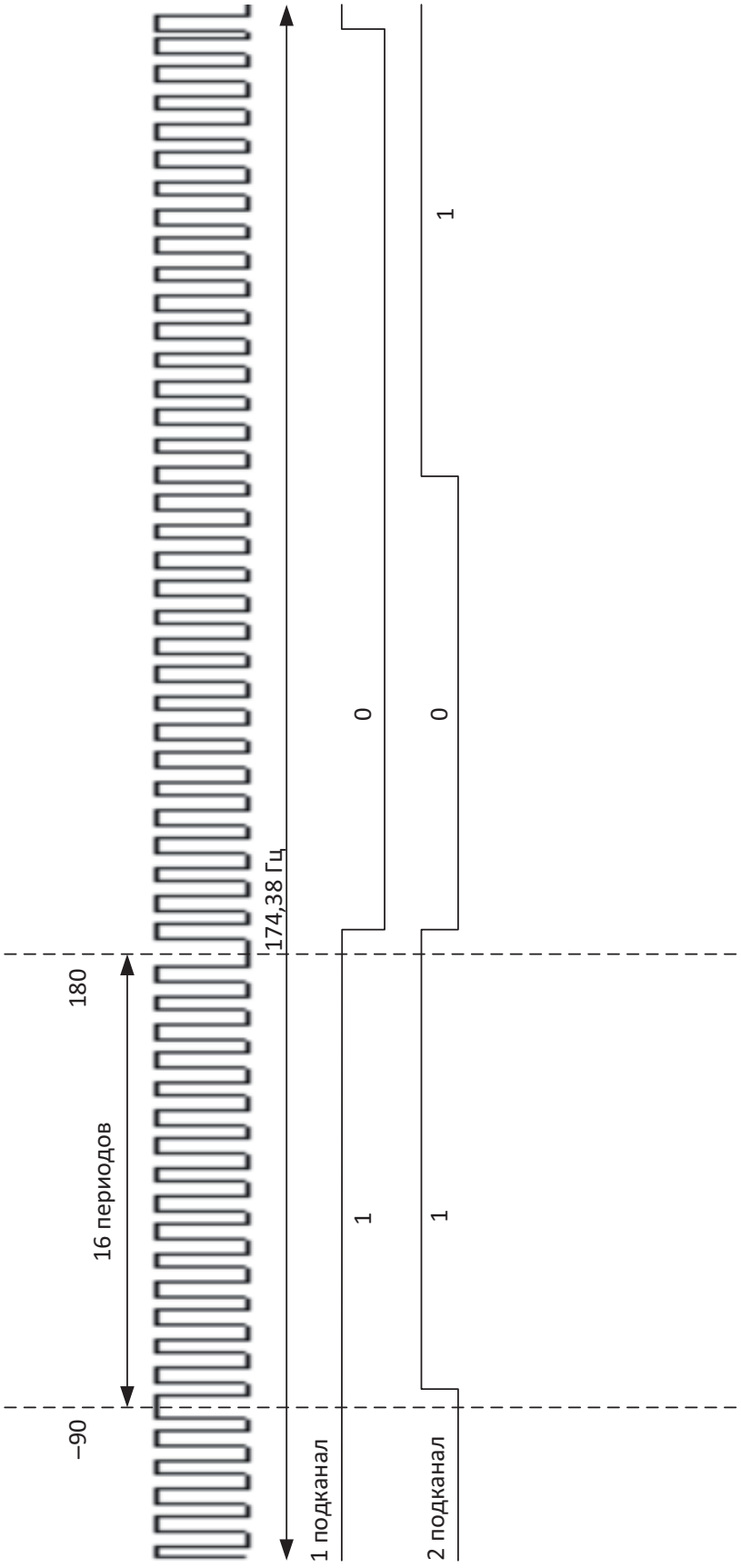


Рис. 2. Кодирование двух подканалов в системе АЛС-ЕН

Модифицированный код Бауэра строится следующим образом:

1. Производится операция сложения по модулю два всех разрядов информационного вектора $x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_4$.

2. Если после выполнения предыдущего действия результат нулевой, то значение младшего разряда (x_1) инвертируется, а значения остальных разрядов не инвертируются и записываются в той же последовательности в контрольную часть кодового слова.

3. Если после выполнения пункта 1 алгоритма результат равен единице, то значение младшего разряда (x_1) не инвертируется, а все остальные разряды при этом инвертируются, полученное слово записывается в контрольную часть кодового слова.

В табл. 2 приведены все возможные кодовые комбинации при использовании модифицированного кода Бауэра в системе АЛС-ЕН.

Таблица 2. Кодовые комбинации модифицированного кода Бауэра

№	Информационный вектор	Значение операции $\oplus$	Контрольный вектор	Кодовое слово
0	0000	0	0001	00000001
1	0001	1	1111	00011111
2	0010	1	1100	00101100
3	0011	0	0010	00110010
4	0100	1	1010	01001010
5	0101	0	0100	01010100
6	0110	0	0111	01100111
7	0111	1	1001	01111001
8	1000	1	0110	10000110
9	1001	0	1000	10011000
10	1010	0	1011	10101011
11	1011	1	0101	10110101
12	1100	0	1101	11001101
13	1101	1	0011	11010011
14	1110	1	0000	11100000
15	1111	0	1110	11111110

Такой метод кодирования обеспечивает обнаружение всех возможных искажений в информационной части слова. В табл. 3 представлен пример передачи информации в канале рельсовой линии при использовании кода Бауэра.

Таблица 3. Передача информации в системе АЛС-ЕН

Сдвиг фазы	0°	0°	+90°	180°	–90°	–90°	180°	–90°	Кодовая комбинация
Информация в 1-м подканале	0	0	0	1	1	1	1	1	1
Информация во 2-м подканале	0	0	1	1	0	0	1	0	3

3 Анализ сбоев в системах передачи данных

С развитием высокоскоростного движения на линии Санкт-Петербург – Москва была проведена модернизация оборудования, используемого для локомотивной сигнализации. Переход с систем АЛСН/АЛСЧ* на АЛС-ЕН повлек за собой немалое количество сбоев системы, вызванных несовместимостью оборудования. Система АЛСЧ работала на предельной скорости до 160 км/ч, дальнейшее увеличение скорости движения привело к состязаниям в элементах логических схем и снижению надежности аппаратуры в целом. За последние годы достигнуто существенное снижение этих нарушений.

Рассмотрим причины возникновения сбоев системы АЛС-ЕН. Статистические данные были включены в комплексную автоматизированную систему учета, контроля устранения отказов технических средств и анализа их надежности (КАСАНТ) и собраны с использованием систем диагностирования и удаленного мониторинга АПК-ДК. В табл. 4 представлены данные по Горьковской, Октябрьской и Московской железным дорогам за 2016 год.

Из таблицы 4 можно сделать вывод о том, что количество сбоев локомотивной аппаратуры примерно в два раза больше, чем на путевых устройствах. Поскольку информация АЛС-ЕН передается по рельсовой линии, рассмотрим более подробно распределение сбоев путевых устройств по службам (рис. 3).

Большинство сбоев происходит по вине службы Ш, следовательно, отдельно стоит рассмотреть причины отказов по хозяйству автоматики и телемеханики (рис. 4).

Основные проблемы создают релейные приборы, при этом следует отметить, что блок, отвечающий за генерацию кодовых сигналов ФС-ЕН, не является причиной сбоев, за 2016 год не было зафиксировано ни одного случая его отказа.

* Частотного типа.

Поскольку ФС-ЕН является высоконадежным устройством, за счет использования его ресурсов (модификации программного обеспечения) можно увеличить информативность системы, что актуально ввиду строительства скоростных магистралей.

Таблица 4. Анализ сбоев в работе устройств АЛС-ЕН за 2016 год

№	Причина	Количество сбоев
1	Путевые устройства	340
1.1	*По вине Ш*	**148**
1.1.1	Отказ блока ФС-ЕН	0
1.1.2	Неисправность монтажа	7
1.1.3	Неисправность разъема	8
1.1.4	Переходное сопротивление контактов или отказ реле	80
1.1.5	Отклонение тока АЛС от нормативных значений	8
1.1.6	Неисправность кабеля	4
1.1.7	Последствия нарушения правил производства работ	6
1.1.8	Причина не установлена	11
1.1.9	Другие причины	24
1.2	*По вине П*	**13**
1.2.1	Отсутствие (неисправность) соединителей	7
1.2.2	Последствия нарушения правил производства работ	1
1.2.3	Другие причины	5
1.3	*По вине Д. Не нажата кнопка скоростного режима*	**22**
1.4	*По вине завода-изготовителя и разработчика*	**92**
1.5	*Прочие*	**65**
2	*Локомотивные устройства*	**708**
2.1	*По вине Т*	**14**
2.2	*По вине ТР*	**668**
2.3	*По вине СЛП*	**6**
2.4	*По вине ДОСС*	**8**
2.5	*По вине ДМВ*	**2**

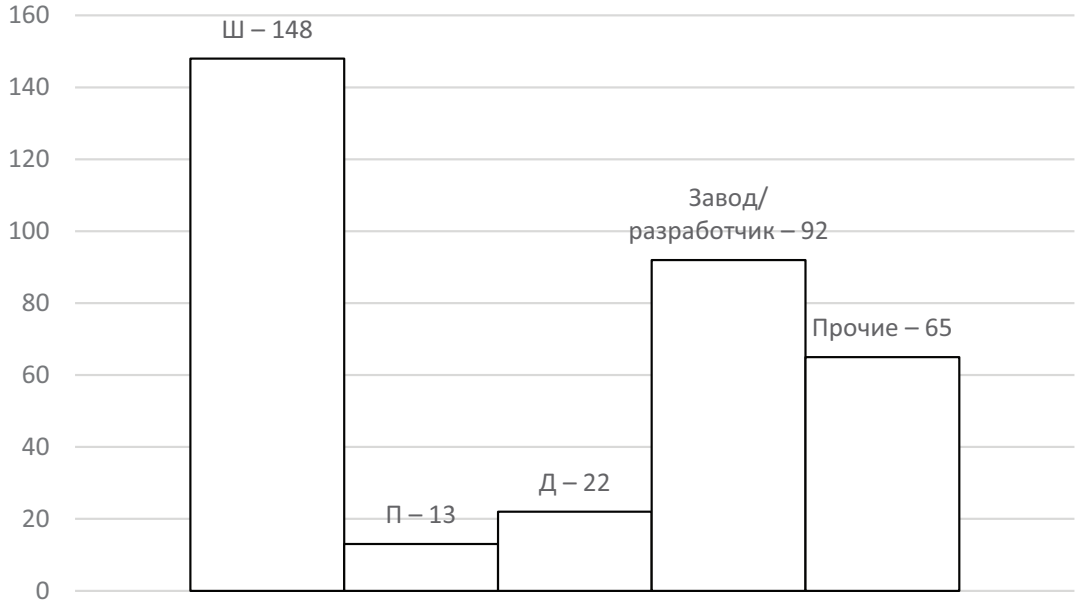


Рис. 3. Распределение сбоев АЛС-ЕН по службам

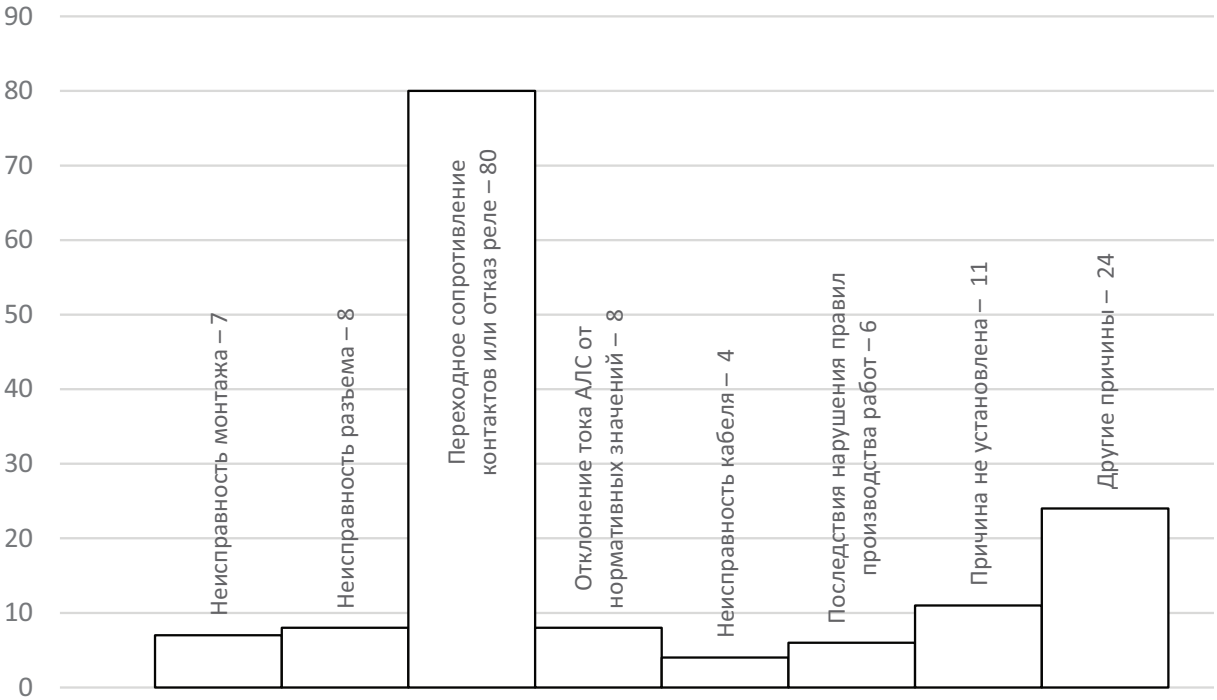


Рис. 4. Причины сбоев системы АЛС-ЕН по вине службы Ш

4 Способ увеличения количества передаваемой информации в системе АЛС-ЕН

При выборе способа кодирования данных были проанализированы различные варианты из кодов, имеющих небольшую избыточность и ориенти-

рованных на обнаружение ошибок, а не на их исправление [5–16]. Анализ показал, что наиболее эффективным для решения задачи может быть расширение информативности системы с применением модульно-взвешенного кода с суммированием – *WSM*(5,3)-кода, где 5 и 3 – количество информационных и контрольных битов в слове [17, 18].

При использовании модульно взвешенного кода с суммированием *WSM*(5,3) не изменяется длина посылок в каналах передачи данных, подбирается лишь иной алгоритм кодирования.

Проведем исследование модульного взвешенного кода с суммированием для передачи информации в канале и проанализируем его помехоустойчивые свойства. Рассмотрим правила построения модульного взвешенного кода с суммированием [17].

Алгоритм 1. *Правила построения модульного кода с суммированием.*

1. Устанавливается модуль $M = 2^{\log_2(m+1)}$.

2. Подсчитывается сумма весовых коэффициентов единичных разрядов – число *W.*

3. Число *W* вычисляется по модулю *M*: $W = W_{\text{м}} \left(\text{mod} M\right)$.

4. Полученное число $W_{\text{м}}$ записывается в контрольный вектор в двоичном виде.

Для взвешенного модульного кода с суммированием *WSM*(5,3) существует 32 кодовых комбинации против 16 в используемом АЛС-ЕН модифицированном коде Бауэра, это существенно увеличит значность системы АЛС-ЕН. Таким образом, мы имеем 32 кодовые комбинации с длиной каждой комбинации 8 битов.

Для примера составим таблицу кодовых расстояний между каждыми кодовыми комбинациями для модифицированного кода Бауэра с тремя информационными битами. В табл. 5 представлены все векторы кода, а в табл. 6 вычислены все кодовые расстояния между векторами.

Таблица 5. Векторы кода Бауэра при $m = 3$

Номер кодовой комбинации	Комбинация	Обозначение
0	000**001**	v_0
1	001**111**	v_1
2	010**100**	v_2
3	011**010**	v_3
4	100**010**	v_4
5	101**100**	v_5
6	110**111**	v_6
7	111**001**	v_7

Таблица 6. Таблица кодовых расстояний между каждыми кодовыми комбинациями

	v_0	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
v_0	0	3	3	4	3	4	4	3
v_1	3	0	4	3	4	3	3	4
v_2	3	4	0	3	4	3	3	4
v_3	4	3	3	0	3	4	4	3
v_4	3	4	4	3	0	3	3	4
v_5	4	3	3	4	3	0	4	3
v_6	4	3	3	4	3	4	0	3
v_7	3	4	4	3	4	3	3	0

Из табл. 6 можно сделать вывод о том, что количество ложных переходов кратности $d_3 = 32$, $d_4 = 24$.

С помощью программного обеспечения, написанного на языке высокого уровня Java, были рассчитаны все возможные необнаруживаемые ложные переходы при использовании кодирования *WSM* (5,3) и модифицированного кода Бауэра (4,4). В табл. 7 представлены все возможные ложные переходы комбинаций по кратностям для *WSM* (5,3)-кода и модифицированного кода Бауэра (4,4).

Таблица 7. Таблица ложных переходов

Код	Кратность перехода							
	1	2	3	4	5	6	7	8
WSM (5,3)	0	88	240	304	240	88	0	32
Код Бауэра (4,4)	0	0	0	224	0	0	0	16

Как видно из табл. 7, количество ложных переходов в *WSM* (*m, k*)-коде существенно больше по всем кратностям, чем в модифицированном коде Бауэра, но при этом количество информационных битов также увеличилось. Поэтому на основании данных, представленных выше, можно построить таблицу коэффициентов ложных переходов (табл. 8) [19] с использованием формулы

$$K_{\text{л}}(d) = \frac{1}{N_p}\frac{N_d}{C_n^d},$$

где N_p – число всех кодовых комбинаций, используемых для кодирования; N_d – количество ложных переходов кратностью d; C_n^d – число сочетаний из n по d (n – длина кодовой комбинации).

Таблица 8. Таблица коэффициентов ложных переходов

Код	$K_л(d)$							
	1	2	3	4	5	6	7	8
WSM (5,3)	0	0,098	0,134	0,136	0,134	0,098	0	1
Код Бауэра (4,4)	0	0	0	0,2	0	0	0	1

Таким образом, при увеличении числа информационных битов и такой же длине посылки в случае использования модульного взвешенного кода с суммированием не обнаруживается 9,8 % двукратных искажений, 13,4 % трехкратных искажений, 13,6 % четырехкратных искажений, 13,4 % пятикратных искажений, 9,8 % шестикратных искажений и все восьмикратные искажения. Модифицированный код Бауэра не обнаруживает 20 % четырехкратных искажений и все восьмикратные искажения.

Рассмотрим вероятности возникновения необнаруживаемой ошибки в канале передачи данных рельсовой линии при условии, что вероятность искажения каждого символа передаваемой последовательности $p_э = 10^{-4}$, $p_э = 10^{-3}$, $p_э = 10^{-2}$.

Из [20, 21] известно, что для расчета вероятности возникновения ошибки кратностью d в канале используется формула

$$Q_d = K_л(d) C_n^d (1-p)^d p^{n-d},$$

где $K_л(d)$ – коэффициент ложных переходов данной кратностью; C_n^d – число сочетаний из n по d (n – длина кодовой комбинации); $p = 1 - p_э$ – достоверность передачи информации.

В табл. 9 представлены результаты вычислений вероятностей возникновения необнаруживаемого искажения в канале системы АЛС-ЕН для *WSM*(5,3)-кода и модифицированного кода Бауэра (4,4).

При условии, что вероятность искажения одного бита $p_э = 10^{-4}$ [21], инерционность системы АЛС-ЕН составляет около 3 с [2, 3], скорость передачи данных равна 10,9 бит/с [22], тогда за 3 секунды придет 4 посылки на локомотив с путевого оборудования, при этом достоверность принимаемой информации определяется по мажоритарной схеме «2 из 3». Следовательно, вероятность отображения неверных данных на блоке индикации по вине обнаруживающей способности кода $3 \cdot (2{,}75 \cdot 10^{-8})^2 + (2{,}75 \cdot 10^{-8})^3 \approx 8{,}25 \cdot 10^{-16}$.

Таким образом, увеличивая количество информации, передаваемой на локомотив в системе АЛС-ЕН с использованием *WSM*(m,k)-кода, выполняется требование к приему данных ($P < 10^{-14}$) [23].

Следует также отметить, что основные сбои системы АЛС-ЕН в путевом оборудовании происходят по вине отказов релейных приборов и изменение

Таблица 9. Вероятность необнаруживаемого искажения по кратностям *d*

Для модульного кода *WSM*(5,3)								
p	*d* = 2	*d* = 3	*d* = 4	*d* = 5	*d* = 6	*d* = 7	*d* = 8	Суммарная вероятность
0,9999	$2{,}75\cdot10^{-8}$	$7{,}50\cdot10^{-12}$	$9{,}50\cdot10^{-16}$	$7{,}50\cdot10^{-20}$	$2{,}75\cdot10^{-24}$	0	$1{,}00\cdot10^{-32}$	$2{,}75\cdot10^{-8}$
0,999	$2{,}73\cdot10^{-6}$	$7{,}46\cdot10^{-9}$	$9{,}46\cdot10^{-12}$	$7{,}48\cdot10^{-10}$	$2{,}74\cdot10^{-18}$	0	$1{,}00\cdot10^{-24}$	$2{,}74\cdot10^{-6}$
0,99	$2{,}59\cdot10^{-4}$	$7{,}13\cdot10^{-6}$	$9{,}13\cdot10^{-8}$	$7{,}28\cdot10^{-10}$	$2{,}70\cdot10^{-12}$	0	$1{,}00\cdot10^{-16}$	$2{,}66\cdot10^{-4}$
0,9	$2{,}75\cdot10^{-8}$	$4{,}43\cdot10^{-3}$	$9{,}13\cdot10^{-8}$	$5{,}47\cdot10^{-5}$	$2{,}23\cdot10^{-6}$	0	$1{,}00\cdot10^{-8}$	$4{,}49\cdot10^{-3}$
Для кода Бауэра								
0,9999	0	0	$1{,}40\cdot10^{-15}$	0	0	0	$1{,}00\cdot10^{-32}$	$1{,}40\cdot10^{-15}$
0,999	0	0	$1{,}39\cdot10^{-11}$	0	0	0	$1{,}00\cdot10^{-24}$	$1{,}39\cdot10^{-11}$
0,99	0	0	$1{,}34\cdot10^{-7}$	0	0	0	$1{,}00\cdot10^{-16}$	$1{,}34\cdot10^{-7}$
0,9	0	0	$1{,}34\cdot10^{-7}$	0	0	0	$1{,}00\cdot10^{-8}$	$1{,}44\cdot10^{-7}$

алгоритмов кодирования сигнала не изменит надежности системы в целом, при этом добавит системе значность.

Стоит отметить, что такой способ увеличения значности системы АЛС-ЕН с изменением способа кодирования информации и без внесения изменений в аппаратное обеспечение не требует экономических затрат, которые могли бы возникнуть вследствие проектирования модификаций систем АЛС-ЕН для увеличения градаций скоростей, передаваемых на локомотивные устройства. В случае изменения конструктивных особенностей генераторов сигналов ФС-ЕН, приемного оборудования, разработок по изменению кодирования канала, испытаний безопасности и переоборудования существующих решений затраты на реализацию могут достигать десятков миллионов рублей, и пройдет много лет до принятия новой системы в эксплуатацию.

Заключение

При использовании модульно взвешенного кода с суммированием для кодирования информации в подканалах системы АЛС-ЕН не изменяются характеристики сигналов в рельсовой линии, не требуется переработка оборудования генерации и приема сигналов, изменения затрагивают лишь программную реализацию расшифровки закодированного сообщения. Изменив алгоритм кодирования информации без увеличения длины передаваемых сообщений, удалось добиться расширения количества передаваемых команд с 16 до 32 в каждом подканале, что увеличило значность системы в четыре раза, при этом затраты на реализацию данного решения требуются лишь при

разработке обновленного программного обеспечения для оборудования системы АЛС-ЕН.

Библиографический список

1. Кравцов Ю. А. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики / Ю. А. Кравцов, В. Л. Нестеров, Г. Ф. Лекута ; под ред. Ю. А. Кравцова. – М. : Транспорт, 1996. – 400 с.
2. Лисенков В. М. Автоматическая локомотивная сигнализация АЛС-ЕН / В. М. Лисенков, Д. В. Шалягин, Г. А. Казимов // АТИС. – 1987. – № Л2. – С. 26–29.
3. Лисенков В. М. Автоматическая локомотивная сигнализация АЛС-ЕН / В. М. Лисенков, Д. В. Шалягин, Г. А. Казимов, Е. Н. Розенберг // АТИС. – 1987. – С. 11–16.
4. Лисенков В. М. Системы управления движением поездов на перегонах : учебник для вузов ж.-д. транспорта : в 3 ч. Ч. 2 / В. М. Лисенков, П. Ф. Бестемьянов, В. Б. Леушин, А. В. Лисенков, А. Е. Ваньшин ; под ред. В. М. Лисенкова. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2009. – 324 с.
5. Ефанов Д. В. О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля / Д. В. Ефанов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 6. – С. 155–162.
6. Сапожников Вал. В. Предельные свойства кода с суммированием / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – № 3. – С. 290–299.
7. Блюдов А. А. Построение модифицированного кода Бергера с минимальным числом необнаруживаемых ошибок информационных разрядов / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Электронное моделирование. – 2012. – Т. 34. – № 6. – С. 17–29.
8. Ефанов Д. В. Три теоремы о кодах Бергера в схемах встроенного контроля / Д. В. Ефанов // Информатика и системы управления. – 2013. – № 1. – С. 77–86.
9. Сапожников Вал. В. Свойства кодов с суммированием взвешенных переходов с прямой последовательностью весовых коэффициентов / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, В. В. Дмитриев // Информатика и системы управления. – 2014. – № 4. – С. 77–88.
10. Sapozhnikov Val. Optimum Sum Codes, that Effectively Detect the Errors of Low Multiplicities / Val. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov, D. Efanov, V. Dmitriev, M. Cherepanova // RadioElectronics & Informatics. – 2015. – № 1. – Pp. 17–22.
11. Дмитриев В. В. Особенности синтеза генераторов кодов с суммированием взвешенных переходов при различной полноте информации о контролируемой логической схеме / В. В. Дмитриев // Сборник материалов конференции «Проблемы безопасности и надежности микропроцессорных комплексов» ; под ред. д-ра техн. наук, профессора Вал. В. Сапожникова. – СПб. : ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. – С. 158–166.

12. Дмитриев В. В. О двух способах взвешивания и их влиянии на свойства кодов с суммированием взвешенных переходов в системах функционального контроля логических схем / В. В. Дмитриев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2015. – № 3. – С. 119–129.
13. Sapozhnikov Val. Modular Sum Code in Building Testable Discrete Systems / Val. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov, D. Efanov // Proceedings of 13th IEEE East-West Design & Test symposium (EWDTS'2015), Batumi, Georgia, September 26–29, 2015. – Pp. 181–187.
14. Сапожников Вал. В. Двухмодульный код с суммированием единичных информационных разрядов по модулю четыре в системах функционального контроля / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, В. А. Щагина // Информационные технологии на транспорте : сб. материалов секции «Информационные технологии на транспорте» юбилейной XV Санкт-Петербургской Международной конференции «Региональная информатика – 2016», Санкт-Петербург, 26–28 октября 2016 г. ; под. ред. Вал. В. Сапожникова. – СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. – С. 9–16.
15. Ефанов Д. В. Анализ сложности технической реализации систем функционального контроля организованных на основе двухмодульных кодов с суммированием по модулю четыре / Д. В. Ефанов, В. А. Щагина // Транспортные интеллектуальные системы : сб. материалов I Международной научно-практической конференции «Транспортные интеллектуальные системы – 2017» (TIS-2017), Санкт-Петербург, 16–17 февраля 2017 г. ; под. ред. Вал. В. Сапожникова, Д. В. Ефанова. – СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017. – С. 19–31.
16. Сапожников Вал. В. Новые структуры систем функционального контроля логических схем / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, В. В. Дмитриев // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 2. – С. 127–143.
17. Сапожников Вал. В. Модульно взвешенный код с суммированием для систем технического диагностирования / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, Д. А. Никитин // Информатика и системы управления. – 2015. – № 3. – С. 53–62.
18. Efanov D. Sum Code Formation with Minimum Total Number of Undetectable Errors in Data Vectors / D. Efanov, Val. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov, D. Nikitin // Proceedings of 13th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2015), Batumi, Georgia, September 26–29, 2015. – Pp. 141–148.
19. Мельников Ю. Н. Достоверность информации в сложных системах / Ю. Н. Мельников. – М. : Советское радио, 1973. – 192 с.
20. Ефанов Д. В. Коды Хэмминга и их обнаруживающие способности в схемах функционального контроля / Д. В. Ефанов, А. А. Блюдов // Информатика и системы управления. – 2012. – № 2. – С. 100–111.
21. Переборов А. С. Диспетчерская централизация : учебник для вузов ж.-д. транспорта / А. С. Переборов, О. К. Дрейман, Л. Ф. Кондратенко ; под ред. Вал. В. Сапожникова. – М. : Транспорт, 1989. – 303 с.
22. Брылеев А. М. Автоматическая локомотивная сигнализация и авторегулировка / А. М. Брылеев, О. Поупе, В. С. Дмитриев, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – М. : Транспорт, 1981. – 319 с.

23. Сапожников Вл. В. Микропроцессорные системы централизации : учебник для техникумов и колледжей железнодорожного транспорта / Вл. В. Сапожников, В. А. Кононов, С. А. Куренков, А. А. Лыков, О. А. Наседкин, А. Б. Никитин, А. А. Прокофьев, М. С. Трясов ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2008. – 398 с.

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

Information capacity improvement of collision avoidance system for integrated continous automatic cab signaling trains movement by means of modular weighted summation code

The purpose of a cab-signaling system, as well as basic functions, systems' structure and modifications were described in the study. The comparative analysis of advantages and disadvantages of the existing systems was given. The system of multivalued cab-signaling of integrated continuous automatic cab-signaling (ICACS) common range was examined in greater detail. The method of coding algorithm modification of a railway line transmitted signal in the system of ICACS was introduced in the given study, as well as the analysis of jam proof properties of a system was carried out, in the process of replacing a modified Bauer code with a modular weighted summation code. An in-depth analysis of all possible false transitions of signal code combinations in a data transfer circuit was performed. The results of comparing detection capacity of the examined codes in a circuit were presented, as well as the main reasons of modern cab signaling systems failure The obtained methods of modification of data codification and code deciphering software modules made it possible to broaden the system's valence by four times from 256 to 1024 program orders, satisfying safety requirements in the process of data transfer.

cab signaling; collision avoidance; system's valence; weighing of bits; modular code; redundancy; detection capacity

References

1. Kravcov Yu. A., Nesterov V. L., Lekuta G. F. (1996). Ed. Yu. A. Kravcov. Railway automation and telemechanics systems [Sistemy zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki]. Moscow, Transport [Transport]. – 400 p.

2. Lisenkov V. M., Shalyagin D. V., Kazimov G. A. (1987). Automatic locomotive signaling ALS-EN [Avtomaticheskaya lokomotivnaya signalizaciya ALS-EN]. Automation, telemechanics and communication [ATIS], issue Л2. – Pp. 26–29.
3. Lisenkov V. M., Shalyagin D. V., Kazimov G. A., Rozenberg E. N. (1987). Automatic locomotive signaling ALS-EN [Avtomaticheskaya lokomotivnaya signalizaciya ALS-EN]. Automation, telemechanics and communication [ATIS]. – Pp. 11–16.
4. Lisenkov V. M., Bestem'yanov P. F., Leushin V. B., Lisenkov A. V., Van'shin A. E. (2009). Ed. V. M. Lisenkova. Traffic control systems on trains, textbook [Sistemy upravleniya dvizheniem poezdov na peregonah, uchebnik dlya vuzov zh.-d. transporta: V 3 ch. Ch. 2.]. Moscow, FSBEI «Study and methodical railway transport education center» [GOU «Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte]. – 324 p.
5. Efanov D. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2010). On summation code properties in functional control circuits [O svojstvah koda s summirovaniem v skhemah funkcional'nogo kontrolya]. Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika], issue 6. – Pp. 155–162.
6. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2010). Berger Code Limit Properties [Predel'nye svojstva koda s summirovaniem]. Proceedings of Petersburg transport university [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya], issue 3. – Pp. 290–299.
7. Blyudov A. A., Efanov D. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2012). Formation Berger modified code with minimum total number of undetectable errors in data bits [Postroenie modificirovannogo koda Bergera s minimal'nym chislom neobnaruzhivaemyh oshibok informacionnyh razryadov]. Electronic Modelling [Ehlektronnoe modelirovanie], vol. 34, issue 6. – Pp. 17–29.
8. Efanov D. V. (2013). Three theorems about Berger codes in builtin control circuits [Tri teoremy o kodah Bergera v skhemah vstroennogo kontrolya]. Information science and control systems [Informatika i sistemy upravleniya], issue 1. – Pp. 77–86.
9. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V., Dmitriev V. V. (2014). Properties of codes with summation of transitions between data bits with direct sequence of weighting coefficient [Svojstva kodov s summirovaniem vzveshennyh perekhodov s pryamoj posledovatel'nost'yu vesovyh koehfficientov]. Information Science and control systems [Informatika i sistemy upravleniya], issue 4. – Pp. 77–88.
10. Sapozhnikov Val., Sapozhnikov Vl., Efanov D., Dmitriev V., Cherepanova M. Optimum sum codes, that effectively detect the errors of low multiplicities. Radioelectronics & informatics, N 1. – Pp. 17–22.
11. Dmitriev V. V. (2015). Features of synthesizing code with summation of weighted transitions generators with different completeness of information on the controlled logic scheme. Proceedings of scientific-practical conference: «Problems of safety and reliability of microprocessor complexes» in ed. Val. V. Sapozhnikov [Osobennosti sinteza generatorov kodov s summirovaniem vzveshennyh perekhodov pri razlichnoj polnote informacii o kontroliruemoj logicheskoj skheme. Sbornik materialov konferencii «Problemy bezopasnosti i nadezhnosti mikroprocessornyh kompleksov»; pod red. d-ra tekhn. nauk, professora Val. V. Sapozhnikova]. St. Petersburg, PSTU [PGUPS]. – Pp. 158–166.

12. Dmitriev V. V. (2015). On the two weighing methods and their influence on properties of sum codes of weighted transitions in functional logical scheme control systems [O dvuh sposobah vzveshivaniya i ih vliyanii na svojstva kodov s summirovaniem vzveshennyh perekhodov v sistemah funkcional'nogo kontrolya logicheskih skhem]. Proceedings of Petersburg transport university [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya], issue 3. – Pp. 119–129.
13. Sapozhnikov Val., Sapozhnikov Vl., Efanov D. Modular sum code in building testable discrete systems. Proceedings of 13th IEEE East-West Design & Test symposium (EWDTS'2015), Batumi, Georgia, September 26–29. – Pp. 181–187.
14. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V., Shchagina V. A. (2016). Two-modulus code with summation of ones in data bits by modulo «Four» in concurrent error detection systems [Dvuhmodul'nyj kod s summirovaniem edinichnyh informacionnyh razryadov po modulyu chetyre v sistemah funkcional'nogo kontrolya]. Information technologies at transport: proc. section «Information technologies at transport» of Anniversary XV St. Petersburg int. conf. «Regional informatics–2016», St. Petersburg, 26–28 of Oct.; ed. Val. V. Sapozhnikov [Informacionnye tekhnologii na transporte, sbornik materialov sekcii «Informacionnye tekhnologii na transporte» Yubilejnoj XV Sankt-Peterburgskoj mezhdunarodnoj konferencii «Regional'naya informatika – 2016». St. Peterburg, 26–28 Oktyabrya 2016 g.; pod. red. Val. V. Sapozhnikova]. St. Petersburg, PSTU. – Pp. 9–16.
15. Efanov D. V., Shchagina V. A. (2017). Analysis of complexity of concurrent error detection system based on use of two-modulo codes with summation by modulo 4 technical realization [Analiz slozhnosti tekhnicheskoj realizacii sistem funkcional'nogo kontrolya organizovannyh na osnove dvuhmodul'nyh kodov s summirovaniem po modulyu 4]. Transport intelligent systems: proc. 1st int. scientifi c-practical conf. «Transport intelligent systems – 2017» (TIS-2017), St. Petersburg, 16–17 Feb. 2017, ed. Val. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov [Transportnye intellektual'nye sistemy, sbornik materialov I mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Transportnye intellektual'nye sistemy – 2017» (TIS-2017), St. Peterburg, 16–17 Fevralya 2017 g., pod red. Val. V. Sapozhnikova, D. V. Efanova]. St. Petersburg, FGBOU VO PGUPS. – Pp. 19–31.
16. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V., Dmitriev V. V. (2017). New structures of the concurrent error detection systems for logic circuits [Nye struktury sistem funkcional'nogo kontrolya logicheskih skhem]. Automation and remote control [Avtomatika i telemekhanika], issue 2. – Pp. 127–143.
17. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V., Nikitin D. A. (2015). Modulo weighted code with summation for technical diagnostics systems [Modul'no vzveshennyj kod s summirovaniem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya]. Information Science and control systems [Informatika i sistemy upravleniya], issue 3. – Pp. 53–62.
18. Efanov D., Sapozhnikov Val., Sapozhnikov Vl., Nikitin D. Sum code formation with minimum total number of undetectable errors in data vectors. Proceedings of 13th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2015), Batumi, Georgia, September 26–29. – Pp. 141–148.

19. Mel'nikov Yu. N. (1973). Reliability of information in complex systems [Dostovernost' informacii v slozhnyh sistemah]. Moscow, Union radio [Sov. radio]. – 192 p.
20. Efanov D. V., Blyudov A. A. (2012). The Hamming codes and their error detection abiities in functional control circuits [Kody Hehmminga i ih obnaruzhivayushchie sposobnosti v skhemah funkcional'nogo kontrolya]. Information science and control systems [Informatika i sistemy upravleniya], issue 2. – Pp. 100–111.
21. Pereborov A. S., Drejman O. K., Kondratenko L. F. (1989). Dispatching centralization, textbook, ed. Val. V. Sapozhnikov [Dispetcherskaya centralizaciya, uchebnik dlya vuzov zh. d. transp.; pod red. Val. V. Sapozhnikova]. Moscow, Transport [Transport], 1989. – 303 p.
22. Bryleev A. M., Poupe O., Dmitriev V. S., Kravcov Yu. A., Stepenskij B. M. (1981). Automatic locomotive signaling and auto-adjustment [Avtmaticheskaya lokomotivnaya signalizaciya i avtoregulirovka]. Moscow, Transport [Transport]. – 319 p.
23. Sapozhnikov Vl. V., Kononov V. A., Kurenkov S. A., Lykov A. A., Nasedkin O. A., Nikitin A. B., Prokof'ev A. A., Tryasov M. S. (2008). Microprocessor interlocking, textbook [Mikroprocessornye sistemy centralizacii, uchebnik dlya tekhnikumov i kolledzhej zheleznodorozhnogo transporta]. Vl. V. Ed. Sapozhnikov [Pod red. Vl. V. Sapozhnikova]. Moscow, FSBEI «Study and methodical railway transport education center» [GOU «Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte]. – 398 p.

Статья представлена к публикации членом редколлегии О. А. Наседкиным
Поступила в редакцию 17.03.2017, принята к публикации 15.05.2017

Никитин Дмитрий Александрович – канд. техн. наук, аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: nikitin239@gmail.com

© Никитин Д. А., 2017

Электронное моделирование

УДК 528.063, 519.652

А. А. Никитчин, канд. техн. наук,
Н. А. Богданов
Кафедра «Инженерная геодезия»,
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

В. С. Рыбкин
Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»,
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ СТРУКТУРНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ОАО «РЖД»

Рассматривается возможность применения геоинформационной системы с поддержкой принятия решений для повышения эффективности использования ресурсов, оптимизации выполнения работ, связанных с техническим содержанием устройств, в структурных подразделениях дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД». Проводится анализ технологических схем организации взаимодействия внутренних компонентов и программного обеспечения наиболее распространенных геоинформационных систем с целью выбора оптимальной структуры. Разработаны требования к предлагаемой геоинформационной системе с поддержкой принятия решений, соответствующие реалиям работы ОАО «РЖД». По результатам анализа построена структура взаимодействия компонентов геоинформационной системы со смежными – автоматизированной системой управления и системой технического диагностирования и мониторинга. Определен состав слоев и список необходимых для решения задач.

геоинформационные система; система поддержки принятия решения; дирекция инфраструктуры; система мониторинга, ОАО «РЖД»

Введение

Поддержание железнодорожной инфраструктуры в работоспособном и исправном состоянии требует значительных материальных и людских ресурсов, поэтому одной из приоритетных задач холдинга ОАО «РЖД» является сокращение материальных затрат на объекты инфраструктуры без потерь

в надежности и пропускной способности. Достижение этой цели возможно лишь путем совершенствования способов обслуживания и реновации морально и физически устаревших средств механизации, применения средств и систем удаленного контроля, автоматизации систем управления.

Применяемые в структурах ОАО «РЖД» системы технического диагностирования и мониторинга (ТДМ) и автоматизированные системы управления (АСУ) в настоящее время требуют постоянного анализа получаемых данных, что приводит к загруженности информацией работников диспетчерского аппарата служб дирекции инфраструктуры (ДИ). Решение данной проблемы возможно путем применения систем, способных при минимальном участии специалистов, на основе собранных данных осуществлять комплексный анализ для решения следующих задач:

– ведение паспортной, проектной и нормативно-справочной документации по всем объектам, входящим в ДИ;

– сбор, синхронизация, анализ и визуализация данных, получаемых от различных систем в режиме реального времени;

– визуализация поездного положения в режиме реального времени;

– оценка эффективности использования материальных и людских ресурсов ДИ;

– планирование графика технологического процесса, обслуживания объектов железнодорожной инфраструктуры;

– выявление и контроль своевременности устранения нарушений содержания объектов ДИ;

– прогнозирование состояния объектов.

В ДИ включены следующие структурные подразделения: дистанции пути и искусственных сооружений (ПЧ), дистанции сигнализации централизации и блокировки (ШЧ), а также структурные подразделения, в зону ответственности которых входят гражданские сооружения и вагонное хозяйство. Основной задачей структурных подразделений является поддержание существующей пропускной способности сети железных дорог (или ее повышение) путем обеспечения технической и технологической готовности обслуживаемых устройств, уменьшение количества отказов и др.

Увеличение скоростей движения, перевозимого тоннажа, уменьшение интервалов попутного следования между поездами и повышение количества пар поездов влечет за собой уменьшение времени и создание дополнительных сложностей при выполнении графика технологического процесса обслуживающего персонала ДИ, направленного на поддержание устройств в работоспособном и исправном состоянии. Данные проблемы требуют нахождения новых и совершенствование существующих методов обслуживания и ремонта.

Создание высокоточной координатной системы (ВКС) комплексной системы пространственных данных инфраструктуры железнодорожного транспорта (КСПД ИЖТ) позволит обеспечить высокоточными координат-

ными данными все объекты, входящие в железнодорожную инфраструктуру. Основной задачей ВКС КСПД ИЖД является организация взаимодействия между различными АСУ в течение всего жизненного цикла комплекса инфраструктуры. В настоящее время ВКС широко применяется при изысканиях, проектировании и ремонте железнодорожного пути, на железнодорожных магистралях активно создаются высокоточные геодезические сети [1–10].

Применение пространственных данных и другой информации из ВКС КСПД ИЖД позволит создать геоинформационную систему (ГИС) с подпрограммой поддержки принятия решений персонала, способной эффективно и в кратчайшие сроки решать возникающие в процессе эксплуатации объектов железнодорожной инфраструктуры проблемы.

1 Определение структуры геоинформационной системы

ГИС – система сбора, хранения, анализа и графической визуализации пространственных (геоинформационных) данных и связанной с ними информации о наблюдаемых объектах [11]. Таким образом, ГИС – это модернизированные базы данных, имеющие возможность моделирования инфраструктуры объекта исследования (коммуникации, территориальная структура и др.).

Системы ГИС обеспечивают решение следующих задач:

1) моделирование технологического процесса работы предприятия по результатам измерений глобальных навигационных спутниковых систем и наземного и воздушного лазерного сканирования;

2) управление парком транспортных средств и эксплуатационным штатом предприятия;

3) мониторинг текущего состояния объектов инфраструктуры и планирование графика выполнения работ по техническому обслуживанию и ремонту закрепленных за предприятием устройств и систем;

4) предоставление информационно-справочных услуг пользователям системы.

ГИС железнодорожного транспорта – информационно-управляющая автоматизированная система, призванная обеспечивать решение задач инвентаризации, проектирования и управления объектами железнодорожного транспорта [4].

На основании анализа существующих ГИС [12–16], применяемых не только на транспорте, но и в других сферах деятельности человека, и с учетом специфики железнодорожного транспорта были сформированы основные требования к информационному, аппаратно-программному и техническому обеспечению, которым должна соответствовать ГИС для управления структурными подразделениями ДИ ОАО «РЖД».

Система ГИС для обеспечения высококачественной работы ДИ оперирует следующими данными:

– инвентарные и технические данные объектов ДИ;

– данные о землях, входящих полосу отвода железной дороги;

– проекты, нормативные акты и другая нормативно-справочная документация;

– данные об объектах, граничащих с объектами РЖД и способных повлиять на их работу (нефтепроводы, газопроводы, линии электропередач и т. д.);

– результаты мониторинга за определенный период;

– данные о техническом и технологическом штате и закрепленных за ними объектах;

– графики работ по техническому обслуживанию, ремонту и строительству объектов железнодорожной инфраструктуры.

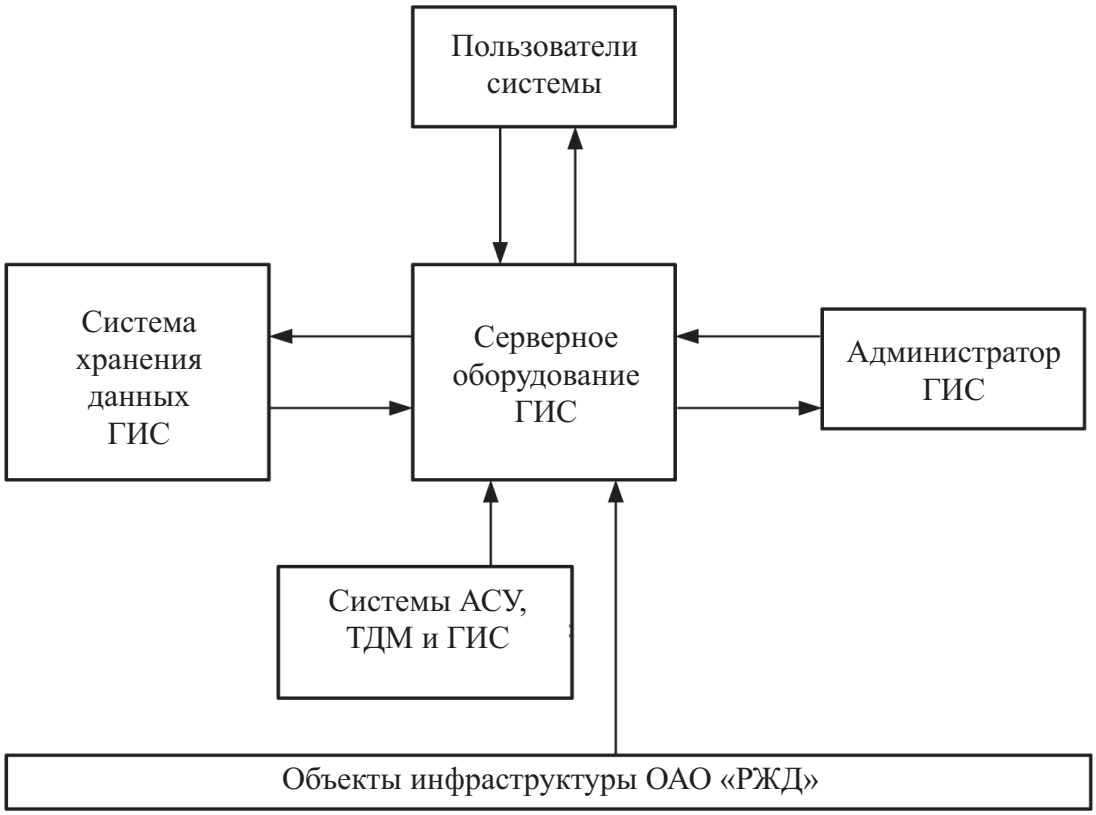


Рис. 1. Структурная схема ГИС ДИ ОАО «РЖД»

На рис. 1 представлена схема, на которой показано взаимодействие ГИС с различными смежными системами.

Управление линейными предприятиями, входящими в ДИ, должно осуществляться на основе:

– картографических, геодезических, геологических и гидрологических баз данных ОАО «РЖД»;

– данных, полученных от других ГИС;

– данных топографической съемки, дистанционного зондирования полосы отвода железной дороги и прилегающих к ней территорий;

– измерений, выполненных геодезическими методами и системами ТДМ;

– результатов комиссионных осмотров и обследований;

– данных от систем АСУ и ТДМ;

– данных о реальном поездном положении, участковой установленной скорости движения и грузонапряженности железнодорожных участков;

– графика движения поездов.

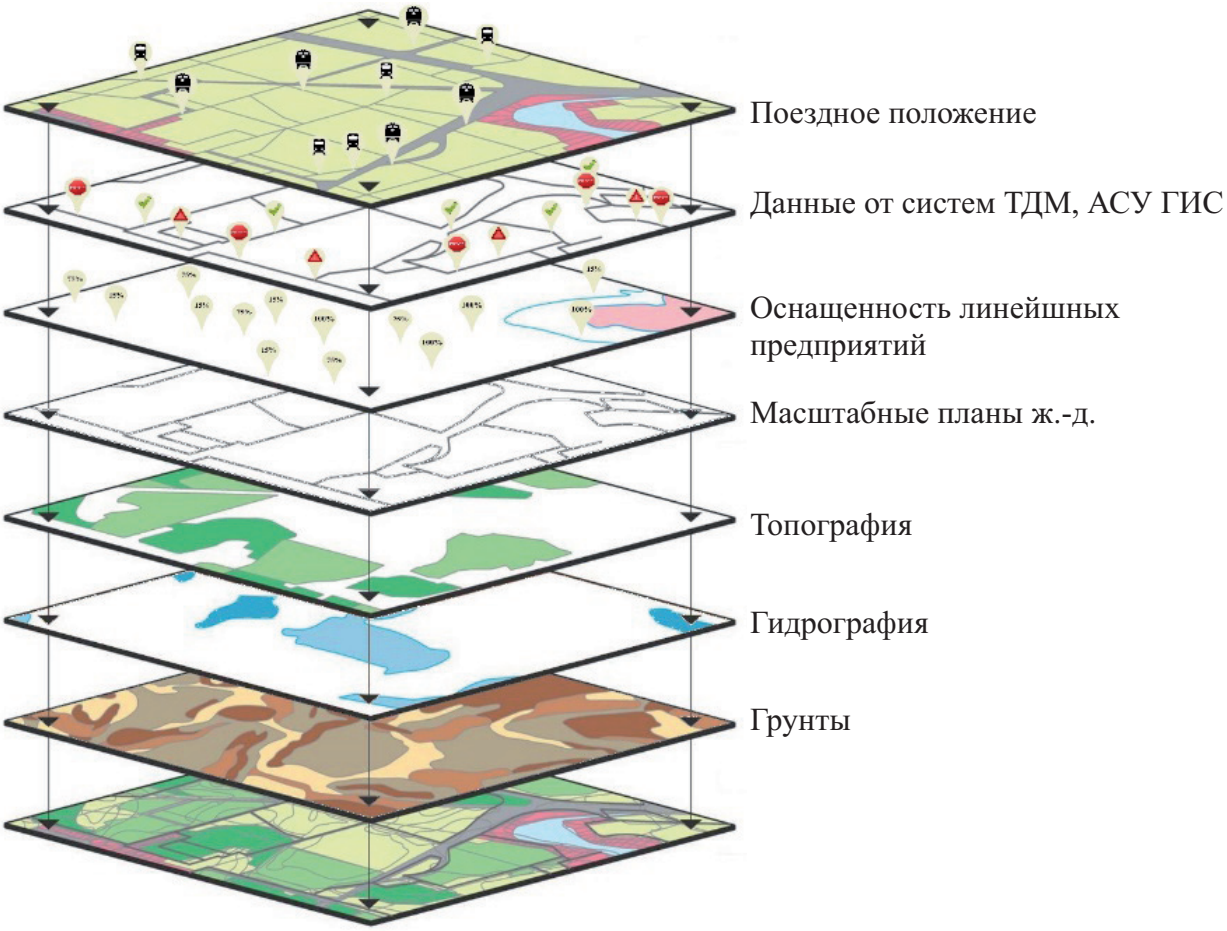


Рис. 2. Слои разрабатываемой ГИС ДИ ОАО «РЖД»

На рис. 2 представлен необходимый перечень слоев для разрабатываемой ГИС.

Геоинформационная система с подсистемой поддержки принятия решений в процессе управления линейным предприятием должна обеспечивать предоставление пользователям следующей визуализированной информации:

– граф железной дороги с пространственной привязкой всех прилегающих объектов;

– фото- и видеоматериалы о запрашиваемом объекте (включая режим просмотра в реальном времени);

– паспортную, проектную и нормативно-справочную информацию об объектах;

– данные о выполняемых на объекте работах за необходимый период;

– результаты периодических проверок, комиссионных осмотров и мониторинга технического состояния;

– графики технологического процесса содержания устройств.

Функциональные возможности ГИС должны обеспечивать:

– создание, дополнение и редактирование базы данных с применением специализированного программного обеспечения;

– ведение работы с существующими картографическими слоями, создание и корректировку новых слоев;

– работу в системах координат (ВКС ОАО «РЖД», ПЗ-90 и WGS-84);

– поиск объектов;

– необходимые измерения;

– прокладку маршрутов движения транспортных средств;

– планирование работы по техническому обслуживанию и ремонту;

– получение данных от смежных систем (ГИС, АСУ, ТДМ) и визуализацию их для получения более точной информации техническом состоянии объектов и поездном положении;

– формирование отчетной документации в соответствии с требованиями ОАО «РЖД».

2 Выбор технологической схемы и программного обеспечения

В настоящее время можно выделить четыре вида технологических схем, которые применяются при построении ГИС.

Технологическая схема, приведенная на рис. 3, представляет собой единый готовый к работе продукт, размещенный на ПЭВМ пользователя, куда устанавливается программное обеспечение, используемое для работы ГИС. Достоинства данной схемы – высокая скорость обмена данными, нестандартные способы обработки и визуализации данных и простота администрирования. Минусы данного решения – проблемы, возникающие при работе со сторонним программным обеспечением при корректировке и расширении функциональных возможностей программного обеспечения, ограниченность применения форматов данных.

На рис. 4 представлен вид технологических схем ГИС, реализованный на основе взаимодействия серверной части и клиентской ПЭВМ. Применяемое в данной схеме программное обеспечение по своей структуре практически идентично ранее представленной схеме. Кроме положительных сто-

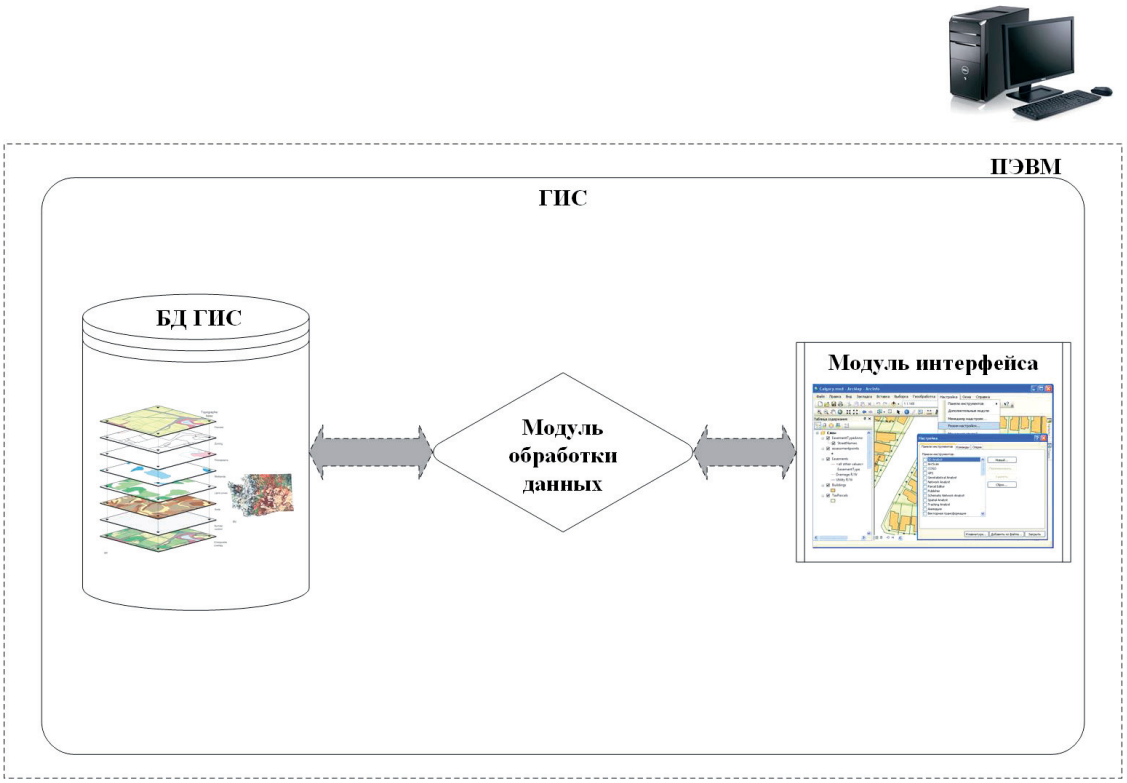


Рис. 3. Первая технологическая схема ГИС

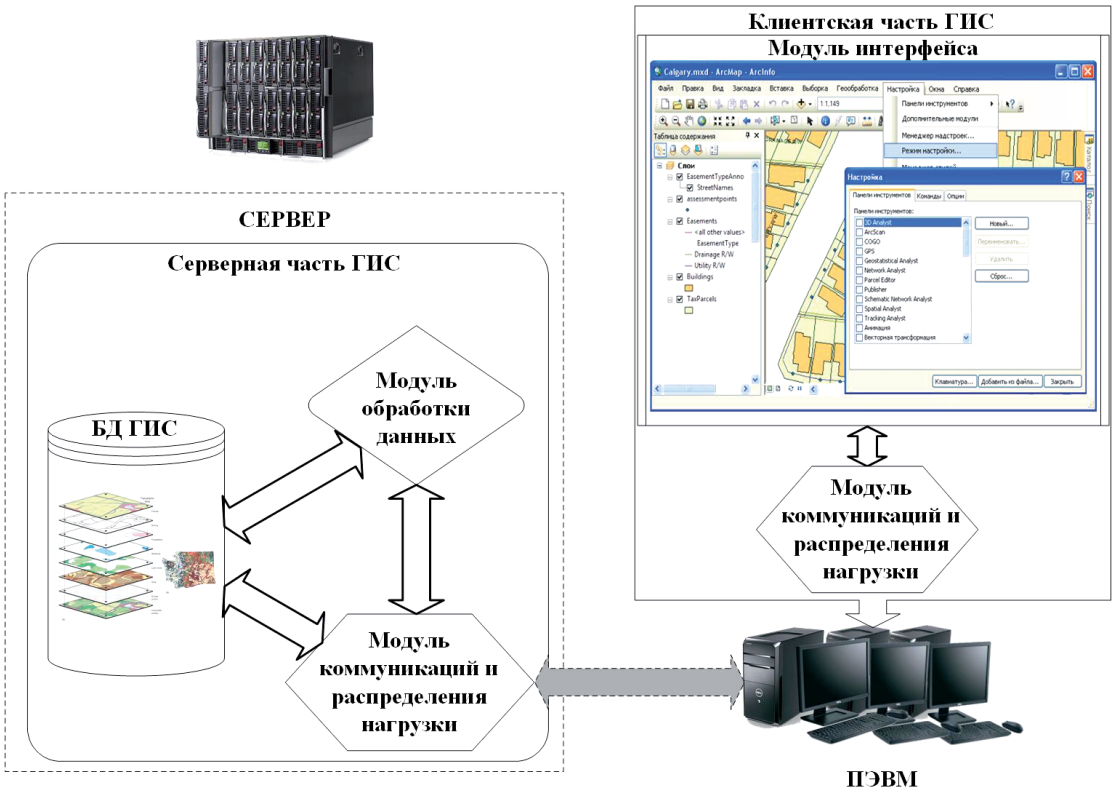


Рис. 4. Вторая технологическая схема ГИС

рон, наследованных от первой схемы, добавляется возможность совместной работы сразу нескольких пользователей, повышается стабильность работы и открывается возможность увязки с другими системами и программами. Усложнение схемы влечет за собой проблемы администрирования и корректировки программного обеспечения.

Увеличение числа пользователей ГИС требует усложнения технологической схемы и в части программного обеспечения для серверного оборудования за счет применения специализированных программ для работы с базами данных. Измененная технологическая схема представлена на рис. 5. Применение такой структуры построения позволяет повысить функциональные возможности системы ГИС за счет концентрации усилий разработчика программного обеспечения и развития алгоритмов обработки пространственной информации. Минусами применения данной технологической схемы является использование стороннего программного обеспечения, усложнение администрирования.

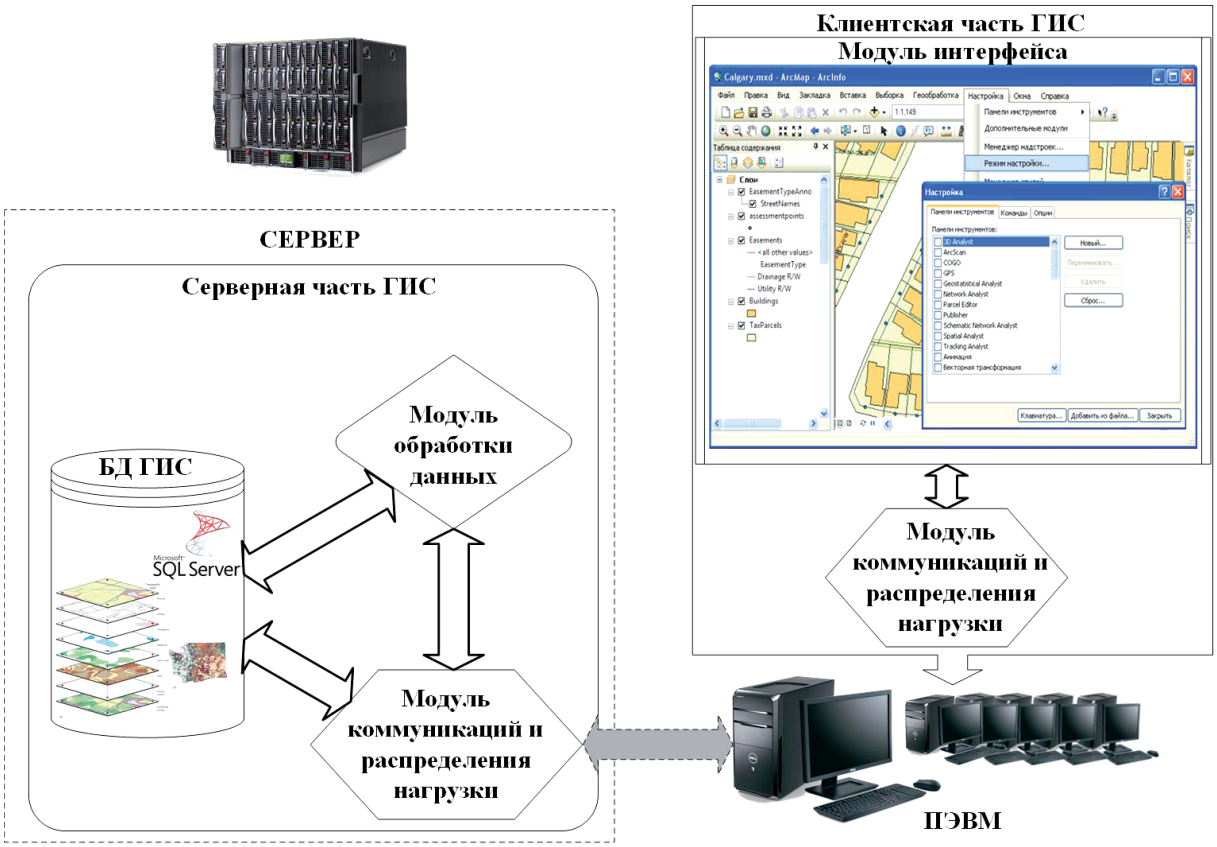


Рис. 5. Третья технологическая схема ГИС

Технологическая схема, показанная на рис. 6, представляет собой усовершенствованный вариант третьей схемы за счет установки расширений в систему управления базами данных (СУБД). Модуль обработки данных в ГИС спроектирован для работы в используемой структуре с расширения-

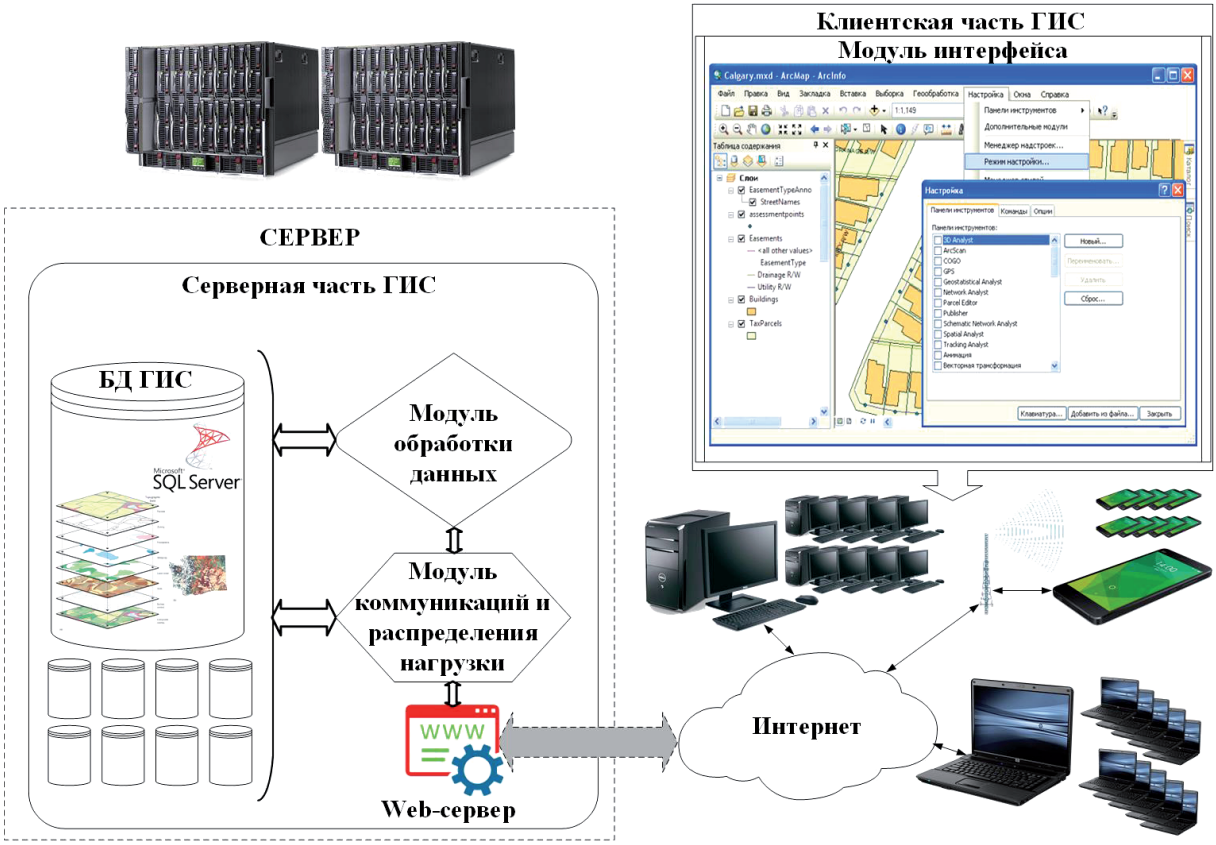


Рис. 6. Четвертая технологическая схема ГИС

ми СУБД. Кроме того, для расширения функциональных возможностей четвертая технологическая структура может быть дополнена веб-сервером для упрощения работы клиентов ГИС.

Кроме технологических схем взаимодействия клиентов ГИС с данными, важную роль при построении системы играет выбор программной платформы, которая должна дать возможность реализовать все требуемые функции.

Анализ наиболее известных зарубежных и отечественных платформ ГИС [17–32] и результаты исследования представлены в таблице.

Заключение

Создание ГИС с подпрограммой поддержки принятия решений, способной решать вышеперечисленные задачи и проблемы, возникающие при содержании объектов железнодорожной инфраструктуры, позволит:

– накапливать, систематизировать и визуализировать данные;

– обеспечивать оперативное получение техническим и технологическим персоналом достоверной и актуальной информации о техническом состоянии объектов инфраструктуры, поездном положении и выполняемых работах;

Таблица. Достоинства и недостатки четвертой технологической схемы

Разработчик	Программные продукты	Технологические схемы построения ГИС	Сертификат ФСТЭК России	Работа с особо важными данными в РФ	Наличие учебных центров в России	Простая установка	Простота обучения	Примечания
ESRI, Inc (Калифорния, США)	ArcGIS for Desktop; ArcGIS for Mobile; ArcGIS for Server; ArcGIS Online	1, 3, 4	+	+	+	–	–	Используется в Министерстве обороны Российской Федерации
Bentley Systems (США)	MicroStation; ProjectWise; Bentley Geospatial Desktop; Bentley Map	1, 2	–	–	–	–	–	Рабочее пространство системы настраивается под определенную задачу в процессе развертывания
Integraph Corporation (США)	GeoMedia; TeraShare; G/Technology; ImageStation; ERDAS; InService; I/CAD	1, 3, 4	–	+	–	–	–	
Pitney Bowes Software (США)	MapInfo Professiona; MapBasic; MapInfo MapX; MapInfo MapX Mobile; MapInfo MapXtreme	1, 3, 4	–	–	–	+	+	Схемы построения 3 и 4 плохо справляются с нагрузкой
Autodesk, Inc (США)	AutoCAD Map 3D; AutoCAD Civil 3D; Autodesk Infrastructure Map Server	1, 3, 4	–	–	–	–	–	

Продолжение таблицы

Разработчик	Программные продукты	Технологические схемы построения ГИС	Сертификат ФСТЭК России	Работа с особо важными данными в РФ	Наличие учебных центров в России	Простая установка	Простота обучения	Примечания
ЗАО «КБ “Панорама”» (Россия)	Профессиональная ГИС «Карта 2011»; настольная ГИС «Карта 2011»; профессиональный векторизатор «Панорама-редактор»; GIS Panorama Mobile; GIS Toolkit; ГИС «Сервер»; GIS WebServer; GIS WebService; GIS WebFeatureService (GIS WFS); ГИС «Панорама» (Карта 2005) для Linux	1, 2	+	+	+	–	+	Максимально соответствует российской схеме обозначений; продукт проектировался для Министерства обороны Российской Федерации
ЗАО «ЦСИ “Интегро”» (Россия)	Сервер данных ИнГео; ГИС ИнГео; сервер приложений ИнГео; ИнГео MapX; ИнГео MapW; ИнГео MapJ v.2	3	+	–	–	+	+	
ЗАО «СиСофт-Терра» (Россия)	CS MapDrive; CS GIS Engine; CS UrbanView;	4	+	+	+	–	–	
ОАО «Научно-производственная корпорация “Рекод”» (Россия)	РЕКОД-Модель; РЕКОД-Инфраструктура; РЕКОД-Доступ; РЕКОД-Геопортал; РЕКОД-Регистратор; РЕКОД-МТ	1, 2, 3, 4	+	+	–	–	–	
ООО «Политерм» (Россия)	ГИС Zulu; ГИС ZuluServer; ZuluXTools; ZuluNetTools	1, 2	+	–	–	+	+	
ООО «ГЕОКАД плюс» (Россия)	Geocad Systems; Geocad Systems Enterprise Edition	1, 2, 4	+	+	–	–	–	

Окончание таблицы

Разработчик	Программные продукты	Технологические схемы построения ГИС	Сертификат ФСТЭК России	Работа с особо важными данными в РФ	Наличие учебных центров в России	Простая установка	Простота обучения	Примечания
ООО «ГЕОКАД плюс» (Россия)	(GSEE); АИС «ОГД»; Реестр муниципального имущества; АРМ «КИН»; Бюро технической инвентаризации; Кадастр предприятия							
ООО «Индор-Софт» (Россия)	IndorGIS; IndorCAD; IndorRoad; IndorPower	1, 4	+	–	+	–	–	Продукт построенный по схеме 4 применяется только для узкоспециализированных областей
СП «Кредо-Диалог» (Россия)	Credo_dar professional; Credo «Топоплан 1.1»; Credo «Линейный изыскания»; Credo «Геология»; Credo «Дороги»; Credo «Генплан»; Credo «Кадастр»	1	+	–	+	+	+	
ООО «ЦентрПрограммСистем» (Россия)	ГИС «АгроУправление»; ГИС «Похозяйственная книга»; ГИС GEO’S	2, 4	+	–	–	–	–	
ООО «Инженерно-технологический центр «СКАНЭКС»» (Россия)	WEB-ГИС «Геомиксер»	4	+	+	+	+	–	
OSGeo	Объединение PostGIS+QGIS+ MapServer+OpenLayers	1, 4	–	–	–	–	–	

– повысить уровень контроля качества работ по содержанию объектов железнодорожной инфраструктуры;

– увеличить эффективность принятия управленческих решений;

– снизить эксплуатационные затраты на содержание объектов инфраструктуры;

– повысить безопасность движения поездов.

На основании анализа рассмотренных технологических схем реализации взаимодействия оборудования ГИС и программных платформ и с учетом специфики структуры ОАО «РЖД» для решения поставленной задачи по реализации ГИС с подсистемой поддержки принятия решений эффективно применение технологической схемы, представленной на рис. 4 и программной платформы ESRI (США). Программное обеспечение, предлагаемое данной фирмой, имеет действующий сертификат ФСТЭК и допуск к работе с особо важными данными.

Библиографический список

1. Матвеев С. И. Высокоточные цифровые модели пути и спутниковая навигация железнодорожного транспорта : монография / С. И. Матвеев, В. А. Коугия. – М. : Маршрут, 2005. – 290 с.
2. Гапанович В. А. В едином высокоточном координатном пространстве / В. А. Гапанович // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 11. – С. 16–20.
3. Воробьёв В. Б. Реализуя инновационные подходы и технологии / В. Б. Воробьёв, В. М. Ермаков // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 11. – С. 21–23.
4. Гельфгат А. Г. Топографо-геодезическое обеспечения с использованием ГЛОНАСС / А. Г. Гельфгат, В. Д. Гайдуков, Д. А. Вольфсон, Д. С. Манойло // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 11. – С. 24–26.
5. Родоманченко М. Г. Инженерные изыскания и проектирование ВКС / М. Г. Родоманченко, А. А. Альхимович, Д. С. Манойло, А. В. Портнов // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 11. – С. 27–29.
6. Черногоров Ю. А. Диагностика объектов инфраструктуры с применением КСПД ИЖТ / Ю. А. Черногоров, В. П. Бирюзов, А. И. Лисицын, Е. В. Ермаков // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 11. – С. 30–32.
7. Борецкий А. А. Особенности инновационной технологии модернизации пути / А. А. Борецкий, И. Я. Пименов, В. М. Ермаков, С. В. Духин, А. В. Нуйкин // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 11. – С. 33–35.
8. Танаев В. Ф. Пилотный проект на Октябрьской железной дороге / В. Ф. Танаев, Е. В. Дорот, Е. А. Шевцов, О. Ю. Попов // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 11. – С. 36–39.
9. Тяглов Р. С. Решение прикладных задач инфраструктурного комплекса / Р. С. Тяглов, О. А. Янович, Н. П. Фомин, И. Н. Лукин, А. В. Петрушин // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 11. – С. 40–42.

10. Назаров А. С. Нормативное обеспечение координатных методов / А. С. Назаров, Д. А. Вольфсон, Б. Ш. Альтшулер, Н. В. Сазонов // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 11. – С. 43–44.
11. NUK3. – URL : http://nku3.ru/1-kurs/geograficheskaia-informatcionnaia-sistema.
12. Ротенберг И. Н. Интегрированная система управления железной дорогой с применением спутниковых технологий / И. Н. Ротенберг, О. В. Тони, В. Я. Цветков // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 6. – С. 54–57.
13. ВНИИАС. Управление и контроль транспортных средств различного назначения с применением спутниковых навигационных систем, систем цифровой связи и дистанционного зондирования. – URL : http://www.vniias.ru/control-and-supervision-of-various-vehicles.
14. Студенческий научный форум. – URL : http://www.scienceforum.ru/2015/pdf/13879.pdf.
15. Иодис В. Я. Система мониторинга деформаций компании JAVAD GNSS / В. Я. Иодис // Геопрофи. – 2015. – № 3. – С. 4–8.
16. Брусило В. А. Комплексная отраслевая геоинформационная система автомобильных дорог «ДОРГИС» / В. А. Брусило // Геопрофи. – 2015. – № 3. – С. 9–13.
17. Esri CIS. – URL : https://www.esri-cis.ru.
18. Bentley. – URL : https://www.bentley.com/ru.
19. Hexagon. – URL : http://www.intergraph.com/global/ru.
20. Pitneybowes. – URL : http://www.pitneybowes.com/us.
21. Autodesk. – URL : http://www.autodesk.ru/products/autocad-map-3d/overview.
22. КБ «Панорама». – URL : http://gisinfo.ru.
23. Центр системных исследований ИНТЕГРО. – URL : http://www.integro.ru.
24. Csoft-terra. – URL : http://www.csoft.ru/about/vendors/csoft-terra.html.
25. Рекорд. – URL : http://rekod.ru.
26. Политерм. – URL : https://www.politerm.com.
27. Геокад. Информационные программные системы и технологии. – URL : http://www.geocad.ru.
28. Индорсофт. – URL : http://www.indorsoft.ru.
29. Компания «Кредо-диалог». – URL : http://www.credo-dialogue.com.
30. CPS. Центр программ и систем. – URL : http://www.1cps.ru.
31. Сканэкс. – URL : http://new.scanex.ru.
32. Osgeo. – URL : http://www.osgeo.org.

Andrey A. Nikitchin,
Nicolay A. Bogdanov
Engineering geodesy' chair
Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university

Vladimir S. Rybkyn
«Automation and telemechanics on railroads»
Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university

The analysis of the existing software systems with the purpose of building a geographic information control system of JSC «Russian Railways» departments

The possibility of application of a geographic information system with a decision support system was considered, in order to improve the effectiveness of resource utilization, performance optimization, connected with device maintenance in the departments of JSC «Russian Railways» infrastructure's management. The analysis of applied flow diagrams of internal components interworking organization was carried out, as well as the software analysis of the most commonly used geographic informational systems in order to choose an optimal structure. The requirements for the introduced geographic information system and decision support system were developed, meeting the realia of JSC «Russian Railways» functioning. According to the results of the conducted analysis, the structure of components' interworking of a geographic informational system with related ACS and TDM was built. Layer composition as well as the list of tasks for solution was specified.

geographic informational system; decision support system; management of infrastructure; «Russian Railways» monitoring system

References

1. Matveev S.I., Kougiya V.A. (2005). High precision digital track models and satellite navigation of railway transport, monograph [Vysokotochnye cifrovye modeli puti i sputnikovaya navigaciya zheleznodorozhnogo transporta, monografiya.]. Moscow, Route [Marshrut]. – 290 p.
2. Gapanovich V.A. (2015). In a single high-precision coordinate space [V edinom vysokotochnom koordinatnom prostranstve]. Railways Transport [Zheleznodorozhnyj transport], issue 11. – Pp. 16–20.
3. Vorob'yov V.B., Ermakov V.M. (2015). Implementing innovative approaches and technologies [Realizuya innovacionnye podhody i tekhnologii]. Railways transport [Zheleznodorozhnyj transport], issue 11. – Pp. 21–23.
4. Gel'fgat A.G., Gajdukov V.D., Vol'fson D.A., Manojlo D.S. (2015). Topographic and geodetic support using GLONASS [Topografo-geodezicheskoe obespecheniya

s ispol'zovaniem GLONASS]. Railways Transport [Zheleznodorozhnyj transport], issue 11. – Pp. 24–26.
5. Rodomanchenko M. G., Al'himovich A. A., Manojlo D. S., Portnov A. V. (2015). Engineering survey and design of VCS [Inzhenernye izyskaniya i proektirovanie VKS]. Railways transport [Zheleznodorozhnyj transport], issue 11. – Pp. 27–29.
6. Chernogorov Yu. A., Biryuzov V. P., Lisicyn A. I., Ermakov E. V. (2015). Diagnostics of infrastructure facilities using KSPD IZHT [Diagnostika ob'ektov infrastruktury s primeneniem KSPD IZHT]. Railways transport [Zheleznodorozhnyj transport], issue 11. – Pp. 30–32.
7. Boreckij A. A., Pimenov I. Ya., Ermakov V. M., Duhin S. V., Nujkin A. V. (2015). Features of innovative modernization technology пути [Osobennosti innovacionnoj tekhnologii modernizacii puti]. Raylways transport [Zheleznodorozhnyj transport], issue 11. – Pp. 33–35.
8. Tanaev V. F., Dorot E. V., Shevcov E. A., Popov O. Yu. (2015). Pilot project on the October railway [Pilotnyj proekt na oktyabr'skoj zheleznoj doroge]. Railways transport [Zheleznodorozhnyj transport], issue 11. – Pp. 36–39.
9. Tyaglov R. S., Yanovich O. A., Fomin N. P., Lukin I. N., Petrushin A. V. (2015). Solution of applied problems of the infrastructure complex [Reshenie prikladnyh zadach infrastrukturnogo kompleksa]. Raylways transport [Zheleznodorozhnyj transport], issue 11. – Pp. 40–42.
10. Nazarov A. S., Vol'fson D. A., Al'tshuler B. Sh., Sazonov N. V. (2015). Nmative provision of coordinate methods [Nmativnoe obespechenie koordinatnyh metodov]. Raylways transport [Zheleznodorozhnyj transport], issue 11. – Pp. 43–44.
11. NUK3. URL: http://nku3.ru/1-kurs/geograficheskaia-informatcionnaia-sistema.
12. Rotenberg I. N., Toni O. V., Cvetkov V. Ya. (2010). Integrated rail management system using satellite technologies [Integrirovannaya sistema upravleniya zheleznoj dorogoj primeneniem sputnikovyh tekhnologij]. Transport of Russian Federation [Transport Rossijskoj Federacii], issue 6. – Pp. 54–57.
13. VNIIAS. Control and monitoring of transport facilities for various purposes with the use of satellite navigation systems, digital communication and remote sensing systems [VNIIAS. Upravlenie i kontrol' transportnyh sredstv razlichnogo naznacheniya s primeneniem sputnikovyh navigacionnyh sistem, sistem cifrovoj svyazi i distancionnogo zondirovaniya]. URL: http://www.vniias.ru/control-and-supervision-of-various-vehicles.
14. Student scientific forum [Studencheskij nauchnyj forum]. URL: http://www.science-forum.ru/2015/pdf/13879.pdf].
15. Iodis V. Ya. (2015). JAVAD deformation monitoring system GNSS [Sistema monitoringa deformacij kompanii JAVAD GNSS]. GeoProfi [Geoprofi], issue 3. – Pp. 4–8.
16. Brusilo V. A. (2015). Integrated sectoral geographic information system of highways «DORGIS» [Kompleksnaya otraslevaya geoinformacionnaya sistema avtomobil'nyh dorog «DORGIS»]. GeoProfi [Geoprofi], issue 3. – Pp. 9–13.
17. Esri CIS. URL: https://www.esri-cis.ru.
18. Bentley. URL: https://www.bentley.com/ru.
19. Hexagon. URL: http://www.intergraph.com/global/ru.
20. Pitneybowes. URL: http://www.pitneybowes.com/us.

21. Autodesk. URL: http://www.autodesk.ru/products/autocad-map-3d/overview.
22. KB «Panorama» [KB Panorama]. URL: http://gisinfo.ru.
23. Center for System Studies INTEGRO [Centr sistemnyh issledovanij INTEGRO]. URL: http://www.integro.ru.
24. Csoft-terra. URL: http://www.csoft.ru/about/vendors/csoft-terra.html.
25. Record [Rekord]. URL: http://rekod.ru.
26. Polytherm [Politerm]. URL: https://www.politerm.com.
27. Geocad [Geokad]. Information software systems and technologies [Informacionnye programmnye sistemy i tekhnologii]. URL: http://www.geocad.ru.
28. Indorsoft [Indorsoft]. URL: http://www.indorsoft.ru.
29. Company «Credo-dialogue» [Kompaniya «Kredo-dialog»]. URL: http://www.credo-dialogue.com.
30. CPS. Center of programs and systems [CPS. Centr programm i sistem]. URL: http://www.1cps.ru.
31. Skanex [Skanehks]. URL: http://new.scanex.ru.
32. Osgeo. URL: http://www.osgeo.org.

Статья представлена к публикации членом редколлегии С. А. Никищенковым
Поступила в редакцию 21.06.2017, принята к публикации 18.08.2017

НИКИТЧИН Андрей Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженерная геодезия» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: anikitchin@gmail.com

БОГДАНОВ Николай Александрович – ассистент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах», аспирант кафедры «Инженерная геодезия» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: nabogdanov85@gmail.com

РЫБКИН Владимир Сергеевич – студент группы АТ-108 факультета безотрывных форм обучения Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: rvswork@gmail.com

© Никитчин А. А., Богданов Н. А., Рыбкин В. С., 2017

Автоматизация проектирования

УДК 004.896+656:25

Д. В. Седых,
Д. В. Зуев, канд. техн. наук
Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»,
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

М. А. Гордон
Институт «Гипротранссигналсвязь» – филиал АО «Росжелдорпроект»

ОТРАСЛЕВОЙ ФОРМАТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ НА УСТРОЙСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ. ЧАСТЬ 4: ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ

Данная статья посвящена способу описания отдельных элементов устройств железнодорожной автоматики в отраслевом формате технической документации на устройства сигнализации, централизации и блокировки. Данный формат разработан как средство интеграции данных различных информационных систем отрасли. Приводятся принципы описания базовых графических элементов документа, графических данных, классификация типов элементов для представления устройств автоматики и телемеханики. Вводятся понятия статического и динамического элемента.

В целях более четкого представления концепции описания структуры многие нюансы опущены. Полное и общее описание формата может быть получено из официальной технической документации.

системы автоматизированного проектирования; электронный формат технической документации; отраслевой формат технической документации

Введение

С каждым годом в хозяйстве автоматики и телемеханики растет число информационных систем. В настоящее время существуют программные решения, которые позволяют вести все основные процессы, связанные с устройствами автоматики и телемеханики, начиная от процессов проектирования до эксплуатации систем. Но методология построения данных систем не учитывает требований обмена данными между ними. С целью интеграции раз-

личных информационных систем был разработан отраслевой формат технической документации (ОФ-ТД) на устройства автоматики и телемеханики [1–3].

В первых статьях цикла мы подробно рассмотрели концепцию создания и основные понятия отраслевого формата технической документации на устройства сигнализации, централизации и блокировки. Была рассмотрена основная задача данного формата – средство интеграции данных различных информационных систем отрасли, а также отличия и общие черты отраслевого формата технической документации на устройства сигнализации, централизации и блокировки и разработанного в Европе формата railML®. Мы приводили описание структуры и частей отраслевого формата. Подробно были описаны типы данных, специальные атрибуты, такие как атрибуты трансформации и стилизации, система координат документа, корневой элемент документа, его слои, листы, а также внедренное изображение документа. Данная статья раскрывает особенности представления элементов в отраслевом формате технической документации.

1 Технология описания элемента в ОФ-ТД

В ОФ-ТД [4–7] для описания различных видов чертежей (схематический план станции, двухниточный план станции, кабельный план станции и т. д.) используются определенные XML-элементы. У всех этих элементов есть одинаковые параметры. Для того чтобы не описывать эти параметры для каждого элемента, опишем обобщенный базовый элемент. Описание свойств базового элемента представлено перед описанием элементов, используемых на чертеже. Все элементы содержат данные атрибуты базового элемента, если их значение отличается от значения по умолчанию.

Описание свойств элемента представлено в табличном виде. Порядок описания свойств в таблице:

– описание элемента;
– пространство имен, к которому принадлежит элемент;
– наименование элемента;
– надписи элемента;
– подэлементы элемента;
– атрибуты элемента;
– описание атрибутов элемента.

Другие информационные системы хозяйства автоматики и телемеханики вправе дополнять файлы в ОФ-ТД своими данными с условием, что имена добавляемых данных (узлов, атрибутов) не совпадают с именами ОФ-ТД и зарезервированными именами W3C. Добавляемые данные не должны нарушать структуру документа.

Расширением самого формата по заявкам пользователей управляет главный администратор ОФ-ТД.

2 Базовые графические элементы

Базовые графические элементы представляют собой элементы XML, предназначенные для описания простейших изображений (кругов, эллипсов, дуг, кривых Безье и т. д.), текстовых надписей, таблиц, внедренных объектов, рисунков и пр. Элементы находятся в пространстве имен bsl.

Базовый элемент отражает общие (основные) атрибуты всех элементов, включенных в пространство имен bsl.

Список базовый атрибутов элементов: id, <атрибуты трансформации>, <атрибуты стилизации>, class, style, слой, svg-id.

ОФ-ТД осуществляет хранение следующих видов базовых элементов:

1. Элемент text, предназначенный для хранения текстовых надписей. Данный элемент строится относительно базовый точки, задаваемой координатами элемента.

2. Элемент etext, который представляет собой надпись элемента. Данный элемент по набору атрибутов представляет собой элемент text, но расширен дополнительными атрибутами. Элемент должен являться подэлементом другого элемента, надпись которого он представляет.

3. Элемент ellipse, который описывает эллипс, задаваемый двумя радиусами и координатами. Окружность также задается этим элементом, тогда радиусы равны (пример – на рис. 1).

Листинг 1

```
<svg width="12cm" height="4cm"
viewBox="0 0 1200 400">
<g transform="translate (300 200)">
<ellipse rx="250" ry="100" style="fill: red"/>
</g>
<ellipse transform="translate (900 200) rotate
(-30)"
rx="250" ry="100" style="fill: none; stroke: blue;
stroke-width: 20"/>
</svg>
```

Рис. 1. Отрисовка эллипсов

4. Элемент path (путь), предназначенный для описания различных видов полилиний (отрезков, эллиптических дуг, кривых Безье и т. д.). Команды рисования записываются в атрибуте d, который полностью соответствует атрибуту d у элемента path языка SVG (примеры – на рис. 2, 3).

Листинг 2

```
<svg width="5cm" height="4cm" viewBox="0 0 500 400">
<path d="M100,200 C100,100 250,100 250,200 S400,300 400,200" style="fill: none; stroke: red; stroke-width:5"/>
</svg>
```

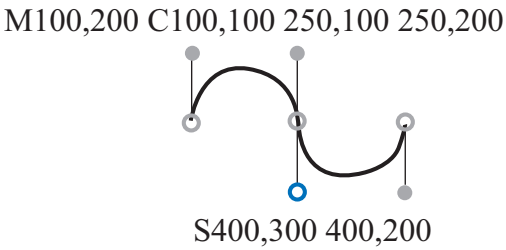


Рис. 2. Кубическая кривая Безье

Листинг 3

```
<svg width=»12cm» height=»4cm» viewBox=»0 0 1200 400»>
<path d=»M300,200 h-150 a150,150 0 1,0 150,-150 z»
style=»fill: red; stroke: blue; stroke-width:5»/>
<path d=»M275,175 v-150 a150,150 0 0,0 -150,150 z»
style=»fill: yellow; stroke: blue; stroke-width:5»/>
<path d=»M600,350 l 50,-25
a25,25 -30 0,1 50,-25 l 50,-25
a25,50 -30 0,1 50,-25 l 50,-25
a25,75 -30 0,1 50,-25 l 50,-25
a25,100 -30 0,1 50,-25 l 50,-25»
style=»fill: none; stroke: red; stroke-width:5»/>
</svg>
```

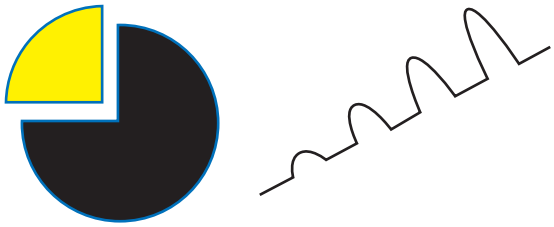


Рис. 3. Эллиптическая дуга

5. Элемент line (линия), предназначенный для описания отрезков прямых. В документах вместо элемента line рекомендуется использовать элемент path с соответствующими параметрами (пример – на рис. 4).

Листинг 4

```
<svg width=”12cm” height=”4cm”
viewBox=”0 0 1200 400”>
<g style=”fill: none; stroke: green”>
<line x1=”100” y1=”300” x2=”300” y2=”100”
style=”stroke-width:5”/>
<line x1=”300” y1=”300” x2=”500” y2=”100”
style=”stroke-width:10”/>
<line x1=”500” y1=”300” x2=”700” y2=”100”
style=”stroke-width:15”/>
<!- То же, style=»stroke-width:20»->
<!- То же, style=»stroke-width:25»->
</g>
</svg>
```

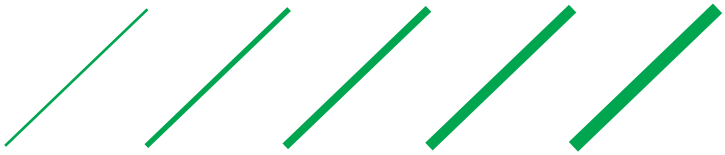


Рис. 4. Отрисовка линий

6. Элемент rect (прямоугольник), предназначенный для описания графических элементов, представляющих из себя прямоугольники (пример – на рис. 5).

Листинг 5

```
<svg width=”12cm” height=”4cm”>
<rect x=”4cm” y=”1cm” width=”4cm” height=”2cm”
style=”fill: yellow; stroke: navy; stroke-
width:0.1cm”/>
</svg>
```

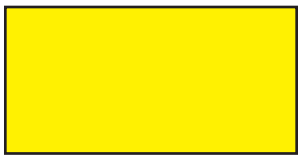


Рис. 5. Отрисовка прямоугольника

7. Элемент table, предназначенный для описания данных, которые могут быть представлены в виде таблицы. Таблица представляет собой отдельный элемент, состоящий из набора ячеек. Ширина и высота таблицы определяется координатами и размерами ячеек. Структура таблицы определяется только по размерам и координатам ее ячеек, ячейки считаются соседними, если у них совпадают по координатам соответствующие границы. Таким образом, можно задать любой вид таблицы с прямоугольными ячейками.

8. Элемент cell, который представляет собой описание ячейки таблицы. Описание ячейки включает элементы форматирования, а также ее содержимое различных типов.

9. Элемент static, описывающий характеристики и расположение на листе библиотечного элемента.

Мы рассмотрели основные элементы, полный список элементов несколько шире.

3 Классификация элементов

Существует около 100 базовых условных обозначений элементов, отображаемых на чертежах железнодорожной автоматики. Некоторые типы элементов (например, светофор) содержат в себе множество модификаций изображений (у светофора их около 500). Кроме того, некоторые типы элементов по-разному отображаются на различных чертежах железнодорожной автоматики. Имеются элементы, изображение которых составляется из конечного числа повторяющихся изображений «единичного» элемента (например, трасса кабелей сигнализации, централизации и блокировки), а также элементы, непропорционально изменяющиеся по осям X и Y (например, пассажирская платформа). Есть целый ряд объектов, графическое изображение которых постоянно (например, маневровая колонка).

Таким образом, все изображения элементов, отображаемых на чертежах, можно разделить на две большие группы – динамические и статические. Динамическими будем называть элементы, изображение которых зависит и однозначно определяется набором свойств элемента. Статическими будем называть элементы, изображение которых постоянно и не зависит от набора свойств элемента.

В документе ОФ-ТД для статического элемента указываются ссылка на элемент библиотеки (см. bsl: static) и необходимая информация о размещении элемента на чертеже (координаты, угол поворота и т. д.). Примеры статических элементов представлены на рис. 6.

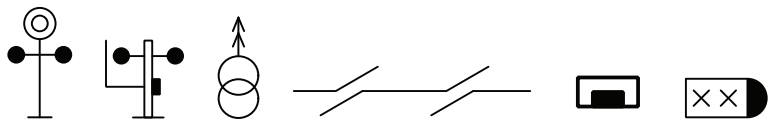


Рис. 6. Статические элементы

Описание любого статического элемента содержит:

– идентификатор элемента в библиотеке;

– флаг отображения на схематическом плане;

– флаг отображения на двухниточном плане;

– флаг отображения на кабельном плане (кабельной сети);

– флаг отображения на схеме канализации тягового тока;

– изображение элемента;

– название элемента;

– атрибуты элемента и их типы.

Все динамические элементы можно подразделить:

– на элементы путевого развития (участки пути, стрелки, стыки, глухие пересечения);

– элементы, привязываемые к элементам путевого развития (светофоры, трансформаторыные ящики, приводы);

– здания;

– элементы, в основе которых лежит прямоугольник (платформа, пешеходный переход, мост);

– элементы, в основе которых лежит линия (различные трассы кабелей);

– элементы, являющиеся частью других.

Динамические элементы описываются набором атрибутов, который непосредственно определяет их изображение.

Пример описания динамического элемента элемента «Светофор» для двухниточного плана станции представлен в следующем листинге.

Листинг 6

```
<DSP: Светофор id=»16» x=»107.66» y=»129.62»
Ордината=»1101» ТипСветофора=»линзовый»
Питание=”местное” Назначение=»входной»
ТипМачты=»железобетонная» Марка=»Св4-НГ-
Б-П» Лестница=»наклонная» Двухсторонний=»нет»
ТрансфЯщик=»нет» УказатТорм=»нет»
УказатСкор=»нет» МаршрутУказат=»нет» Габарит=»0»
УстрНаМачте=»нет» Сигнализация=»четырехзначная»
МестоУстановки=»слева» ИзРастДоПути=»2.09»>
  <bsl: etext id=»17» e: Имя=»Наименование»
  x=»-6.27» y=»-8.71»
  class=»fnt1 fmt1»>Чд</bsl: etext>
  <bsl: etext id=”18” visible=”нет”
  e: Имя=”Ордината” x=”-107.66” y=”-129.62”
  class=”fnt1 fmt1”></bsl: etext>
  <bsl: etext id=”19” e: Имя=”Пикет” x=”-5.40”
```

```
   y="-43.21" angle="270.00"
   class="fnt1 fmt1"></bsl: etext>
   <Показание Номер="0" Показ="белый"/>
   <Показание Номер="10" Показ="желтый"/>
   <Показание Номер="11" Показ="красный"/>
   <Показание Номер="12" Показ="заглушка"/>
   <Показание Номер="13" Показ="желтый"/>
</DSP: Светофор>
```

Варианты изображения элемента «Светофор» представлены на рис. 7.

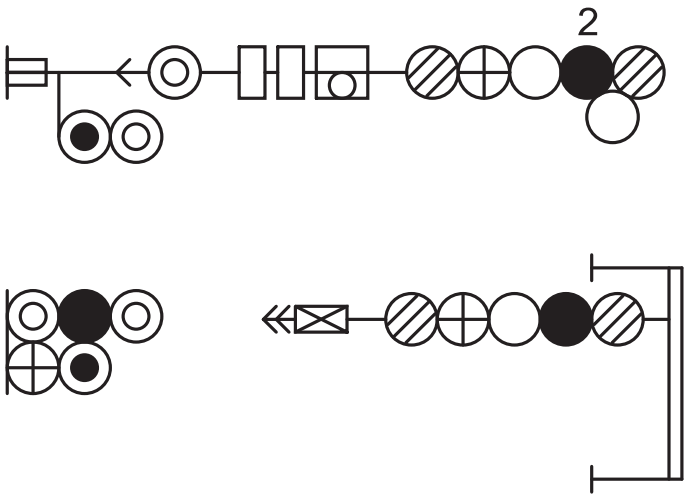


Рис. 7. Варианты изображения элемента «Светофор»

4 Описание связей между элементами

Связи используются как для более удобного графического представления и редактирования документа, так и для автоматического анализа.

Пример структуры связей в общем виде приведен ниже.

Листинг 7

```
<Документ>
<Лист>
<Связи>
   <Связь т1="id (Идентификатор_i)/Атрибут_p"
   т2="id (Идентификатор_j)/Атрибут_r"/>
</Связи>
</Лист>
</Документ>
```

«Атрибут_p» и «Атрибут_r» являются именами точек привязки и определяют аспект, в котором элементы с идентификаторами «Идентификатор_i» и «Идентификатор_j» связаны. К такому описанию часто прибегают для обозначения отношений «соседствует», «включает в себя».

Понятие связи, которое вводится в формат хранения и применяется в специализированных средствах рисования, обеспечивает связанность элементов между собой и совместно с атрибутами элементов позволяет построить единую модель описания устройства. Это позволяет автоматически, на основе технической документации выполнять множество действий, которые раньше делались только вручную. Имея такую модель, можно автоматизировать: ведение технической документации [8–10], проектирование устройств ЖАТ [11, 12], автоматизированную экспертизу технической документации [13–17], распознавание технической документации [18–20], а также создание технической документации на устройства технического диагностирования и непрерывного мониторинга [21–24].

Заключение

Предлагаемый подход к описанию элементов железнодорожной автоматики позволяет использовать ОФ-ТД железнодорожной автоматики для представления всех видов технической документации, в том числе любых чертежей деловой графики общего назначения. При разработке необходимых библиотек элементов возможно создание любых других отраслевых технических документов.

В настоящее время ОФ-ТД железнодорожной автоматики прошел утверждение и внедрен для применения на российских железных дорогах. Формат используется целым рядом программного обеспечения для описания устройств и представления технической документации на устройства автоматики и телемеханики, а также применяется в модулях отраслевых САПР и системы документооборота технической документации ОАО «РЖД» (КЗ АРМ-ВТД).

Библиографический список

1. Седых Д. В. Отраслевой формат технической документации на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики. Ч. 1 : Концепция создания / Д. В. Седых, Д. В. Зуев, М. А. Гордон // Автоматика на транспорте. – 2017. – Т. 3. – № 1. – С. 112–128.
2. Седых Д. В. Отраслевой формат технической документации на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики. Ч. 2 : Сравнение с форматом

railML® / Д. В. Седых, Д. В. Зуев, М. А. Гордон // Автоматика на транспорте. – 2017. – Т. 3. – № 2. – С. 270–279.
3. Седых Д. В. Отраслевой формат технической документации на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики. Ч. 3 : Структура и содержимое / Д. В. Седых, Д. В. Зуев, М. А. Гордон // Автоматика на транспорте. – 2017. – Т. 3. – № 3. – С. 393–413.
4. Седых Д. В. Применение отраслевого формата технической документации на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики для интеграции приложений / Д. В. Седых, С. А. Суханов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2005. – № 3. – С. 74–79.
5. Балуев Н. Н. Проблемы внедрения отраслевого формата / Н. Н. Балуев, М. Н. Василенко, В. Г. Трохов, Д. В. Седых // Автоматика, связь, информатика. – 2010. – № 3. – С. 2.
6. Булавский П. Е. Принципы построения ядра интеграции АСУ – ТП на железнодорожном транспорте / П. Е. Булавский, Д. В. Седых // IX Санкт-Петербургская конференция «Региональная информатика – 2004», 22–24 июня 2004, Санкт-Петербург. – СПб. : СПОИСУ, 2004. – С. 127–129.
7. Седых Д. В. Методы интеграции в АСУ-Ш / Д. В. Седых, М. Н. Василенко // Шестьдесят пятая научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Неделя науки – 2005». – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2005. – С. 152.
8. Василенко М. Н. Развитие электронного документооборота в хозяйстве АТ / М. Н. Василенко, В. Г. Трохов, Д. В. Зуев, Д. В. Седых // Автоматика связь, информатика. – 2015. – № 1. – С. 14–16.
9. Булавский П. Е. Формализация алгоритмического описания систем обеспечения жизненного цикла железнодорожной автоматики и телемеханики / П. Е. Булавский, Д. С. Марков, В. Б. Соколов, Т. Ю. Константинова // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. – № 4. – С. 418–432.
10. Булавский П. Е. Методика оценки временных характеристик процессов электронного документооборота технической документации / П. Е. Булавский, Д. С. Марков // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2. – № 1. – С. 81–94.
11. Денисов Б. П. Автоматизация проектирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики на базе АРМ- ПТД версии 6 / Б. П. Денисов, Н. И. Рубинштейн, С. Н. Растегаев, Н. Ю. Воробей // Актуальные вопросы развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2013. – С. 66–74.
12. Седых Д. В. Автоматический синтез рельсовых цепей по двухниточному плану станции / Д. В. Седых, Д. С. Родионов, Б. П. Денисов // Шестьдесят шестая научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Неделя науки – 2006». – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2006. – С. 194.
13. Безродный Б. Ф. Автоматизация проверки проектов на основе АРМ-ТЕСТ / Б. Ф. Безродный, М. Н. Василенко, Б. П. Денисов, Д. В. Седых // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – № 9. – С. 22–24.
14. Тележенко Т. А. Применение методов моделирования в системах автоматизированного проектирования / Т. А. Тележенко // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2006. – № 2. – С. 66–72.

15. Тележенко Т. А. Автоматизированная система экспертизы схемных решений ЖАТ / Т. А. Тележенко // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 5. – С. 24–26.
16. Горбачев А. М. Автоматизация анализа, экспертизы и сверки технической документации системы железнодорожной автоматики и телемеханики / А. М. Горбачев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2012. – № 4. – С. 73–78.
17. Седых Д. В. Учет работы приборов с помощью АРМ-УРП / Д. В. Седых // Автоматика, связь, информатика. – 2007. – № 3. – С. 7–8.
18. Матушев А. А. Программный комплекс для распознавания монтажной технической документации / А. А. Матушев // Известия Петербургского университетапутей сообщения. – 2015. – № 1. – С. 105–109.
19. Матушев А. А. Распознавание структуры монтажных схем ЖАТ / А. А. Матушев, Д. В. Седых // Автоматика, связь, информатика. – 2015. – № 10. – С. 4–7.
20. Седых Д. В. Методы распознавания структуры монтажных схем железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Седых, А. А. Матушев //Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2. – № 4. – С. 552–563.
21. Лыков А. А. Техническое диагностирование и мониторинг состояния устройств ЖАТ / А. А. Лыков, Д. В. Ефанов, С. В. Власенко // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 5. – С. 67–72.
22. Ефанов Д. В. Некоторые аспекты развития систем функционального контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Ефанов // Транспорт Урала. – 2015. – № 1. – С. 35–40.
23. Ефанов Д. В. Становление и перспективы развития систем функционального контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2. – № 1. – С. 124–148.
24. Ефанов Д. В. Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : монография / Д. В. Ефанов. – СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. – 171 с.

Dmitry V. Sedykh
Denis V. Zuyev
«Automation and remote control on raylways» department
Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university

Michael A. Gordon
Institute «Giprotranssignalsvyaz» – Department of JSC «Roszheldorproject»

Branch format of technical documentation on devices of railway automation and remote control. Part 4: Presentation of elements

The method of description of some elements of railway automatics devices in a branch format of technical documentation on signaling devices was stated in the

given article. The format in question was developed as a means of data integration of different branch information systems. The description principles of graphics primitive of a document were described in the given study. The basic description principles of graphical data were described in the article. The classification of types of elements for the presentation of automatics and telemechanics devices was given. The notions of a static element and a dynamic element were introduced. The notion of description of connections between elements was presented separately, the latter makes the format in question compare favorably with other types of data presenting.

In order to facilitate the comprehension of the structure's description, some nuances were simplified and not too extended. A full and basic description of technical documentation's branch format may be obtained in official technical documentation.

computer-added design systems; electronic format of technical documentation; branch format of technical documentation

References

1. Sedyh D. V., Zuev D. V., Gordon M. A. (2017). Industry Framework for Technical Documentation for Railway Automation and Remote Control Devices. Part 1: Concept of Design [Otraslevoj format tekhnicheskoj dokumentacii na ustrojstva zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki. Chast' 1: Koncepciya sozdaniya]. Automation of transport [Avtomatika na transporte], vol. 3, issue 1. – Pp. 112–128.
2. Sedyh D. V., Zuev D. V., Gordon M. A. (2017). Industry Framework for Technical Documentation for Railway Automation and Remote Control Devices. Part 2: Comparison with railML® FORMAT [Otraslevoj format tekhnicheskoj dokumentacii na ustrojstva zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki. Chast' 2: Sravnenie s formatom railML®]. Automation on transport [Avtomatika na transporte], vol. 3, issue 2. – Pp. 270–279.
3. Sedyh D. V., Zuev D. V., Gordon M. A. (2017). Branch format of technical documentation on devices of railway automatics and telemechanics. Part 3: Structure and contents [Otraslevoj format tekhnicheskoj dokumentacii na ustrojstva zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki. Chast' 3: Struktura i soderzhimoe]. Automation on Transport [Avtomatika na transporte], vol. 3, issue 3. – Pp. 399–413.
4. Sedyh D. V., Suhanov S. A. (2005). Use of technical documentation branch format on railway automation and remote control devices for applications integration [Primenenie otraslevogo formata tekhnicheskoj dokumentacii na ustrojstva zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki dlya integracii prilozhenij]. Proceedings of Petersburg transport university [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya], issue 3. – Pp. 74–79.
5. Baluev N. N., Vasilenko M. N., Trohov V. G., Sedyh D. V. (2010). Problems of branch format introduction [Problemy vnedreniya otraslevogo formata]. Automation, communication, information science [Avtomatika, svyaz', informatika], issue 3. – Pp. 2–4.

6. Bulavskij P. E., Sedyh D. V. (2004). Principles of building the core of the ASU-TP integration in railway transport [Principy postroeniya yadra integracii ASU – TP na zheleznodorozhnom transporte]. IX St. Petersburg Conference «Regional Informatics – 2004», 22–24 June 2004. St. Petersburg [IX Sankt-Peterburgskaya konferenciya «Regional'naya informatika – 2004», SPOISU, 22–24 iyunya 2004, St. Peterburg]. – Pp. 127–129.
7. Sedyh D. V., Vasilenko M. N. (2005). Methods of integration in the Automated Control System. 65th scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists «Week of Science – 2005» [Metody integracii v ASU-SH. Shest'desyat pyataya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya studentov, aspirantov i molodyh uchenyh «Nedelya nauki»]. – P. 152.
8. Vasilenko M. N., Trohov V. G., Zuev D. V., Sedyh D. V. (2015). Development of electronic document management in signaling department [Razvitie ehlektronnogo dokumentooborota v hozyajstve AT]. Automation, communication, information science [Avtomatika svyaz', informatika], issue 1. – Pp. 14–16.
9. Bulavskij P. E., Markov D. S., Sokolov V. B., Konstantinova T. Yu. (2015). Formalisation of algorythmic description of systemsof railway automation and remote control life cycle provision [Formalizaciya algoritmicheskogo opisaniya sistem obespecheniya zhiznennogo cikla zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki]. Automation on transport [Avtomatika na transporte], vol. 1, issue 4. – Pp. 418–432.
10. Bulavskij P. E., Markov D. S. (2016). The method of estimation of time characteristics of execution of processes of technical documentation electronic management [Metodika ocenki vremennyh harakteristik processov ehlektronnogo dokumentooborota tekhnicheskoj dokumentacii]. Automation on transport [Avtomatika na transporte], vol. 2, issue 1. – Pp. 81–94.
11. Denisov B. P., Rubinshtejn N. I., Rastegaev S. N., Vorobej N. Yu. (2013). Systems of railway automation and remote control design automation based on ARMPTD version 6 [Avtomatizaciya proektirovaniya sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki na baze ARM-PTD versii 6]. Actual problems of railway automation and remote control systems development, scientific proceedings, edited by Vl. V. Sapozhnikov [Aktual'nye voprosy razvitiya sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki, sb. nauch. trudov, pod red. Vl. V. Sapozhnikova]. St. Petersburg, Petersburg state transport university [Peterburgskij gos. un-t putej soobshcheniya]. – Pp. 66–74.
12. Sedyh D. V., Rodionov D. S., Denisov B. P. (2006), Automatic synthesis of track circuits on a two-line station plan [Avtomaticheskij sintez rel'sovyh cepej po dvuhnitochnomu planu stancii]. 66th scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists «Week of Science – 2006» [Shest'desyat shestaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya studentov, aspirantov i molodyh uchenyh «Nedelya nauki – 2006»]. – P. 194.
13. Bezrodnyj B. F., Vasilenko M. N., Denisov B. P., Sedyh D. V. (2008). Automation of project verification based on AWP-TEST [Avtomatizaciya proverki proektov na osnove ARM-TEST]. Automation, communication, information science [Avtomatika, svyaz', informatika], issue 9. – Pp. 22–24.

14. Telezhenko T.A. (2006). Use of simulation methods in CAD systems [Primenenie metodov modelirovaniya v sistemah avtomatizirovannogo proektirovaniya], Proceedings of Petersburg transport university [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya], issue 2. – Pp. 66–72.
15. Telezhenko T.A. (2009). Automated system of signaling systems technical solutions expertise [Avtomatizirovannaya sistema ehkspertizy skhemnyh reshenij ZHAT], Automation, communication, information science [Avtomatika, svyaz', informatika], issue 5. – Pp. 24–26.
16. Gorbachev A.M. (2012). Automation of analysis, examination and collation of railway automatics and telemechanics technical documentation [Avtomatizaciya analiza, ehkspertizy i sverki tekhnicheskoj dokumentacii sistemy zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki]. Proceedings of Petersburg transport university [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya], issue 4. – Pp. 73–78.
17. Sedyh D.V. (2007). Accounting of devices operation using ARM-URP [Uchet raboty priborov s pomoshch'yu ARM-URP], Automation, communication, information science [Avtomatika, svyaz', informatika], issue 3. – Pp. 7–8.
18. Matushev A.A. (2015). Software package for recognition of assembling technical documentation [Programmnyj kompleks dlya raspoznavaniya montazhnoj tekhnicheskoj dokumentacii]. Proceedings of Petersburg transport university [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya], issue 1. – Pp. 105–109.
19. Matushev A.A., Sedyh D.V. (2015). Recognition of patterns of wiring diagrams RATM [Raspoznavanie struktury montazhnyh skhem ZHAT]. Automation, communication, information science [Avtomatika, svyaz', informatika], issue 10. – Pp. 4–7.
20. Sedyh D.V., Matushev A.A. (2016). Methods of assembly diagrams structure recognition of railway automation and remote control [Metody raspoznavaniya struktury montazhnyh skhem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki]. Automation on transport [Avtomatika na transporte], vol. 2, issue 4. – Pp. 552–563.
21. Lykov A.A., Efanov D.V., Vlasenko S.V. (2012). Technical diagnostics and monitoring of rat units [Tekhnicheskoe diagnostirovanie i monitoring sostoyaniya ustrojstv ZHAT]. Transport of the Russian Federation [Transport Rossijskoj Federacii], issue 5. – Pp. 67–72.
22. Efanov D.V. (2015). Development aspects of functional control systems of railway automation and telemechanics devices [Nekotorye aspekty razvitiya sistem funkcional'nogo kontrolya ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki]. Transport of the Urals [Transport Urala], issue 1. – Pp. 35–40.
23. Efanov D.V. (2016). Becoming and development prospects of concurrent error detection and monitoring systems of railway automation and remote control devices [Stanovlenie i perspektivy razvitiya sistem funkcional'nogo kontrolya i monitoringa ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki]. Automation on transport [Avtomatika na transporte], vol. 2, issue 1. – Pp. 124–148.
24. Efanov D.V. (2016). Concurrent checking and monitoring of railway automation and remote control devices, monograph [Funkcional'nyj kontrol' i monitoring ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki, monografiya]. St. Petersburg, Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university [St. Petersburg, Izdatel'stvo Peterburgskogo gos. un-ta putej soobshcheniya]. – 171 p.

Статья представлена к публикации членом редколлегии М.Н. Василенко
Поступила в редакцию 05.05.2016, принята к публикации 01.11.2016

СЕДЫХ Дмитрий Владимирович – инженер кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: sedyhdmitriy@gmail.com

ЗУЕВ Денис Владимирович – руководитель НТЦ-САПР кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: zuevdv@gmail.com

ГОРДОН Михаил Аркадьевич – главный специалист Института «Гипротранссигналсвязь» – филиала АО «Росжелдорпроект».
e-mail: gordon_ma@mail.ru

© Седых Д.В., Зуев Д.В., Гордон М.А., 2017

Проектирование и тестирование логических устройств

УДК 681.518.5:004.052.32

Вал. В. Сапожников, д-р техн. наук,
Вл. В. Сапожников, д-р техн. наук,
Д. В. Ефанов, канд. техн. наук
Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»,
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

ВЫБОР МОДИФИЦИРОВАННОГО КОДА С СУММИРОВАНИЕМ ЕДИНИЧНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ РАЗРЯДОВ ДЛЯ ЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С ИЗВЕСТНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ

Коды с суммированием с небольшим количеством разрядов в контрольных векторах часто используются при организации систем технического диагностирования логических устройств. Одним из перспективных кодов является код с суммированием единичных информационных разрядов, принципы построения которого базируются на основе использования специального поправочного коэффициента в виде суммы по модулю два заранее установленных разрядов информационного вектора и на вычислении наименьшего неотрицательного вычета веса информационного вектора по модулю $M = 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}$. Данная работа восполняет пробел в исследованиях модифицированных кодов с суммированием единичных разрядов и посвящена изучению влияния выбора правил вычисления поправочного коэффициента на такие важные показатели, как обнаружение ошибок на выходах контролируемых схем и структурная избыточность систем диагностирования. В эксперименте с набором контрольных комбинационных схем анализируются характеристики модифицированных кодов с суммированием единичных информационных разрядов (модифицированных кодов Бергера). Показано, что выбор способа вычисления поправочного коэффициента при построении модифицированного кода Бергера имеет принципиальное значение и определяет различные по характеристикам системы диагностирования (как сложности технической реализации, так и обнаружения ошибок на выходах контролируемых схем). Для обоснованного выбора модифицированного кода с суммированием единичных разрядов разработаны алгоритмы, позволяющие максимизировать показатель обнаружения ошибок и минимизировать показатель сложности технической реализации системы диагностирования.

система диагностирования; код Бергера; модифицированный код с суммированием единичных разрядов; обнаружение ошибок на выходах схем; площадь системы диагностирования

Введение

При построении надежных систем управления технологическими процессами на микроэлектронной и микропроцессорной основе часто используются различные методы синтеза самопроверяемых схем контроля [1–10]. В таких схемах неисправность из заданного класса (наиболее часто рассматривается модель константных неисправностей – stuck-at faults [11]) проявляется на выходах в виде защитной комбинации хотя бы на одном входном наборе [12].

При синтезе самопроверяемых схем контроля часто используются классические коды с суммированием, или коды Бергера [13], и их модификации [14–17]. В [18] показано, что от характеристик обнаружения кодом ошибок в информационных векторах напрямую зависят показатели обнаружения ошибок на выходе объекта диагностирования. При невозможности обнаружения 100 % ошибок из заданного класса применяются методы выделения групп контролепригодных выходов [19] или модификации структур объектов диагностирования [20–22]. Структурная избыточность, вносимая при этом непосредственно в объект диагностирования или же в схему контроля, зависит от правил формирования разрядов контрольных векторов кодов с суммированием [23].

Перспективным для задач организации схем контроля кодом с суммированием является модифицированный код с суммированием единичных информационных разрядов, или *RS*(*m*,*k*)-код, где *m* и $k = \left\lceil \log_2 (m+1) \right\rceil$ – длины информационных и контрольных векторов соответственно [24].

Впервые способ построения *RS*(*m*,*k*)-кодов изложен в [17]. Он базируется на вычислении модифицированного веса информационного вектора по формуле

$$W = r \left(\mathrm{mod}\, M \right) + \alpha M, \tag{1}$$

где *r* – вес информационного вектора (количество единичных разрядов); $M = 2^{\left\lceil \log_2 (m+1) \right\rceil - 1}$ – модуль вычисления веса; выражение $r\,(\mathrm{mod} M)$ определяет наименьший неотрицательный вычет значения веса по модулю *M*; α – специальный поправочный коэффициент – сумма по модулю два заранее установленных разрядов в информационном векторе.

Первые работы в области исследования свойств *RS*(*m*,*k*)-кодов касались анализа характеристик обнаружения ими ошибок в информационных векторах при единственном способе вычисления поправочного коэффициента: $\alpha = f_{k+1} \oplus f_{k+2} \oplus \ldots \oplus f_{m-1} \oplus f_m$, где f_i ($i \in \{1;2;\ldots;m\}$) – разряд информационного вектора [17, 25, 26].

В [27] предлагается строить модульно модифицированные коды с суммированием, или *RSM*(*m*,*k*)-коды, с вычислением суммарного веса по формуле (1)

и поправочного коэффициента по формуле $\alpha = f_{k+1} \oplus f_{k+2} \oplus ... \oplus f_{m-1} \oplus f_m$, но со значением модуля, выбранным из множества $M \in \left\{2; 4; ...; 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 2}\right\}$.

Исследования влияния способов вычисления поправочного коэффициента α на характеристики кодов с суммированием показали, что поправочный коэффициент может быть вычислен как сумма по модулю два произвольных разрядов информационного вектора, а общее количество способов построения кода равно $\sum_{j=1}^{m-1} C_m^j = 2^m - 2$ [24, 28]. В [29] описано семейство модульно модифицированных кодов с суммированием единичных разрядов с различными способами вычисления поправочного коэффициента.

В [24] утверждается, что для общего случая рассмотрения всех информационных векторов не важно, какие именно разряды определяют значение поправочного коэффициента, а важно их количество: *RS*(*m*,*k*)-коды будут обладать одинаковыми характеристиками обнаружения ошибок в информационных векторах при одинаковом количестве разрядов в сумме поправочного коэффициента. Минимальное общее количество необнаруживаемых ошибок, а также минимальное общее количество двукратных необнаруживаемых ошибок имеет *RS*(*m*,*k*)-код, для которого в сумме поправочного коэффициента использовано $\frac{m}{2}$ разрядов информационного вектора при четном значении *m* и $\frac{m \pm 1}{2}$ – при нечетном значении *m*.

Отметим ключевые свойства *RS*(*m*,*k*)-кодов, которые целесообразно учитывать при организации систем диагностирования [30, 31]:

1. *RS*(*m*,*k*)-коды обнаруживают любые ошибки с нечетными кратностями.

2. *RS*(*m*,*k*)-коды не обнаруживают примерно половину возможных симметричных ошибок в информационных векторах, имея в классе необнаруживаемых симметричные ошибки с любыми четными кратностями.

3. *RS*(*m*,*k*)-коды обнаруживают монотонные ошибки любых кратностей за исключением некоторых монотонных ошибок с кратностями $d = M$.

4. *RS*(*m*,*k*)-коды обнаруживают асимметричные ошибки любых кратностей $d \le M$ и не обнаруживают часть асимметричных ошибок с кратностями $d = M + 2j, \ \ j = 1, 2, ..., q, \ \ q \le \left\lfloor \frac{m - M}{2} \right\rfloor$.

На выходах реальных схем все 2^m возможных информационных вектора формируются крайне редко, что определяется условиями их функционирования (множеством входных комбинаций) и топологией. Таким образом, правила вычисления поправочного коэффициента становятся существенными и влияют на каждый конкретный случай. Поставим следующую задачу: проанализировать влияние правил формирования поправочного коэффициента

на характеристики обнаружения ошибок на выходах контрольных комбинационных схем, а также структурную избыточность систем диагностирования, построенных по *RS*(*m*,*k*)-кодам.

1 Структурная схема системы диагностирования

На рис. 1 изображена структурная схема системы диагностирования логического устройства $F(x)$, реализующего набор булевых функций $f_1, f_2, \ldots, f_m$. С целью контроля неисправностей объекта диагностирования по результатам вычислений функций он снабжается схемой контроля в составе блока контрольной логики $G(x)$, вычисляющего ряд контрольных функций $g_1, g_2, \ldots, g_k$, и тестера *TSC*, осуществляющего сравнение значений функций $f_1, f_2, \ldots, f_m$ и $g_1, g_2, \ldots, g_k$ [32, 33]. Наиболее просто *TSC* для идентификации принадлежности поступающих кодовых слов выбранному разделимому коду реализуется в виде каскадного соединения генератора контрольных разрядов $G(f)$ [34], формирующего по значениям основных функций системы значения альтернативных контрольных функций $g_1', g_2', \ldots, g_k'$, и компаратора *TRC*, осуществляющего сравнение одноименных сигналов g_j и g_j' ($j \in \{1;2;...;k\}$) и вырабатывающего единственный контрольный сигнал $<z^0 z^1>$ [35, 36]. При исправной работе всех блоков системы диагностирования на контрольном выходе тестера формиру-

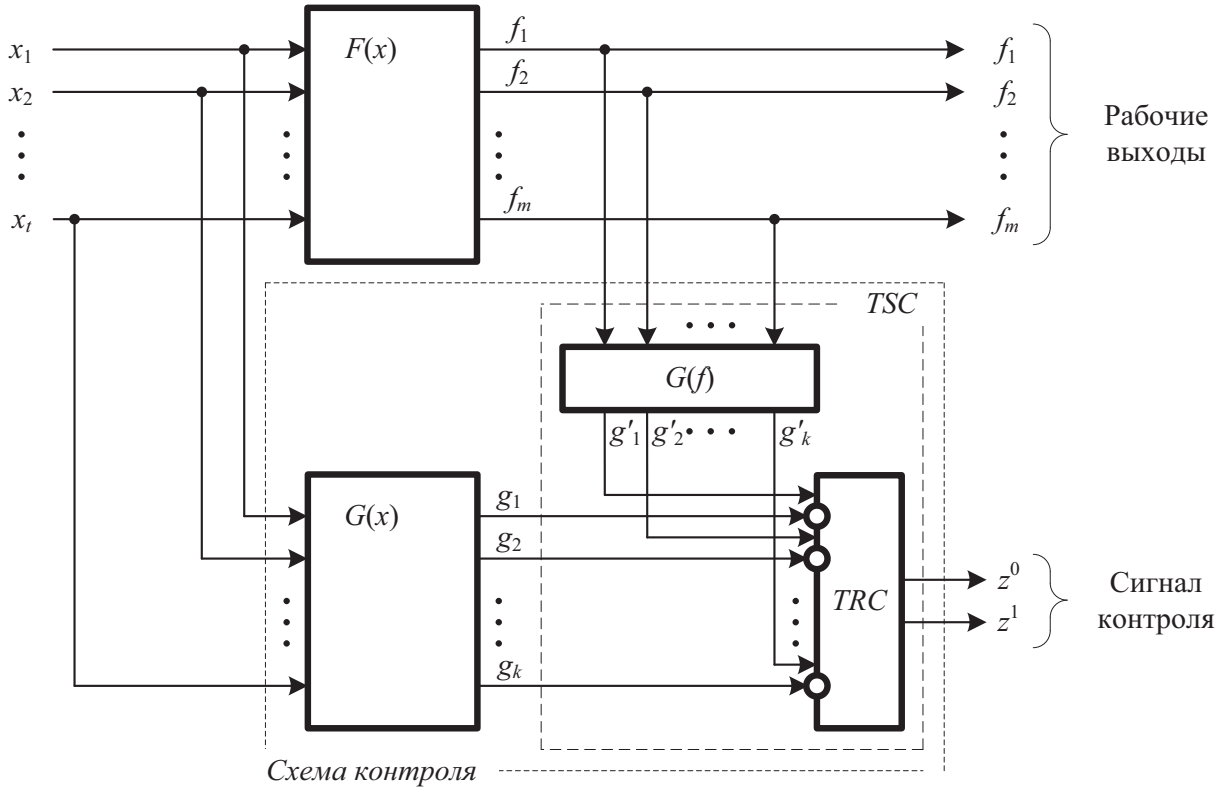


Рис. 1. Структурная схема системы диагностирования

ется парафазный сигнал <01> или <10>; наличие на выходе тестера непарафазного сигнала <00> или <11> свидетельствует о присутствии неисправностей в одном из блоков системы диагностирования.

Схема компаратора в тестере является стандартной и строится в виде схемы сжатия парафазных сигналов. Для построения схемы компаратора требуется $k - 1$ стандартный модуль сжатия парафазных сигналов – при поступлении на парафазные входы парафазного сигнала такой модуль формирует на выходе также парафазный сигнал (рис. 2). Остальные блоки системы диагностирования строятся исходя из того, какой код положен в ее основу. Блок $G(f)$ является кодером выбранного кода, формирующим значения разрядов контрольного вектора по значениям рабочих выходов системы диагностирования, а блок $G(x)$ – альтернативным устройством, также формирующим значения разрядов контрольных векторов выбранного кода, однако по значениям входов системы диагностирования.

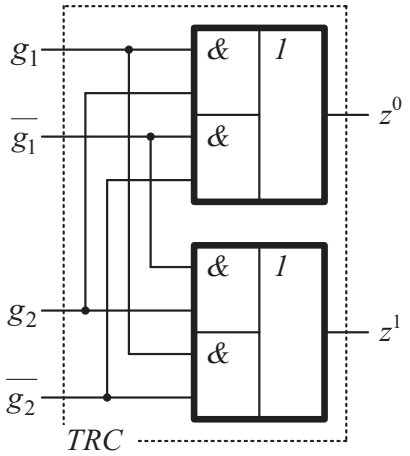


Рис. 2. Модуль сжатия парафазных сигналов

2 Инструментальная база для экспериментов

В ходе экспериментальных исследований характеристик модифицированных кодов с суммированием единичных информационных разрядов было разработано специальное программное обеспечение, позволяющее формировать для заданной контрольной схемы файлы-описания блоков $G(x)$ и $G(f)$ в формате *.pla [37]. Далее файлы анализировались с использованием интерпретатора *SIS* и определялась сложность технической реализации блоков в условных единицах площади, занимаемой устройством на кристалле, в библиотеке стандартных функциональных элементов stdcell2_2.genlib. Площадь системы диагностирования определяется по формуле

$$L_{CED} = L_{F(x)} + L_{G(x)} + L_{G(f)} + 16k + 192(k-1), \quad (2)$$

где величины $L_{F(x)}$, $L_{G(x)}$ и $L_{G(f)}$ характеризуют площади соответствующих блоков системы диагностирования, величина $16k$ соответствует площади, занимаемой каскадом инверторов, а 192 $(k-1)$ – площади компаратора *TRC* в библиотеке stdcell2_2.genlib.

Были проанализированы некоторые контрольные комбинационные схемы базы LGSynth`89 [38]. Контрольные схемы из данного набора записаны в формате *.netblif, содержащем данные о структуре схемы. Это позволило проанализировать влияние одиночных константных неисправностей выходов внутренних логических элементов на выходы схемы и обнаруживающую способность каждого способа кодирования. В эксперименте в структуре схемы последовательно фиксировались все возможные одиночные константные неисправности логических элементов и на входы контрольной схемы подавались все возможные входные воздействия. Это позволило для каждой одиночной неисправности сформировать множество информационных векторов, классифицированных на векторы, содержащие ошибку (обнаруживаемую кодом или нет) или не содержащие ошибку. Далее было определено общее количество векторов с необнаруживаемой ошибкой. В итоге для каждой схемы была получена статистика по необнаруживаемым на ее выходах ошибкам по каждой возможной кратности $d \in \{1; 2; ...; m\}$ и виду (одиночная, монотонная, симметричная и асимметричная [39]).

3 Результаты экспериментов по анализу характеристик обнаружения ошибок на выходах контрольных схем

В эксперименте по анализу характеристик обнаружения ошибок на выходах контрольных комбинационных схем с использованием *RS* (m, k)-кодов определялось, как влияют одиночные константные неисправности на выходах внутренних логических элементов на выходы самой схемы. Последовательно вносились одиночные константные неисправности и на входы подавались все возможные входные воздействия. Выбирался способ вычисления поправочного коэффициента α для соответствующего количеству выходов схемы *RS*(m,k)-кода и формировались распределения необнаруживаемых ошибок по видам и кратностям.

Проанализируем некоторые результаты экспериментов с тремя комбинационными схемами – cm162a, alu2 и x2 (табл. 1). Для каждой из них были исследованы все 2^m варианта образования поправочного коэффициента. Результаты в табл. 2–4 содержат распределения необнаруживаемых ошибок по видам и кратностям для каждой схемы, а также рассчитанные показатели обнаружения ошибок.

Классическими кодами Бергера в каждой из представленных схем не будут обнаружены все симметричные ошибки (см. табл. 1). Некоторые же

Таблица 1. Характеристики выбранных контрольных комбинационных схем

Название схемы	Количество входов	Количество выходов	Площадь в условных единицах stdcell 2_2. genlib	Количество необнаруживаемых ошибок			
				монотонных	симметричных	асимметричных	всего
cm162a	14	5	784	314 067	1920	1344	317 331
alu2	10	6	7264	52 460	7722	2616	62 798
x2	10	7	1056	19 484	104	120	19 708

Таблица 2. Показатели обнаружения ошибок *RS*(*m*,*k*)-кодами на выходах схемы *cm*162*a*

№	α	Необнаруживаемые ошибки			Показатели обнаружения ошибок, %		
		монотонные, $d = 4$	симметричные, $d = 2$	всего	υ_4	σ_2	γ_m
1	0, 31	6493	1920	8413	100	100	2,65117
2	1, 30	5597	1920	7517	86,201	100	2,36882
3	2, 29	224	1920	2144	3,45	100	0,67564
4	3, 28	672	1920	2592	10,35	100	0,81681
5	4, 27	224	1536	1760	3,45	80	0,55463
6	5, 26	672	1536	2208	10,35	80	0,6958
7	6, 7	6045	1536	7581	93,1	80	2,38899
8	8, 23	224	0	224	3,45	0	0,07059
9	9, 22	672	0	672	10,35	0	0,21177
10	10, 11	6045	0	6045	93,1	0	1,90495
11	12, 13	6045	384	6429	93,1	20	2,02596
12	14, 17	672	384	1056	10,35	20	0,33278
13	15, 16	224	384	608	3,45	20	0,1916
14	18, 19	6045	384	6429	93,1	20	2,02596
15	20, 21	6045	0	6045	93,1	0	1,90495
16	24, 25	6045	1536	7581	93,1	80	2,38899

RS(*m*,*k*)-коды обнаруживают часть симметричных ошибок на выходах комбинационных схем. Следует отметить что *RS*(*m*,*k*)-коды с длинами информационных векторов *m*, равными 5, 6, 7, в классе необнаруживаемых будут иметь монотонные ошибки кратностью $d = 4$ и для *m*, равными 6, 7, – асимметричные

Таблица 3. Показатели обнаружения ошибок *RS*(*m*,*k*)-кодами на выходах схемы *alu*2

№	α	Необнаруживаемые ошибки				Показатели обнаружения ошибок, %			
		монотонные, $d=4$	симметричные, $d=2$	симметричные, $d=4$	Всего	υ_4	σ_2	σ_4	γ_m
1	0, 63	0	7691	31	7722	0	100	100	0,12297
2	1, 62	3	7621	11	7635	2,113	99,09	35,484	0,12158
3	2, 61	120	2601	0	2721	84,507	33,819	0	0,04333
4	3, 60	19	2531	23	2573	13,38	32,909	74,194	0,04097
5	4, 69	0	7691	23	7714	0	100	74,194	0,12284
6	5, 58	139	7621	0	7760	97,887	99,09	0	0,12357
7	6, 57	22	2601	0	2623	15,493	33,819	0	0,04177
8	7, 56	123	2531	31	2685	86,62	32,909	100	0,04276
9	8, 55	0	7643	20	7663	0	99,376	64,516	0,12203
10	9, 54	139	7573	3	7715	97,887	98,466	9,677	0,12285
11	10, 53	22	2553	11	2586	15,493	33,195	35,484	0,04118
12	11, 52	123	2483	28	2634	86,62	32,284	90,323	0,04194
13	12, 51	142	7643	28	7813	100	99,376	90,323	0,12441
14	13, 50	3	7573	11	7587	2,113	98,466	35,484	0,12082
15	14, 49	120	2553	3	2676	84,507	33,195	9,677	0,04261
16	15, 48	19	2483	20	2522	13,38	32,284	64,516	0,04016
17	16, 47	19	1040	0	1059	13,38	13,522	0	0,01686
18	17, 46	120	980	23	1123	84,507	12,742	74,194	0,01788
19	18, 45	3	4180	31	4214	2,113	54,349	100	0,0671
20	19, 44	142	4120	8	4270	100	53,569	25,806	0,068
21	20, 43	123	1040	8	1171	86,62	13,522	25,806	0,01865
22	21, 42	22	980	31	1033	15,493	12,742	100	0,01645
23	22, 41	139	4180	23	4342	97,887	54,349	74,194	0,06914
24	23, 40	0	4120	0	4120	0	53,569	0	0,06561
25	24, 39	123	1088	11	1222	86,62	14,146	35,484	0,01946
26	25, 38	22	1028	28	1078	15,493	13,366	90,323	0,01717
27	26, 37	139	4228	20	4387	97,887	54,973	64,516	0,06986
28	27, 36	0	4168	0	4168	0	54,193	0	0,06637
29	28, 35	19	1088	3	1110	13,38	14,146	9,677	0,01768
30	29, 34	120	1028	20	1168	84,507	13,366	64,516	0,0186
31	30, 33	3	4228	28	4259	2,113	54,973	90,323	0,06782
32	31, 32	142	4168	11	4321	100	54,193	35,484	0,06881

Таблица 4. Показатели обнаружения ошибок $RS(m,k)$-кодами на выходах схемы $x2$

№	α	Необнаруживаемые ошибки			Показатели обнаружения ошибок, %		
		монотонные, $d=4$	симметричные, $d=2$	N_m	υ_4	σ_2	γ_m
1	0, 127	0	104	104	0	100	0,5277
2	1, 17, 42, 58, 69, 85, 110, 126	40	56	96	100	53,846	0,48711
3	2, 18, 41, 57, 70, 86, 109, 125	24	0	24	60	0	0,12178
4	3, 19, 40, 56, 71, 87, 108, 124	24	48	72	60	46,154	0,36533
5	4, 20, 47, 63, 64, 80, 107, 123	0	104	104	0	100	0,5277
6	5, 21, 46, 62, 65, 81, 106, 122	0	56	56	0	53,846	0,28415
7	6, 22, 45, 61, 66, 82, 105, 121	16	0	16	40	0	0,08119
8	7, 23, 44, 60, 67, 83, 104, 120	16	48	64	40	46,154	0,32474
9	8, 24, 35, 51, 76, 92, 103, 119	16	104	120	40	100	0,60889
10	9, 25, 34, 50, 77, 93, 102, 118	16	56	72	40	53,846	0,36533
11	10, 26, 33, 49, 78, 94, 101, 117	0	0	0	0	0	0
12	11, 27, 32, 48, 79, 95, 100, 116	0	48	48	0	46,154	0,24356
13	12, 28, 39, 55, 72, 88, 99, 115	24	104	128	60	100	0,64948
14	13, 29, 38, 54, 73, 89, 98, 114	24	56	80	60	53,846	0,40593
15	14, 30, 37, 53, 74, 90, 97, 113	40	0	40	100	0	0,20296
16	15, 31, 36, 52, 75, 91, 96, 112	40	48	88	100	46,154	0,44652
17	16, 43, 59, 68, 84, 111	40	104	144	100	100	0,73067

ошибки с кратностью $d=6$ [30]. Последние, однако, на выходах данных схем не возникают ввиду особенностей их топологии. Монотонные же четырехкратные ошибки на выходах рассматриваемых схем допустимы, и часть из них не обнаруживается $RS(m,k)$-кодами. За счет этого для каждой схемы при некоторых способах вычисления поправочного коэффициента α при построении $RS(m,k)$-кода допускается даже ухудшение характеристик обнаружения ошибок по сравнению с использованием для контроля кода Бергера. Тем не менее для каждой схемы может быть подобран такой способ построения $RS(m,k)$-кода, который позволяет обнаруживать большее, чем при использовании кода Бергера, количество ошибок на ее выходах.

Для упрощения записи в табл. 2–4 введены специальные обозначения для формул вычисления поправочных коэффициентов $RS(m,k)$-кодов. Формулы поправочных коэффициентов обозначены десятичными эквивалентами двоичных чисел, определяющих позиции суммируемых в информацион-

ных векторах разрядов (в двоичной записи десятичного эквивалента единичные разряды соответствуют суммируемым разрядам информационного вектора). Например, десятичный эквивалент 27 соответствует двоичному числу <11011>, что означает необходимость суммирования 1, 2, 4 и 5-го разрядов при вычислении поправочного коэффициента: $\alpha = f_1 \oplus f_2 \oplus f_4 \oplus f_5$. Таким образом, десятичное число, указанное в табл. 2–4 для поправочных коэффициентов, однозначно определяет один код из семейства *RS*(*m*,*k*)-кодов с заданной длиной информационного вектора.

Несмотря на то что при использовании *RS*(*m*,*k*)-кодов не всегда удается обеспечить 100 %-е обнаружение ошибок на выходах контролируемых схем, изменяя формулу вычисления поправочного коэффициента, можно минимизировать количество необнаруживаемых на выходах схемы ошибок и тем самым снизить вероятность их возникновения для данной схемы. В каждой из таблиц 2–4 рассчитаны следующие показатели обнаружения ошибок:

– υ_d – доля необнаруживаемых монотонных ошибок кратностью *d* от общего количества монотонных ошибок данной кратностью в схеме;

– σ_d – доля необнаруживаемых симметричных ошибок кратностью *d* от общего количества симметричных ошибок данной кратностью;

– γ_m – доля необнаруживаемых кодом ошибок от общего количества возможных ошибок на выходах схемы.

По показателю γ_m можно судить об эффективности обнаружения ошибок *RS*(*m*,*k*)-кодами с различными способами вычисления поправочного коэффициента в каждой конкретной схеме (рис. 3–5). Для схемы cm162a значение показателя γ_m колеблется от величины 2,65117 % к величине 0,07059 % при различных способах вычисления α (рис. 3). Для других рассматриваемых схем этот показатель в среднем значительно ниже: для *alu*2 минимум значения γ_m равен 0,01645 %, а максимум – 0,12441 % (рис. 4); для *x*2 минимум составляет 0 %, а максимум – 0,73067 % (рис. 5). Таким образом, для каждой контрольной схемы показатель, характеризующий необнаруживаемые кодом ошибки, составляет менее 1 %. По графикам рис. 3–5 можно выбрать такой способ вычисления поправочного коэффициента, который будет давать минимум необнаруживаемых ошибок на выходах соответствующих схем.

Отметим некоторые закономерности, определяющие способы построения *RS* (*m*, *k*)-кодов с разнообразными характеристиками обнаружения ошибок на выходах контрольных комбинационных схем:

1) в отличие от теоретических результатов [24, 28–30], в ходе исследований установлено, что для каждой контрольной схемы выбор конкретных разрядов информационного вектора имеет принципиальное значение и позволяет даже при одинаковом их количестве в сумме поправочного коэффициента уменьшить количество необнаруживаемых кодом ошибок;

2) одинаковые распределения необнаруживаемых ошибок по видам и кратностям получаются всегда для пар десятичных эквивалентов вычисления

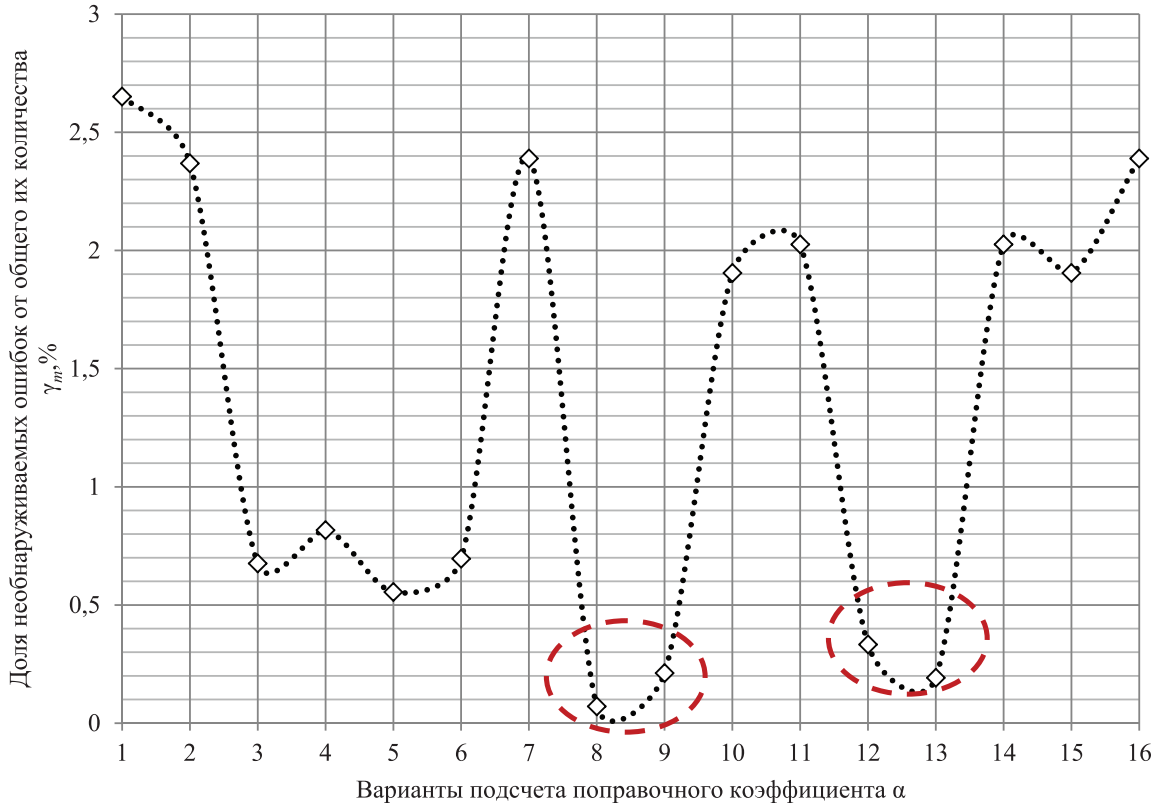


Рис. 3. Значение коэффициента γ_m для контрольной схемы *cm*162*a*

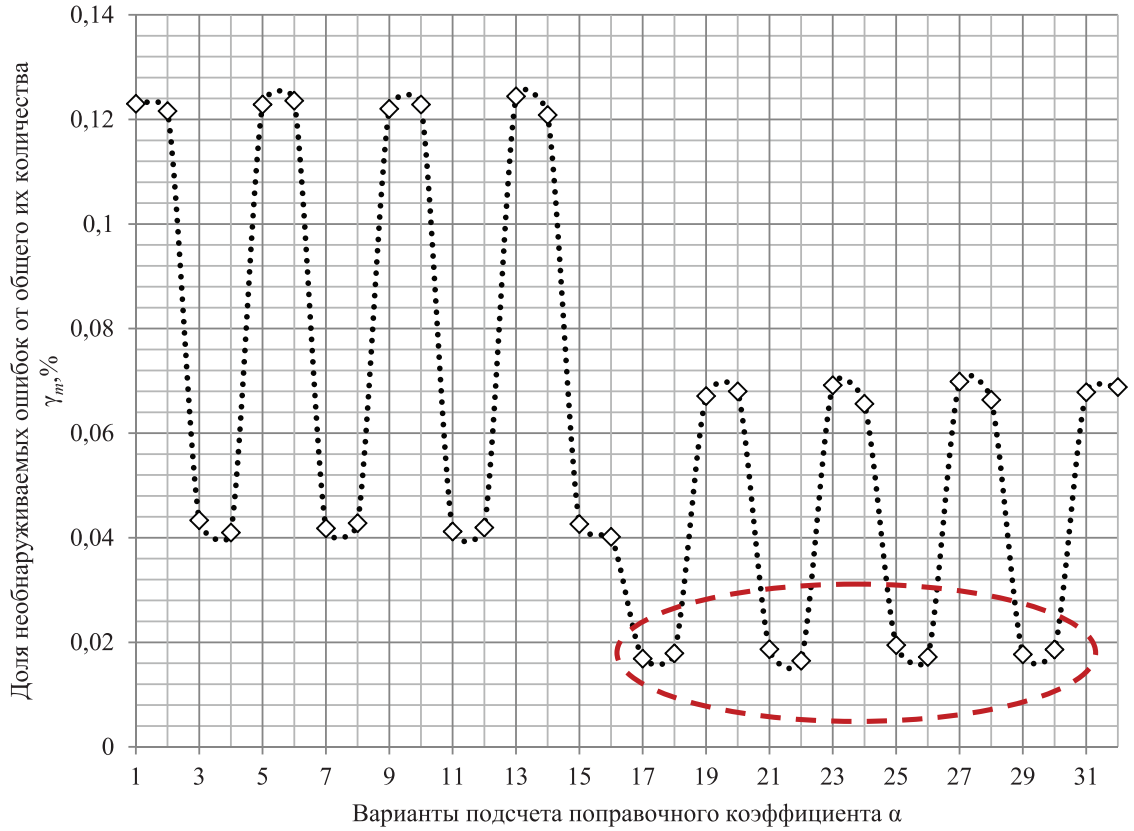


Рис. 4. Значение коэффициента γ_m для контрольной схемы *alu*2

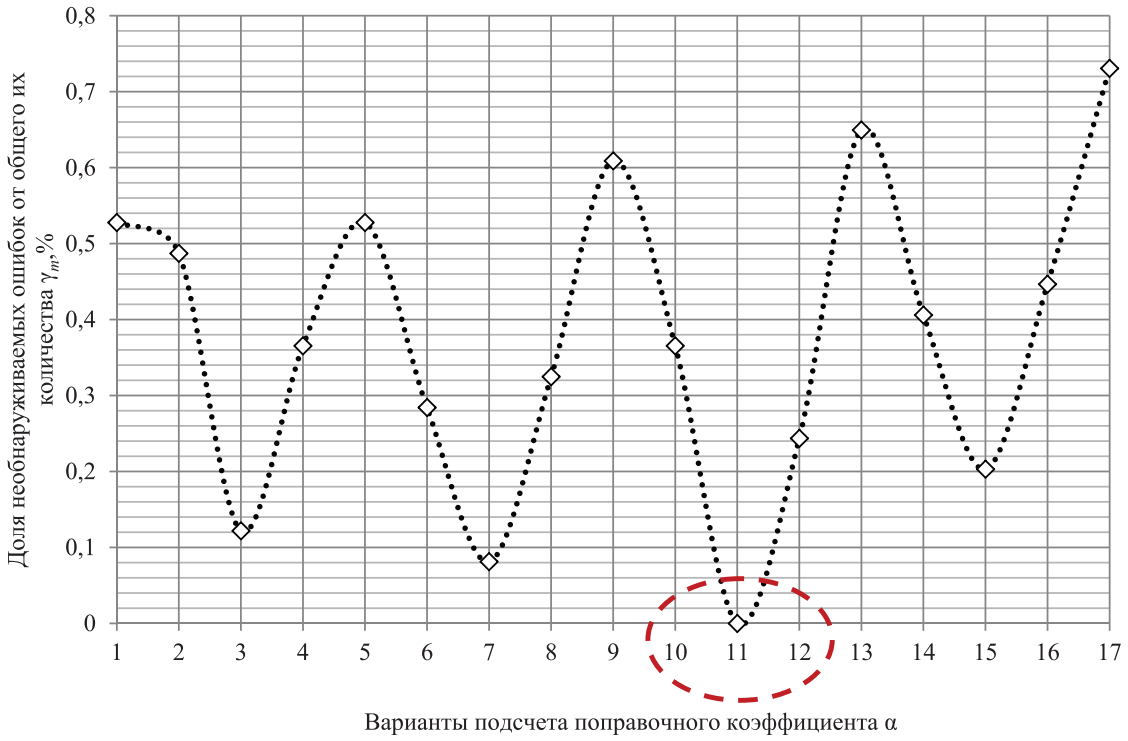


Рис. 5. Значение коэффициента γ_m для контрольной схемы *x*2

поправочного коэффициента, и нет случая, когда одно и то же распределение необнаруживаемых ошибок имеется для нечетного количества способов вычисления поправочного коэффициента.

Проиллюстрируем пункт 1. К примеру, в табл. 2 вариант с вычислением поправочного коэффициента с десятичным эквивалентом, равным единице, дает большее количество необнаруживаемых ошибок, чем вариант с вычислением поправочного коэффициента с десятичным эквивалентом, равным восьми. В первом случае $\alpha = f_1$, а во втором $\alpha = f_4$. Таким образом, отдельный контроль четвертого разряда позволяет значительно уменьшить количество необнаруживаемых в схеме ошибок.

Отмеченная в п. 2 особенность позволяет среди выбранных способов построения модифицированного кода с суммированием выбрать такой, который даст улучшение характеристик системы контроля еще по одному критерию, например по сложности технической реализации.

4 Результаты экспериментов по анализу показателей структурной избыточности контрольных схем

Сложность технической реализации системы функционального контроля оценивается показателем площади, занимаемой логическим устройством на кристалле (см. формулу (2)). С использованием разработанного авторами

комплекса программ Coding были получены файлы-описания всех составляющих системы диагностирования (см. рис. 1). Далее, с применением известного интерпретатора SIS и с использованием стандартной библиотеки функциональных элементов stdcell2_2.genlib [37] были определены показатели площади систем диагностирования, построенных на основе использования различных модифицированных кодов с суммированием. В табл. 5 для примера приведены результаты вычислений для системы диагностирования схемы *cm*162*a*.

Таблица 5. Площади систем диагностирования для контроля схемы *cm*162*a*

α	$L_{RS\,(m,\,k)}$	$L_{S\,(m,\,k)}$	$\frac{L_{RS(m,k)}}{L_{S(m,k)}}$, %
1	4320	4832	89,404
2	5408		111,921
3	4576		94,702
4	5432		112,417
5	4416		91,391
6	4712		97,517
7	4080		84,437
8	5392		111,589
9	4592		95,033
10	4768		98,675
11	4480		92,715
12	4856		100,497
13	4376		90,563
14	4480		92,715
15	4544		94,04
16	4864		100,662
17	4216		87,252
18	4880		100,993
19	4160		86,093
20	6624		137,086
21	4496		93,046
22	4328		89,57
23	4952		102,483
24	4432		91,722
25	4152		85,927
26	4408		91,225
27	4656		96,358
28	4248		87,914
29	4608		95,364
30	4040		83,609
31	4488		92,881

Следует отметить, что, в отличие от результатов анализа показателей обнаружения ошибок в схемах на основе *RS*(*m*,*k*)-кодов, различные способы вычисления поправочного коэффициента дают различные по площади системы диагностирования. На рис. 6 показана зависимость показателя уменьшения площади технической реализации системы диагностирования при использовании взамен классического кода Бергера *RS*(*m*,*k*)-кода с различными способами подсчета α. Для большинства вариантов построения кода достигается эффект не только касающийся уменьшения количества необнаруживаемых на выходах схемы ошибок, но и площади, занимаемой устройством на кристалле.

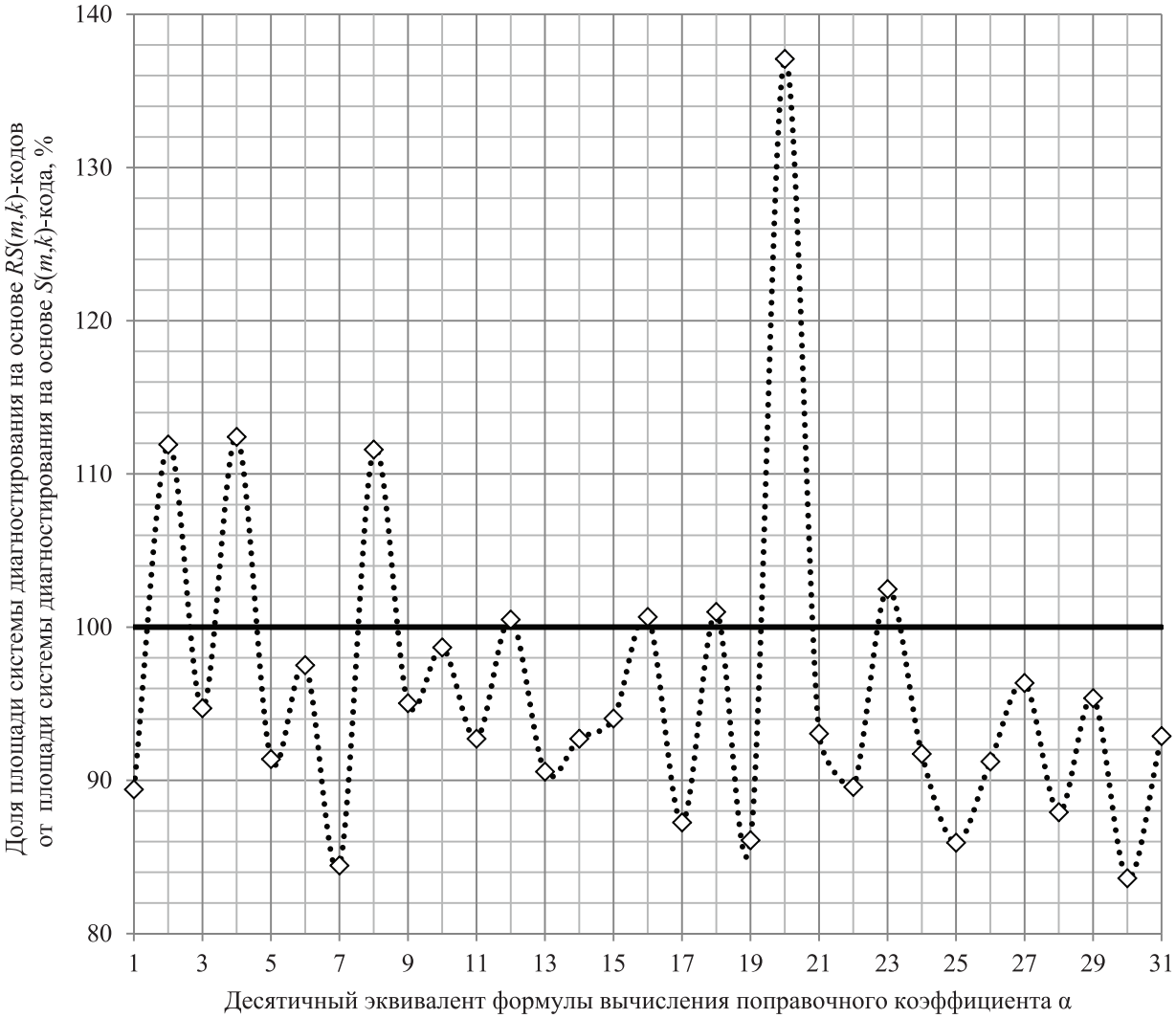


Рис. 6. Значение показателя уменьшения площади технической реализации системы диагностирования при использовании при ее построении *RS*(*m*,*k*)-кода по сравнению с применением кода Бергера

5 Алгоритм выбора модуля и правил вычисления поправочного коэффициента при организации систем диагностирования логических схем

С учетом особенностей обнаружения ошибок *RS*(*m*,*k*)-кодами в системах диагностирования реальных логических устройств может быть сформирован алгоритм выбора способа подсчета поправочного коэффициента α для построения системы диагностирования с максимальным обнаружением ошибок на выходах объекта диагностирования (ОД) при минимальных аппаратурных затратах (рис. 7).

Фактически алгоритм состоит из такой последовательности действий.

1. Фиксируется десятичный эквивалент формулы поправочного коэффициента $i = 1$.

2. Для заданного способа построения *RS*(*m*,*k*)-кода находится распределение необнаруживаемых на выходах схемы ошибок при внесении в ее структуру последовательно всех одиночных неисправностей и подаче на входы всех возможных значений.

3. Вычисляется $i = i + 1$.

4. Если $i < m$, то осуществляется переход к п. 1 алгоритма, иначе – к п. 5.

5. Выбирается способ реализации схемы: а) с некоторой вероятностью возникновения необнаруживаемой ошибки (без модификации топологии объекта диагностирования); б) со 100 %-м обнаружением ошибок (с преобразованием топологии объекта диагностирования в объект с топологией, допускающей на выходе любые монотонные ошибки кратностью $d < 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil}$). Если а), то переход к п. 6, если б), то переход к п. 9.

6. Поскольку возникновение ошибки любой кратностью связано только с топологией объекта диагностирования вне зависимости от кратности ошибок на выходах, выбираются такие способы вычисления α, которые приводят к минимальному общему количеству необнаруживаемых искажений.

7. Определяются площади технической реализации структур контрольных схем, соответствующих каждому коду, удовлетворяющему п. 6 данного алгоритма.

8. Выбирается такой *RS*(*m*,*k*)-код, который дает минимальную общую площадь схемы контроля.

9. Анализируются распределения необнаруживаемых на выходах схемы ошибок, ищется то распределение, которое имеет максимальное смещение монотонных ошибок в сторону ошибок максимальной кратностью.

10. Фиксируются способы вычисления поправочного коэффициента для кодов, удовлетворяющих п. 9.

11. Путем резервирования внутренних элементов выполняется преобразование топологии объекта диагностирования в объект с топологией,

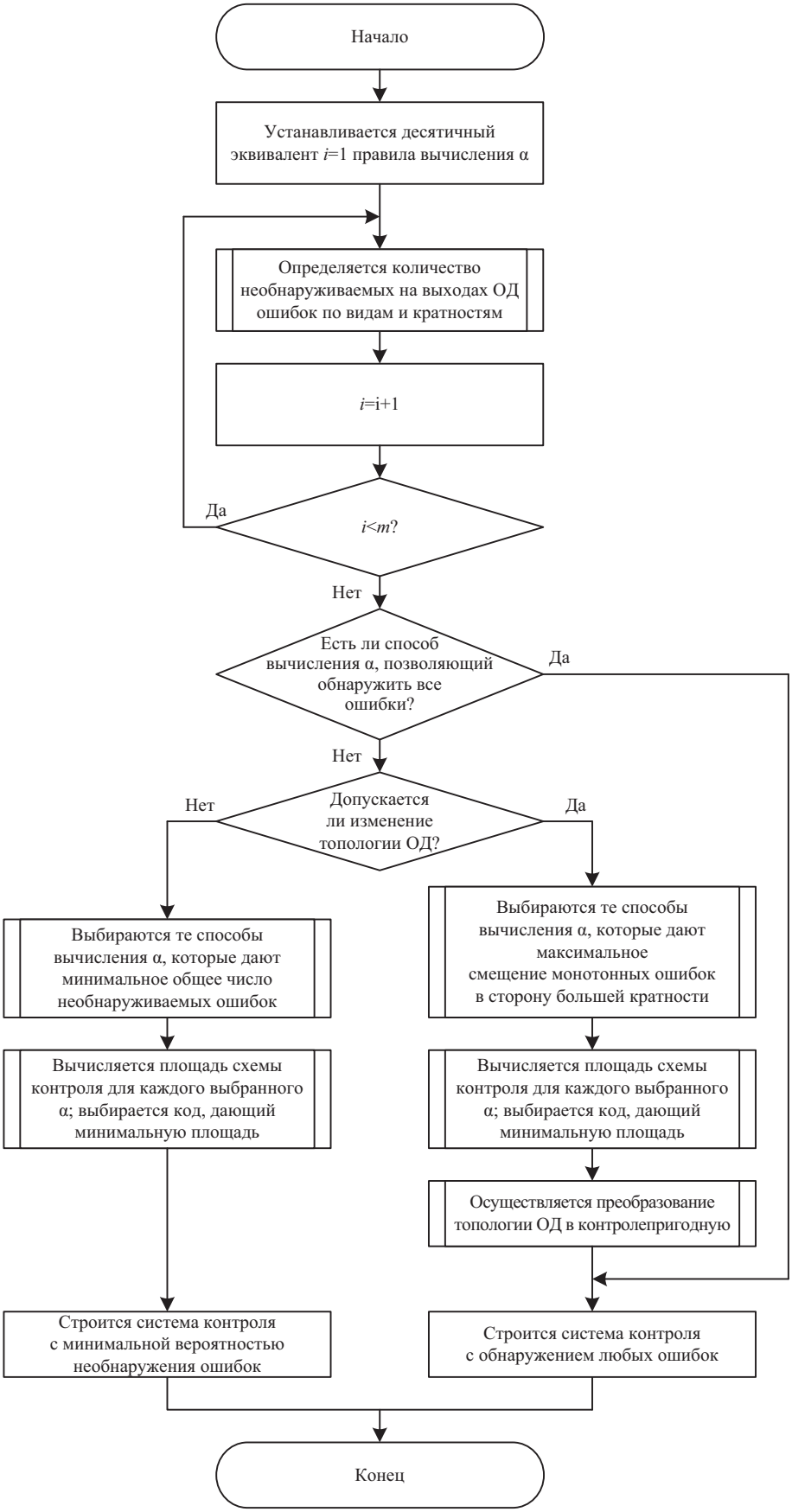


Рис. 7. Алгоритм выбора $RS(m,k)$-кода при организации системы диагностирования

допускающей на выходе любые монотонные ошибки кратностью $d < 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil}$ (или же используется известный алгоритм преобразования схем в схемы, выходы которых образуют группу монотонно независимых выходов [20]).

12. Определяются площади технической реализации структур контрольных схем, соответствующих каждому коду, удовлетворяющему п. 11 данного алгоритма.

13. Выбирается такой *RS*(*m*,*k*)-код, который дает минимальную общую площадь схемы контроля.

Использование данного алгоритма позволяет упростить процедуру анализа топологии объекта диагностирования при выборе для его контроля модифицированного кода с суммированием с учетом минимизации вероятности возникновения необнаруживаемого искажения на его выходах в процессе функционирования. При преобразовании топологии объекта диагностирования в контролепригодную топологию обнаруживаются любые искажения. За счет использования свойства *RS*(*m*,*k*)-кода обнаруживать любые монотонные ошибки кратностями $d < 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil}$ можно добиться уменьшения площади технической реализации системы функционального контроля по сравнению с известными методами, применяемыми для преобразования схем в схемы с монотонно-независимыми выходами [20]. В случае учета свойств *RS*(*m*,*k*)-кода уменьшается количество элементов в объекте диагностирования, которые необходимо резервировать. В каждом конкретном случае, однако, такое преобразование потребует дополнительного анализа.

При организации системы диагностирования с целью уменьшения аппаратурных затрат взамен *RS*(*m*,*k*)-кодов могут быть использованы *RSM*(*m*,*k*)-коды с уменьшенными значениями модуля. Однако *RSM*(*m*,*k*)-коды, имеющие меньшее, чем *RS*(*m*,*k*)-коды, количество разрядов в контрольных векторах, естественно, имеют и худшую обнаруживающую способность. Например, ими не обнаруживаются некоторые монотонные ошибки кратностями $d = jM$, $j = 1,2,...,q,\ q \le \left\lfloor \frac{m}{M} \right\rfloor$ и асимметричные ошибки кратностями $d = M + 2j$, $j = 1,2,...,q,\ q \le \left\lfloor \frac{m-M}{2} \right\rfloor$ [31]. Таким образом, наибольшую эффективность *RSM*(*m*,*k*)-коды будут иметь при построении систем функционального контроля схем с большим количеством выходов – $m \ge 8$. Например, для схемы с $m = 8$ выходами, на выходах которой не допускаются монотонные искажения кратностью $d \ge 4$, при организации системы диагностирования вместо *RS*(8,4)-кода эффективнее применить *RS*4(8,3)-код, что даст уменьшение структурной избыточности системы.

Выбор *RSM*(*m*,*k*)-кода может вестись по алгоритму, представленному на рис. 8. Данный алгоритм, так же как и алгоритм, приведенный на рис. 7,

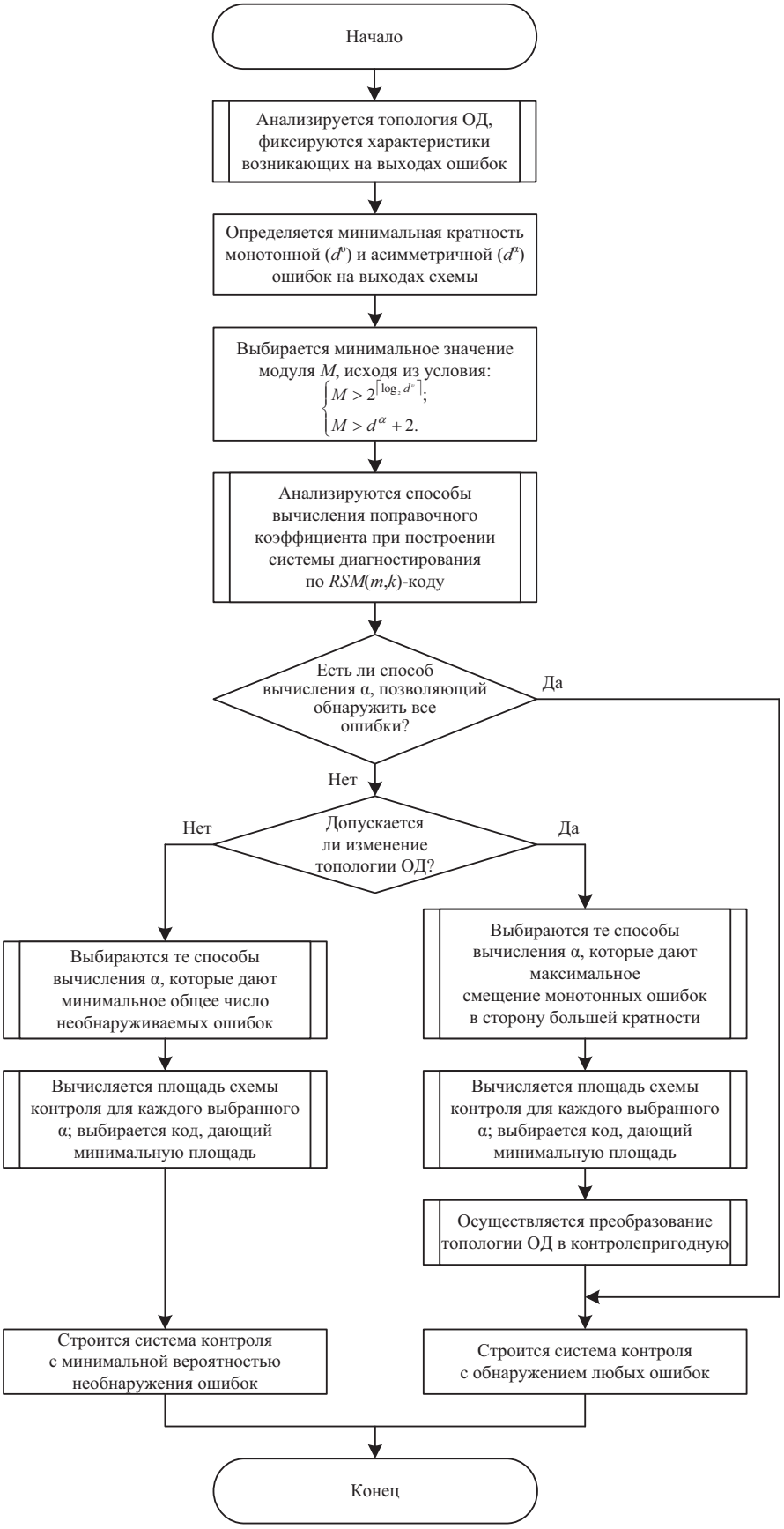


Рис. 8. Алгоритм выбора $RSM(m,k)$-кода при организации системы диагностирования

основан на анализе топологии объекта диагностирования и позволяет обоснованно выбрать код с суммированием исходя из наилучшего соотношения «обнаруживающая способность – структурная избыточность».

Заключение

Для реальных логических устройств выбор правил вычисления поправочного коэффициента α при построении *RS*(*m*,*k*)-кода имеет принципиальное значение: даже при одинаковом количестве разрядов информационного вектора в сумме поправочного коэффициента могут быть получены различные распределения необнаруживаемых кодом ошибок. При этом за счет лучших характеристик обнаружения симметричных ошибок *RS*(*m*,*k*)-кодами по сравнению с классическими кодами Бергера во многих случаях удается уменьшить общее количество необнаруживаемых кодом ошибок. Для частных случаев топологии логических устройств может быть достигнуто и 100 %-е обнаружение ошибок на выходах при контроле их на основе *RS*(*m*,*k*)-кодов.

При улучшенных показателях обнаружения ошибок на выходах реальных логических устройств также удается уменьшить площадь реализации системы диагностирования. Разработанный авторами алгоритм позволяет синтезировать систему диагностирования для заданного логического устройства с учетом как минимальной вероятности необнаружения ошибок на ее выходах, так и 100 %-го обнаружения любых проявлений одиночных константных неисправностей на выходах элементов внутренней структуры объекта диагностирования.

Представленные результаты позволяют расширить теорию функционального контроля логических устройств на основе помехоустойчивых кодов с суммированием и предложить разработчику систем диагностирования более широкий спектр кодов с простыми правилами построения.

Библиографический список

1. Согомонян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян, Е. В. Слабаков. – М. : Радио и связь, 1989. – 208 с.
2. Pradhan D. K. Fault-Tolerant Computer System Design / D. K. Pradhan. – N. Y. : Prentice Hall, 1996. – 560 p.
3. Гессель М. Построение кодоразделительных самопаритетных комбинационных схем для самотестирования и функционального диагностирования / М. Гессель, Е. С. Согомонян // Автоматика и телемеханика. – 1996. – № 11. – С. 155–165.
4. Ubar R. Design and test technology for dependable systems-on-chip (premier reference Source) / R. Ubar, J. Raik, H.-T. Vierhaus. – Information science reference, Hershey – New York, IGI Global, 2011. – 578 p.

5. Аксенова Г. П. Локализация неисправного многовыходного блока в дискретном устройстве / Г. П. Аксенова // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 2. – С. 141–149.
6. Аксенова Г. П. Повышение разрешающей способности матричного метода локализации неисправностей / Г. П. Аксенова // Автоматика и телемеханика. – 2016. – № 8. – С. 159–166.
7. Останин С. А. Синтез отказоустойчивых последовательностных схем для неисправностей задержек путей / С. А. Останин, А. Ю. Матросова, И. Е. Кириенко, Е. А. Николаева // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – Т. 59. – № 8–2. – С. 76–78.
8. Kumar B. A Technique for low power, stuck-at fault diagnosable and reconfigurable scan architecture / B. Kumar, B. Nehru, B. Pandey, V. Singh, J. Tudu // Proceedings of 14th IEEE East-West design & Test symposium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016. – Pp. 517–520.
9. Ostanin S. A Fault-tolerant sequential circuit design for soft errors based on fault-secure circuit / S. Ostanin, A. Matrosova, N. Butorina, V. Lavrov // Proceedings of 14th IEEE East-West design & Test symposium (EWDTS`2016), Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016. – Pp. 607–610.
10. Matrosova A. A Fault-tolerant sequential circuit design for SAFs and PDFs soft errors / A. Matrosova, S. Ostanin, I. Kirienko, E. Nikolaeva // 2016 IEEE 22nd International symposium on on-line testing and robust system design (IOLTS), 4–6 July 2016. – Pp. 1–2.
11. Пархоменко П. П. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомонян. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 320 с.
12. Сапожников Вал. В. Самопроверяемые дискретные устройства / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
13. Berger J. M. A Ne on Error detection codes for asymmetric channels / J. M. Berger // Information and control. – 1961. – Vol. 4. – Issue 1. – Pp. 68–73.
14. Dong H. Modified Berger codes for detection of unidirectional errors / H. Dong // IEEE transactions on computers. – Vol. C-33. – June 1984. – Pp. 572–575.
15. Parhami B. New Class of unidirectional error-detection codes / B. Parhami // Proceedings of IEEE International conference on computer design: VLSI in computers and processors, 14–16 October 1991 (ICCD'9), Cambridge, MA. – Pp. 574–577.
16. Das D. Weight-based codes and their application to concurrent error detection of multilevel circuits / D. Das, N. A. Touba // Proc. of the 17th IEEE VLSI Test symposium, USA, CA, Dana Point, April 25–29, 1999. – Pp. 370–376.
17. Мехов В. Б. Контроль комбинационных схем на основе модифицированных кодов с суммированием / В. Б. Мехов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2008. – № 8. – С. 153–165.
18. Ефанов Д. В. О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля / Д. В. Ефанов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 6. – С. 155–162.
19. Гессель М. Исследование комбинационных самопроверяемых устройств с независимыми и монотонно независимыми выходами / М. Гессель, А. А. Морозов,

Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 1997. – № 2. – С. 180–193.
20. Morosow A. Self-checking combinational circuits with unidirectionally independent outputs / A. Morosow, Val. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, M. Goessel //VLSI design. – 1998. – Vol. 5. – Issue 4. – Pp. 333–345.
21. Matrosova A.Yu. Self-checking synchronous sequential circuit design for unidirectional error / A.Yu. Matrosova, S.A. Ostanin // Proceedings of the IEEE European test workshop (ETW'98), 27–29 May 1998, Sitges, Barcelona, Spain.
22. Matrosova A.Yu. Self-checking synchronous FSM Network design with low overhead / A.Yu. Matrosova, I. Levin, S.A. Ostanin // VLSI design. – 2000. – Vol. 11. – Issue 1. – Pp. 47–58.
23. Сапожников Вал. В. Модульные коды с суммированием в системах функционального контроля. II. Уменьшение структурной избыточности систем функционального контроля / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, М. Р. Черепанова // Электронное моделирование. – 2016. – Т. 38. – № 3. – С. 47–61.
24. Блюдов А. А. Построение модифицированного кода Бергера с минимальным числом необнаруживаемых ошибок информационных разрядов / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Электронное моделирование. – 2012. – Т. 34. – № 6. – С. 17–29.
25. Блюдов А. А. Модифицированный код с суммированием для организации контроля комбинационных схем / А. А. Блюдов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2012. – № 1. – С. 169–177.
26. Blyudov A. Properties of code with summation for logical circuit test organization / A. Blyudov, D. Efanov, Val. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov // Proceedings of 10th IEEE East-West design & Test symposium (EWDTS'2012), Kharkov, Ukraine, September 14–17, 2012. – Pp. 114–117.
27. Блюдов А. А. Коды с суммированием для организации контроля комбинационных схем / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2013. – № 6. – С. 153–164.
28. Efanov D. On the problem of selection of code with summation for combinational circuit test organization / D. Efanov, Val. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov, A. Blyudov // Proceedings of 11th IEEE East-West design & Test symposium (EWDTS'2013), Rostov-on-Don, Russia, September 27–30, 2013. – Pp. 261–266.
29. Блюдов А. А. О кодах с суммированием единичных разрядов в системах функционального контроля / А. А. Блюдов, Д. В. Ефанов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 8. – С. 131–145.
30. Сапожников Вал. В. Об использовании свойств кодов с суммированием по обнаружению монотонных ошибок в системах функционального контроля комбинационных схем / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2014. – № 3. – С. 76–88.
31. Сапожников Вал. В. Применение кодов с суммированием при синтезе систем железнодорожной автоматики и телемеханики на программируемых логических интегральных схемах / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 84–107.

32. Nicolaidis M. On-line testing for VLSI – A compendium of approaches / M. Nicolaidis, Y. Zorian // Journal of electronic testing: Theory and applications. – 1998. – N 12. – Pp. 7–20.
33. Mitra S. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? / S. Mitra, E. J. McCluskey // Proceedings of International test conference, 2000, USA, Atlantic City, NJ, 3–5 October 2000. – Pp. 985–994.
34. Ефанов Д. В. Синтез генераторов тестеров модифицированных кодов Бергера на основе свойств линейных и простых симметричных функций / Д. В. Ефанов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2014. – № 4. – С. 99–109.
35. Carter W. C. Self-checking error checker for two-rail coded data / W. C. Carter, K. A. Duke, P. R. Schneider // United States Patent office, filed July 25, 1968, ser. N 747, 533, patented Jan. 26, 1971, N. Y. – 10 p.
36. Huches J. L. A. Design of totally self-checking comparators with an arbitrary number of inputs / J. L. A. Huches, E. J. McCluskey, D. J. Lu // IEEE Transactions on computers. – 1984. – Vol. C-33. – N 6. – Pp. 546–550.
37. Yang S. Logic synthesis and optimization benchmarks : User Guide : Version 3.0 / S. Yang // Microelectronics center of Nth Carolina (MCNC), 1991. – 88 p.
38. Collection of digital design benchmarks. – URL : http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks.
39. Сапожников Вал. В. Классификация ошибок в информационных векторах систематических кодов / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Известия вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58. – № 5. – С. 333–343.

Valery V. Sapozhnikov,
Vladimir V. Sapozhnikov,
Dmitry V. Efanov
«Automation and remote control on railways» department
Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university

The selection of a modified code with summation of unit data bits for logical units with a given topology

Summation codes with a small number of bits in control vectors are often applied in organizing technical diagnostics systems of logical units. A code with summation of a small number of bits in control vectors is one of the most promising codes, the building principles of which are based on the usage of a specific correction coefficient in the form of modulo two sum of preinstalled bits of a data vector and calculation of the least non-negative residue of data vector's weight modulo $M = 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}$. The study in question contributes to the research of

modified codes with summation of unit bits and deals with the influence of rules for calculation of a correction coefficient selection on such important properties as error detection at the outputs of check circuits as well as structural redundancy of diagnostics systems. The characteristics of modified codes with summation of unit data bits (modified Berger codes) were analyzed in a checking combinational circuits' experiment. It was shown that the selection of a correction coefficient calculation method in the process of building a modified Berger code is of fundamental importance and determines diagnostics systems differing in characteristics (both the complexity of technical realization and error detection at the outputs of check circuits). In order to make a valid choice of a modified code with summation of unit bits, algorithms were developed which make it possible to maximize the error detection index and minimize the diagnostics system technical realization index.

diagnostics system; Berger code; modified code with summation of unit bits; error detection at the outputs of circuits; diagnostics system area

References

1. Sogomonyan E. S., Slabakov E. V. (1989). Self-checking devices and fault-tolerant ststems [Samoproveryaemye ustrojstva i otkazoustojchivye sistemy]. Moscow, Radio and communication [Radio i svyaz']. – 208 p.
2. Pradhan D. K. (1996). Fault-tolerant computer system design. New York, Prentice Hall. – 560 p.
3. Gessel' M., Sogomonyan E. S. (1996). Code disjoint self-parity combinational circuits for self-testing, concurrent fault detection and parity scan design [Postroenie kodorazdelitel'nyh samoparitetnyh kombinacionnyh skhem dlya samotestirovaniya i funkcional'nogo diagnostirovaniya]. Automation and remote control [Avtomatika i telemekhanika], issue 11. – Pp. 155–165.
4. 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. – 578 p.
5. Aksenova G. P. (2015). Localization of faulty multi-output unit in discrete device [Lokalizaciya neispravnogo mnogovyhodnogo bloka v diskretnom ustrojstve]. Automation and remote control [Avtomatika i telemekhanika], issue 2. – Pp. 141–149.
6. Aksenova G. P. (2016). Increasing resolvability for the matrix fault localization method [Povyshenie razreshayushchej sposobnosti matrichnogo metoda lokalizacii neispravnostej]. Automation and remote control [Avtomatika i telemekhanika], issue 8. – Pp. 159–166.
7. Ostanin S. A., Matrosova A. Yu., Kirienko I. E., Nikolaeva E. A. (2016). A Fault-tolerant sequential circuit design for path delay faults [Sintez otkazoustojchivyh posledovatel'nostnyh skhem dlya neispravnostej zaderzhek putej]. News of higher educational institutions. Physics [Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika], vol. 59, issue 8–2. – Pp. 76–78.

8. Kumar B., Nehru B., Pandey B., Singh V., Tudu J. (2016). A Technique for low power, stuck-at fault diagnosable and reconfigurable scan architecture. Proceedings of 14th IEEE East-West design & Test symposium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, October 14–17. – Pp. 517–520.
9. Ostanin S., Matrosova A., Butorina N., Lavrov V. (2016). A Fault-tolerant sequential circuit design for soft errors based on fault-secure circuit. Proceedings of 14th IEEE East-West design & Test symposium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, October 14–17. – Pp. 607–610.
10. Matrosova A., Ostanin S., Kirienko I., Nikolaeva E. (2016). A Fault-tolerant sequential circuit design for SAFs and PDFs Soft errors. 2016 IEEE 22nd International symposium on on-line testing and robust system design (IOLTS), 4–6 July. – Pp. 1–2.
11. Parhomenko P. P., Sogomonyan E. S. (1981). Basics of technical diagnostics (optimization of diagnostic algorithms and equipment) [Osnovy tekhnicheskoj diagnostiki (optimizaciya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnye sredstva)]. Moscow, Energoatomizdat [Energoatomizdat]. – 320 p.
12. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (1992). Self-checking discrete devices [Samoproveryaemye diskretnye ustrojstva]. St. Petersburg, Energoatomizdat [Energoatomizdat]. – 224 p.
13. Berger J. M. (1961). A Ne on error detection codes for asymmetric channels. Information and control, vol. 4, issue 1. – Pp. 68–73.
14. Dong H. (1984). Modified Berger codes for detection of unidirectional errors. IEEE Transactions on computers. Vol. C-33, June 1984. – Pp. 572–575.
15. Parhami B. (1991). New class of unidirectional error-detection codes. Proceedings of IEEE International conference on computer design, VLSI in computers and processors, 14–16 Oct 1991 (ICCD'9), Cambridge, MA. – Pp. 574–577.
16. Das D., Touba N. A. (1999). Weight-based codes and their application to concurrent error detection of multilevel circuits. Proc. of the 17th IEEE VLSI Test symposium, USA, CA, Dana Point, April 25–29. – Pp. 370–376.
17. Mekhov V. B., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2008). Checking of combinational circuits basing on modification sum codes [Kontrol' kombinacionnyh skhem na osnove modificirovannyh kodov s summirovaniem]. Automation and remote control [Avtomatika i telemekhanika], issue 8. – Pp. 153–165.
18. Efanov D. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2010). Properties of Berger code concerning error detection in functional control circuits [O svojstvah koda s summirovaniem v skhemah funkcional'nogo kontrolya]. Automation and remote control [Avtomatika i telemekhanika], issue 6. – Pp. 155–162.
19. Gessel' M., Morozov A. A., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (1997). Investigation of combination Self-testing devices having independent and unidirectional independent outputs [Issledovanie kombinacionnyh samoproveryaemyh ustrojstv s nezavisimymi i monotonno nezavisimymi vyhodami]. Automation and remote control [Avtomatika i telemekhanika], issue 2. – Pp. 180–193.
20. Morosow A., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Goessel M. (1998). Self-checking combinational circuits with unidirectionally independent outputs.VLSI Design, vol. 5, issue 4. – Pp. 333–345.

21. Matrosova A.Yu., Ostanin S.A. (1998). Self-checking synchronous sequential circuit design for unidirectional error. Proceedings of the IEEE European test workshop (ETW'98), 27–29 May, Sitges, Barcelona, Spain.
22. Matrosova A.Yu., Levin I., Ostanin S.A. (2000). Self-checking synchronous FSM Network design with low overhead. VLSI Design, vol. 11, issue 1. – Pp. 47–58.
23. Sapozhnikov Val.V., Sapozhnikov Vl.V., Efanov D.V., Cherepanova M.R. (2016). Modulo codes with summation in concurrent error detection systems. II. Decrease of hardware redundancy of concurrent error detection systems [Modul'nye kody s summirovaniem v sistemah funkcional'nogo kontrolya. II Umen'shenie strukturnoj izbytochnosti sistem funkcional'nogo kontrolya]. Electronic modelling [Ehlektronnoe modelirovanie], vol. 38, issue 3. – Pp. 47–61.
24. Blyudov A.A., Efanov D.V., Sapozhnikov Val.V., Sapozhnikov Vl.V. (2012). Formation Berger modified code with minimum total number of undetectable errors in data bits [Postroenie modificirovannogo koda Bergera s minimal'nym chislom neobnaruzhivaemyh oshibok informacionnyh razryadov]. Electronic modelling [Ehlektronnoe modelirovanie], vol. 34, issue 6. – Pp. 17–29.
25. Blyudov A.A., Sapozhnikov Val.V., Sapozhnikov Vl.V. (2012). A Modified summation code for organizing control of combinatorial circuits [Modificirovannyj kod s summirovaniem dlya organizacii kontrolya kombinacionnyh skhem]. Automation and remote control [Avtomatika i telemekhanika], issue 1. – Pp. 169–177.
26. Blyudov A., Efanov D., Sapozhnikov Val., Sapozhnikov Vl. (2012). Properties of code with summation for logical circuit test organization. Proceedings of 10th IEEE East-West design & Test symposium (EWDTS'2012), Kharkov, Ukraine, September 14–17. – Pp. 114–117.
27. Blyudov A.A., Efanov D.V., Sapozhnikov Val.V., Sapozhnikov Vl.V. (2013). A modified summation code for organizing control of combinatorial circuits [Kody s summirovaniem dlya organizacii kontrolya kombinacionnyh skhem]. Automation and remote control [Avtomatika i telemekhanika], issue 6. – Pp. 153–164.
28. Efanov D., Sapozhnikov Val., Sapozhnikov Vl., Blyudov A. (2013). On the problem of selection of code with summation for combinational circuit test organization. Proceedings of 11th IEEE East-West design & Test symposium (EWDTS'2013), Rostov-on-Don, Russia, September 27–30. – Pp. 261–266.
29. Blyudov A.A., Efanov D.V., Sapozhnikov Val.V., Sapozhnikov Vl.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], issue 8. – Pp. 131–145.
30. Sapozhnikov Val.V., Sapozhnikov Vl.V., Efanov D.V. (2014). On the use of the properties of sum code for unidirectional error detection in concurrent error detection systems of combinational circuits [Ob ispol'zovanii svojstv kodov s summirovaniem po obnaruzheniyu monotonnyh oshibok v sistemah funkcional'nogo kontrolya kombinacionnyh skhem]. Tomsk state university, Journal of control and computer science [Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika], issue 3. – Pp. 76–88.

31. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2015). Application of sum codes for synthesis of railway automation and remote control at programmable logic integrated circuits [Primenenie kodov s summirovaniem pri sinteze sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki na programmiruemyh logicheskih integral'nyh skhemah]. Automation and remote control [Avtomatika na transporte], vol. 1, issue 1. – Pp. 84–107.
32. Nicolaidis M., Zorian Y. (1998). On-line testing for VLSI – A Compendium of approaches. Journal of electronic testing: Theory and applications, N 12. – Pp. 7–20.
33. Mitra S., McCluskey E. J. (2000). Which concurrent error detection scheme to Choose? Proceedings of International test conference, USA, Atlantic City, NJ, 3–5 October 2000. – Pp. 985–994.
34. Efanov D. V. (2014). Synthesis of modified Berger code checker generators, on the basis of using the properties of linear and simple symmetric functions [Sintez generatorov testerov modificirovannyh kodov Bergera na osnove svojstv linejnyh i prostyh simmetrichnyh funkcij]. Proceedings of Petersburg transport university [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya], issue 4. – Pp. 99–109.
35. Carter W. C., Duke K. A., Schneider P. R. (1968). Self-checking error checker for two-rail coded data. United states patent office, filed July 25, 1968, ser. N 747, 533, patented Jan. 26, 1971, N. Y. – 10 p.
36. Huches J. L. A., McCluskey E. J., Lu D. J. (1984). Design of totally self-checking comparators with an arbitrary number of inputs. IEEE transactions on computers. Vol. C-33, N 6. – Pp. 546–550.
37. Yang S. (1991). Logic synthesis and optimization benchmarks, user guide: Version 3.0. Microelectronics center of Nth Carolina (MCNC). – 88 p.
38. Collection of digital design benchmarks. URL: http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks.
39. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2015). Errors classification in data vectors of systematic codes [Klassifikaciya oshibok v informacionnyh vektorah sistematicheskih kodov]. Journal of instrument engineering [Izvestiya vuzov. Priborostroenie], vol. 58, issue 5. – Pp. 333–343.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Р. Убаром
Поступила в редакцию 20.02.2017, принята к публикации 11.05.2017

САПОЖНИКОВ Валерий Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: port.at.pgups1@gmail.com

САПОЖНИКОВ Владимир Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: sapozhnikov-at@yandex.ru

ЕФАНОВ Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: TrES-4b@yandex.ru

© Сапожников Вал. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., 2017

УДК 681.518.5:004.052.32

Д. В. Пивоваров
Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»,
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ КОМБИНАЦИОННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЛОГИЧЕСКОГО ДОПОЛНЕНИЯ ПО РАВНОВЕСНОМУ КОДУ «1 ИЗ 5»

При построении систем диагностирования логических устройств необходимо обеспечение полной самопроверяемости. В структурах функционального контроля, построенных по методу логического дополнения, данная проблема решается достаточно просто, так как один и тот же код может иметь различные реализации. Кроме того, выбирая способ реализации и последовательность выходов или способ разбиения выходов на группы, можно влиять как на сложность конечной структуры, так и на ее обнаруживающую способность.

При использовании метода логического дополнения имеет смысл использовать различные равновесные коды, так как в этом случае для полной самопроверяемости тестера достаточно обеспечить появление всех комбинаций равновесного кода. Ранее исследовались различные варианты построения схем по равновесным кодам «1 из 3» и «1 из 4». В данной статье анализируется один из вариантов построения схем на основе равновесного кода «1 из 5», а также влияние изменения последовательности выходов на сложность конечной структуры и ее обнаруживающую способность. Данный вариант дополнения до равновесного «1 из 5» кода был разработан так, чтобы в структурах, построенных по этому коду, обеспечивалась полная самопроверяемость как тестера, так и элементов «сложение по модулю два». Были проведены эксперименты на наборе контрольных примеров, имеющих 5 выходов. В ходе эксперимента анализировались характеристики структур со всеми возможными последовательностями выходов. Было показано, что последовательность выходов сильно влияет как на сложность конечной структуры, так и на ее обнаруживающую способность.

система диагностирования; логическое дополнение; равновесные коды; код «1 из 5»; функциональное диагностирование; площадь системы диагностирования

Введение

В железнодорожной автоматике широко используются системы управления технологическими процессами на микропроцессорной и микроэлектронной основе. В подобных системах применяется функциональный контроль для обнаружения ошибок, возникающих в объектах диагностирования в ходе их работы. Системы функционального контроля должны обладать рядом возможностей, таких как обнаружение всех одиночных неисправностей, обес-

печение минимально возможной избыточности конечной структуры и самопроверяемости. Самопроверяемость подразумевает проявление любой неисправности заданного класса на выходах схемы хотя бы на одной из рабочих входных комбинаций. Наиболее часто рассматривается модель константных неисправностей – stuck-at faults [1]. Самопроверяемость обеспечивает защиту структуры от неисправностей возникающих во всех блоках системы функционального контроля. Для реализации этой возможности применяют методы синтеза самопроверяемых схем контроля [2–11]. В данной статье предложен способ построения системы функционального контроля по методу логического дополнения на основе равновесного кода «1 из 5».

1 Структурные схемы систем функционального контроля комбинационных схем

На рис. 1 изображена структурная схема системы диагностирования логического устройства $F(x)$, реализующего ряд булевых функций $f_1, f_2, \ldots, f_m$. В целях контроля неисправностей объекта диагностирования по результатам вычислений функций он снабжен схемой контроля в составе блока контрольной логики $G(x)$, вычисляющего ряд контрольных функций $g_1, g_2, \ldots, g_k$, и тестера *TSC*, сравнивающего значения функций $f_1, f_2, \ldots, f_m$ и $g_1, g_2, \ldots, g_k$ [12–14].

Система функционального контроля может быть построена разными способами. Одним из них является дублирование. В системе функционального контроля, построенной данным способом, блок $G(x)$ полностью повторяет блок $F(x)$, а тестер представляет собой компаратор, сравнивающий значения $f_1, f_2, \ldots, f_m$ и $g_1, g_2, \ldots, g_k$. При несовпадении этих значений на выходе тестера появляется сигнал ошибки. Данный способ обеспечивает обнаружение всех одиночных неисправностей, однако сложность исходной схемы возрастает в 3–4 раза.

Гораздо менее сложен метод паритета. В системе функционального контроля, построенной данным способом, блок $G(x)$ вычисляет бит четности, блок генератора тестера выполняет операцию «сложение по модулю два» всех выходов блока $F(x)$, далее выходы блоков $F(x)$ и $G(x)$ сравниваются. У систем функционального контроля, построенных на основе данного способа, существует серьезный недостаток: они не обнаруживают все ошибки четной кратностью на выходах блока $F(x)$.

Описанные выше способы относятся к методу вычисления контрольных разрядов. Согласно данному методу характеристики конечной структуры зависят от изначально выбранного кода. Для каждого кода существует только одна реализация структуры, что усложняет обеспечение полной самопроверяемости.

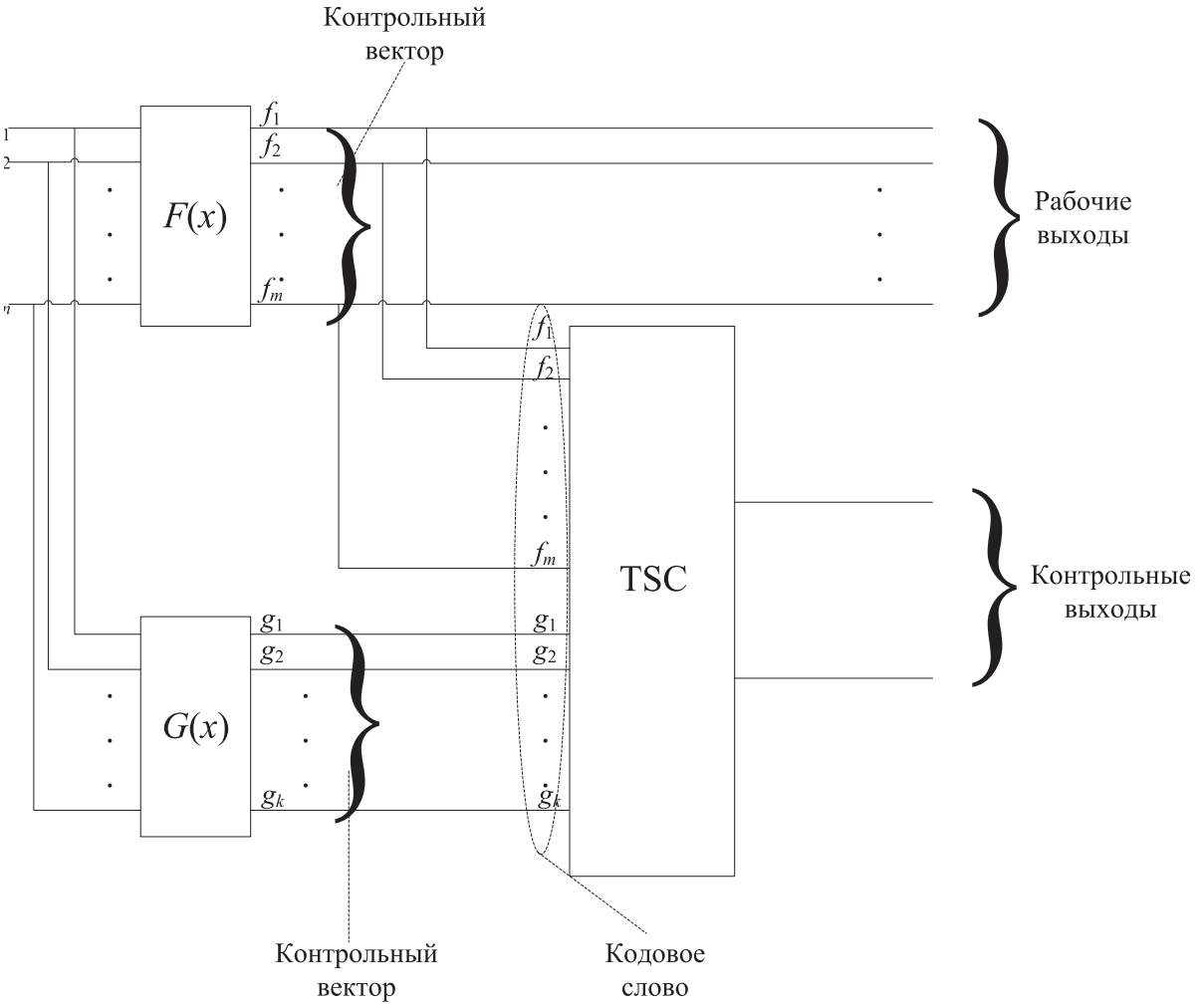


Рис. 1. Структурная схема системы диагностирования

Кроме метода вычисления контрольных разрядов, существует метод логического дополнения. В системе функционального контроля, построенной по данному методу (рис. 2), блок контрольной логики $G(x)$ вычисляет функции дополнения $g_1, g_2, \ldots, g_n$. Далее функции $f_1, f_2, \ldots, f_n$ преобразуются в набор функций $h_1, h_2, \ldots, h_n$ при помощи элементов «сложение по модулю два» и функций дополнения. Вектор $<h_n\ h_{n-1} \ldots h_2\ h_1>$ должен принадлежать заранее выбранному равновесному коду.

Согласно данному методу системы диагностирования у одного кода может существовать множество реализаций и путем выбора этих реализаций можно обеспечить полную самопроверяемость структуры системы диагностирования и влиять на ее сложность и обнаруживающую способность [4, 15]. В структурах, построенных по методу вычисления контрольных разрядов, число разрядов контролируемого кода всегда больше, чем число информационных разрядов, а в системах функционального контроля, построенных по методу логического дополнения, число разрядов контролируемого кода

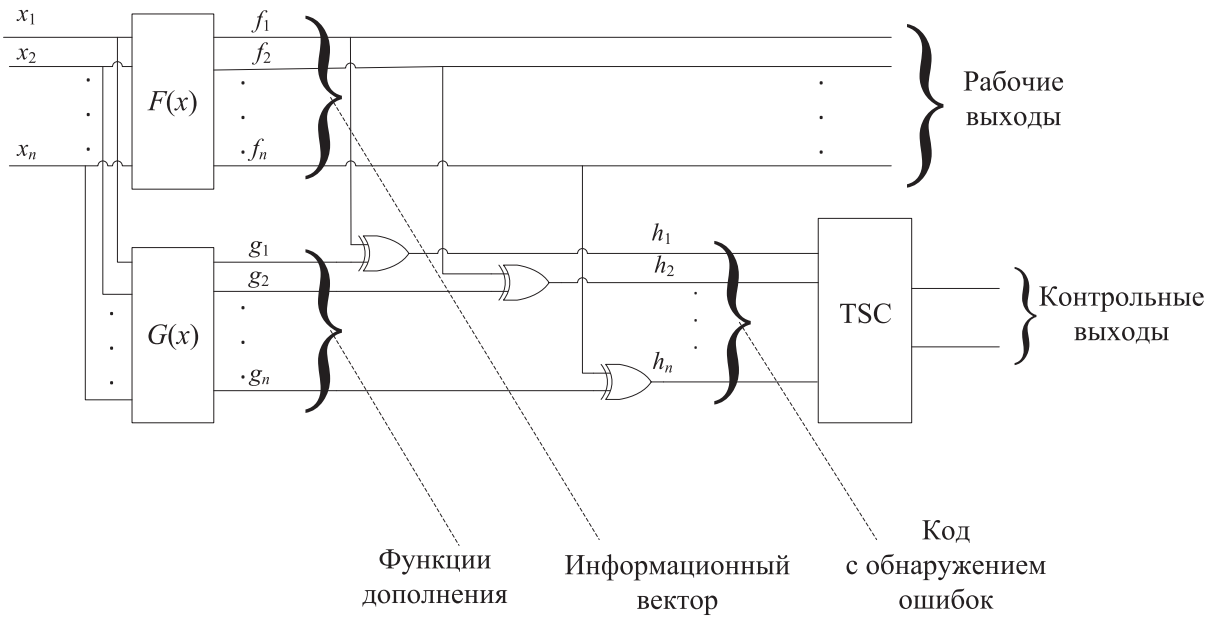


Рис. 2. Структурная схема системы функционального контроля, построенная по методу логического дополнения

равно числу информационных разрядов. Последнее существенно упрощает структуру тестера.

При реализации метода логического дополнения можно использовать различные равновесные коды. При их использовании для обеспечения самопроверяемости тестера достаточно, чтобы все слова равновесного кода появились на его входе хотя бы по одному разу. Хорошо исследованы вопросы применения равновесных кодов «1 из 3» [16–21], «1 из 4» [12, 13, 22–30] и «2 из 4» [31–34]. Рассмотрим особенности применения равновесного кода «1 из 5» при организации систем функционального контроля.

2 Особенности применения кода «1 из 5» при организации системы функционального контроля методом логического дополнения

На рис. 3 изображена система функционального контроля, построенная по методу логического дополнения на основе равновесного кода «1 из 5». В данной структуре блок $F(x)$ вычисляет пять разрядов информационного вектора, а блок $G(x)$ – пять функций дополнения. Затем каждый информационный разряд складывается по модулю два с функцией дополнения и, таким образом, информационный вектор преобразуется в вектор кода «1 из 5».

При использовании равновесного кода «1 из 5» нет необходимости вычислять все пять функций дополнения. Одну из них можно принять всегда

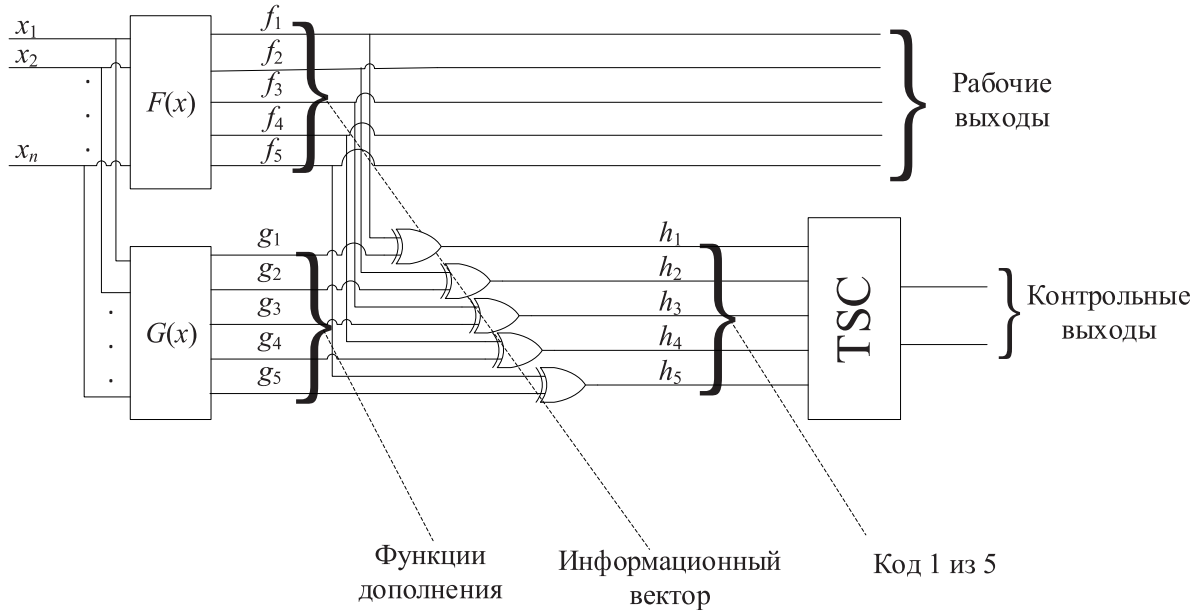


Рис. 3. Система функционального контроля, построенная по коду «1 из 5»

равной нулю. Тогда на соответствующий вход тестера можно подать соответствующий информационный разряд. Это несколько упрощает структуру (рис. 4).

В процессе работы системы диагностирования неисправности могут возникать не только в блоках $F(x)$ и $G(x)$, но и в тестере, и элементах «сложение по модулю два». Для обнаружения этих неисправностей необходимо, чтобы эти устройства обладали свойством самопроверяемости. Это свойство подраз-

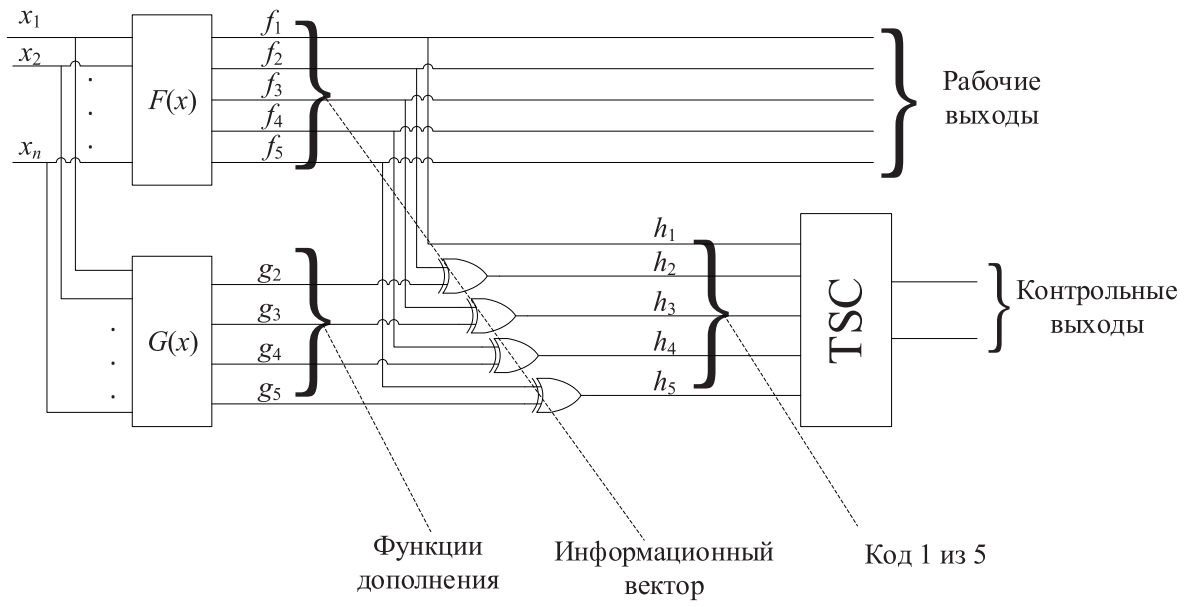


Рис. 4. Система функционального контроля, построенная по коду «1 из 5» с четырьмя функциями дополнения

умевает, что при подаче на входы тестера некодового слова или при наличии внутреннего дефекта в тестере или элементе «сложение по модулю два» на выходах формируется сигнал ошибки. Самопроверяемость тестера (рис. 5) при использовании равновесного кода «1 из 5» достигается путем подачи всех слов кода на его входы во время нормальной работы устройства [35]. Самопроверяемость элементов «сложение по модулю два» (рис. 6) достигается путем поступления всех возможных комбинаций на входы этих элементов (00, 01, 10, 11) в процессе нормального функционирования устройства [36]. Таким образом, на входах тестера и элементов «сложение по модулю два» формируется полное множество тестовых комбинаций во время нормальной работы устройства.

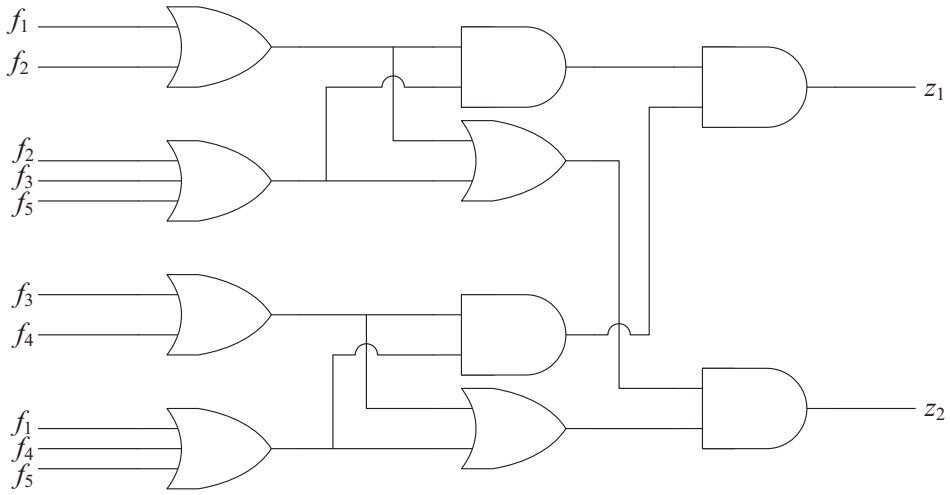


Рис. 5. Структурная схема 1/5 TSC

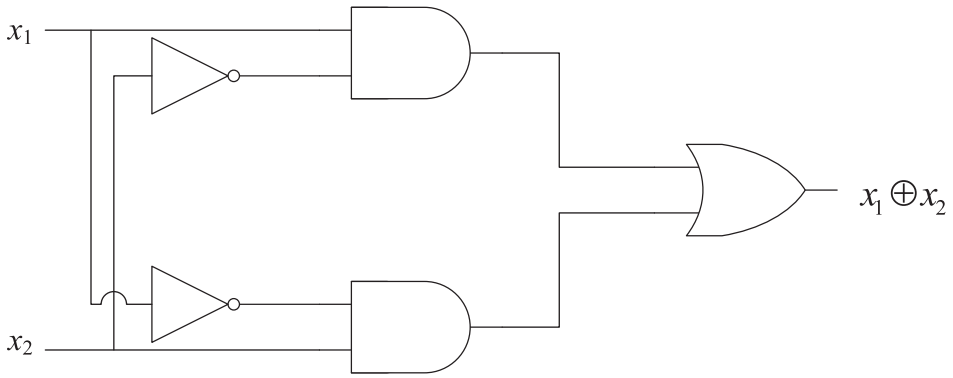


Рис. 6. Структурная схема элемента «сложение по модулю два»

3 Способ вычисления функций дополнения по равновесному коду «1 из 5»

Как было сказано выше, необходимо разработать такой способ доопределения до кода «1 из 5», чтобы при его использовании на входе тестера по-

являлись все слова кода (00000, 00001, 00010, 00100, 01000, 10000) хотя бы по одному разу. Допустим, что не требуется доопределение функции f_5. Тогда на наборах $\langle f_5 f_4 f_3 f_2 f_1\rangle = \langle 1 \sim \sim \sim \sim\rangle$ должно формироваться только одно кодовое слово 1/5-кода – 10000. На всех остальных 16 наборах $\langle f_5 f_4 f_3 f_2 f_1\rangle = \langle 0 \sim \sim \sim \sim\rangle$ должны сформироваться остальные кодовые слова 1/5-кода. При этом должно быть обеспечено появление всего множества тестовых комбинаций на входы элементов «сложение по модулю два». Тестовые комбинации 00 и 11 появляются на наборах $\langle f_5 f_4 f_3 f_2 f_1\rangle = \langle 1 \sim \sim \sim \sim\rangle$. На остальных наборах должны сформироваться комбинации 01 и 10.

Методом подбора были получены функции дополнения, обеспечивающие условия самопроверяемости (табл. 1). Правила вычисления формул логического дополнения нетрудно формализовать. Из таблицы непосредственно следуют выражения, описывающие функции логического дополнения:

$$\begin{cases} g_1 = f_4 f_1 \vee f_3 f_1 \vee f_2 f_1 \vee f_5 f_1 \vee \overline{f_5}\ \overline{f_4} f_3 \vee \overline{f_5} f_3 \overline{f_2}; \\ g_2 = f_2 f_1 \vee f_5 f_2 \vee f_4 f_2 \vee f_3 f_2 \vee \overline{f_5} f_4 \overline{f_3}\ \overline{f_2} \vee \overline{f_5} f_4 f_3 f_1 \vee \overline{f_5}\ \overline{f_3}\ \overline{f_2}\ \overline{f_1}; \\ g_3 = \overline{f_4} f_3 \overline{f_1} \vee f_4 f_3 f_1 \vee f_5 f_3 \vee f_3 \overline{f_2} \vee \overline{f_5}\ f_4 \overline{f_3} f_2; \\ g_4 = f_4 \overline{f_1} \vee f_5 f_4 \vee f_4 \overline{f_3} f_2 \vee \overline{f_5} f_3 \overline{f_2} f_1 \vee \overline{f_5}\ \overline{f_3} f_2 f_1. \end{cases} \quad (1)$$

Как видно из таблицы, каждая комбинация кода «1 из 5» появляется как минимум 4 раза. Это упрощает обеспечение свойства самопроверяемости, поскольку в реальных схемах на выходах не всегда появляются все возможные комбинации нулей и единиц. Из таблицы также видно, что на входах всех элементов «сложение по модулю два» все комбинации проверяющего теста появляются хотя бы по одному разу.

4 Результаты экспериментов

Для оценки характеристик систем функционального контроля, построенных при использовании описанного подхода были проведены эксперименты с набором контрольных примеров с пятью выходами MCNC Benchmark [37–39]. В табл. 2 приведены характеристики использованных в эксперименте схем.

В ходе эксперимента оценивались показатели структурной избыточности систем функционального контроля для выбранных тестовых комбинационных схем в объекте диагностирования. Для проведения подобных экспериментов было разработано специальное программное обеспечение, позволяющее по-

Таблица 1. Правила преобразования рабочих функций

Десятичный эквивалент информационного вектора	Информационный вектор	Функции дополнения	Кодовое слово 1/5-кода
	$f_5 f_4 f_3 f_2 f_1$	$g_5 g_4 g_3 g_2 g_1$	$h_5 h_4 h_3 h_2 h_1$
n_0	00000	00010	00010
n_1	00001	00000	00001
n_2	00010	00000	00010
n_3	00011	01011	01000
n_4	00100	00101	00001
n_5	00101	01101	01000
n_6	00110	00111	00001
n_7	00111	00011	00100
n_8	01000	01010	00010
n_9	01001	00001	01000
n_{10}	01010	01110	00100
n_{11}	01011	01111	00100
n_{12}	01100	01101	00001
n_{13}	01101	01111	00010
n_{14}	01110	01010	00100
n_{15}	01111	00111	01000
n_{16}	10000	00000	10000
n_{17}	10001	00001	10000
n_{18}	10010	00010	10000
n_{19}	10011	00011	10000
n_{20}	10100	00100	10000
n_{21}	10101	00101	10000
n_{22}	10110	00110	10000
n_{23}	10111	00111	10000
n_{24}	11000	01000	10000
n_{25}	11001	01001	10000
n_{26}	11010	01010	10000
n_{27}	11011	01011	10000
n_{28}	11100	01100	10000
n_{29}	11101	01101	10000
n_{30}	11110	01110	10000
n_{31}	11111	01111	10000

Таблица 2. Характеристики выбранных контрольных комбинационных схем

Название схемы	Количество входов	Количество выходов	Площадь в условных единицах stdcell2_2.genlib
clpl	11	5	640
dist	8	5	6968
root	8	5	3496

лучить для заданных в формате *.pla контрольных схем описание всех блоков системы функционального контроля в том же формате. После того как был получен файл-описание каждого блока, с помощью интерпретатора SIS и библиотеки функциональных элементов stdcell2_2.genlib определялась площадь, занимаемая системой на кристалле, в условных единицах библиотеки. Далее описанный в данной статье способ сравнивался со способом, описанным в [40], в котором блок $G(x)$ строится по следующим формулам:

$$\begin{cases} g_1 = 0; \\ g_2 = f_1 f_2; \\ g_3 = (f_1 \vee f_2) f_3; \\ g_4 = (f_1 \vee f_2 \vee f_3) f_4; \\ g_5 = (f_1 \vee f_2 \vee f_3 \vee f_4) f_5 \vee \overline{f_1}\,\overline{f_2}\,\overline{f_3}\,\overline{f_4}\,\overline{f_5}. \end{cases} \quad (2)$$

Таблица 3. Результаты экспериментов со схемами из набора MCNC Benchmarks

Название схемы	Площади элементов системы диагностирования				Площадь системы диагностирования	Площадь системы дублирования	Площадь системы контроля по формулам (2)	Показатели структурной избыточности, %	
	$F(x)$	$G(x)$	Блок дополнения	1/5-TSC				δ	β
clpl	640	1661	160	336	2301	2128	2048	108	27,81
dist	6968	6246	160	336	13 214	14 784	11 920	89,38	52,73
root	3496	2399	160	336	5895	7840	5544	75,19	59,3

Результаты эксперимента занесены в табл. 3.

Как видно из таблицы, системы функционального контроля, построенные по предложенному автором методу, занимают большую площадь, чем системы, построенные на основе формул (2). Однако в системах функцио-

нального контроля, построенных на основе формул (2), не обеспечивается самопроверяемость всех элементов «сложение по модулю два».

5 Контроль многовыходных схем на основе равновесного кода «1 из 5»

С помощью предложенного в данной статье метода можно строить системы функционального контроля и для схем с количеством выходов больше пяти. В подобном случае выходы исходной схемы делятся на группы и контроль происходит по группам выходов. При этом одни и те же выходы могут находиться в нескольких группах. Можно комбинировать также равновесный код «1 из 5» с другими равновесными кодами. На рис. 7 представлен пример построения системы функционального контроля по методу логического дополнения с использованием равновесных кодов «1 из 5» и «1 из 3» для контроля схемы с двенадцатью выходами. На данном примере выходы блока $F(x)$ поделены на группы ($f_1, f_2, f_3, f_4, f_5; f_6, f_7, f_8, f_9, f_1; f_{10}, f_{11}, f_{12}$). На выходах блоков $G_1(x)$ и $G_2(x)$ формируются функции дополнения для кодов «1 из 5» для первых двух групп выходов. На выходах блока $G_3(x)$ формируются функции дополнения для кода «1 из 3» для последней группы выходов. Далее кодовые векторы поступают на соответствующие тестеры равновесных кодов. Тестеры равновесных кодов объединяются при помощи модулей сжатия парафазных сигналов TRC.

Заключение

Предложенный в данной статье способ построения системы функционального контроля по методу логического дополнения на основе равновесного кода «1 из 5» позволяет в ряде случаев построить структуры, занимающие меньшую площадь, чем структуры дублирования, но большую, чем структуры на основе метода, описанного в [40]. Однако, в отличие от метода, описанного в [40], данный метод обеспечивает свойство самопроверяемости не только тестера, но и элементов «сложение по модулю два». Кроме того, предложенный способ позволяет равномерно формировать кодовые векторы кода «1 из 5», что важно и дает меньше входных слов для проверки. Был показан способ построения системы функционального контроля для схем с количеством выходов более 5. Перспективным направлением работы может быть более подробное исследование применения данного кода для контроля многовыходных схем.

Применение предложенного метода дополнения до кода «1 из 5» может быть использовано при реализации устройств автоматики на элементах программируемой логики типа FPGA.

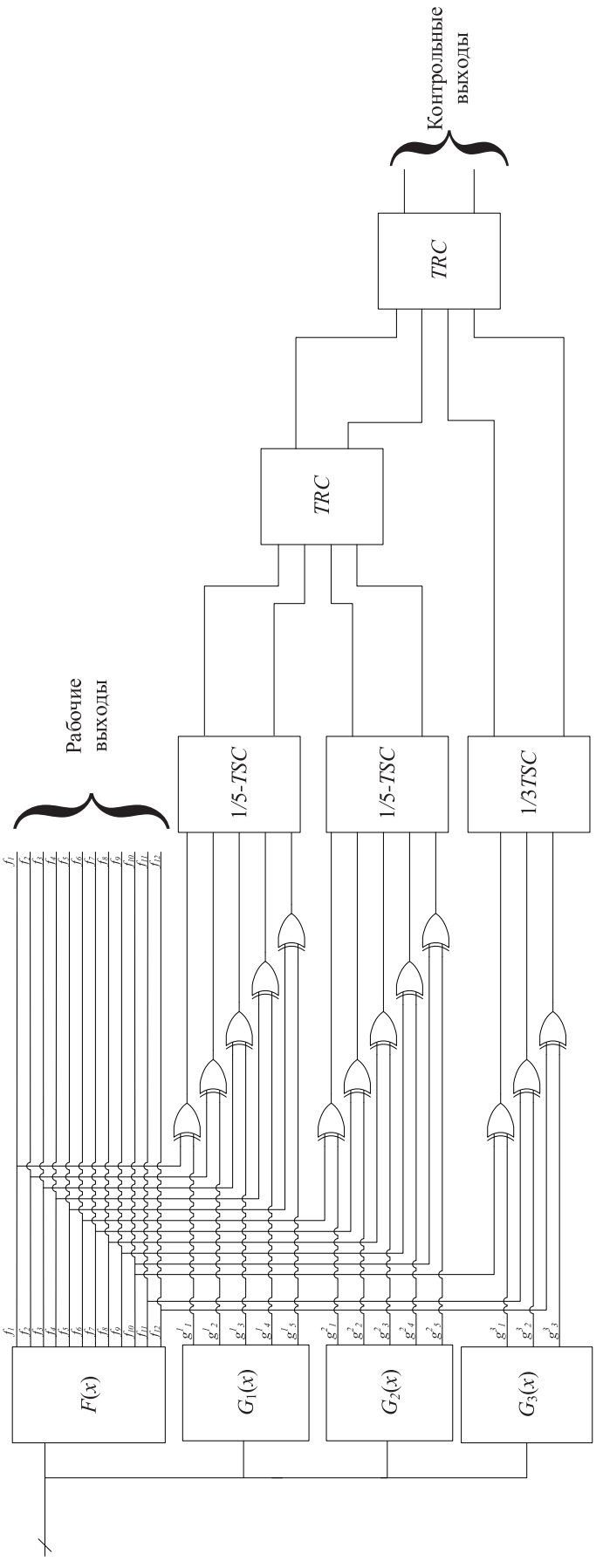


Рис. 7. Построение системы функционального контроля по методу логического дополнения с использованием равновесных кодов «1 из 5» и «1 из 3» для контроля схемы с двенадцатью выходами

Библиографический список

1. Matrosova A.Yu. Self-checking synchronous sequential circuit design for unidirectional error / A.Yu. Matrosova, S.A. Ostanin // Proceedings of the IEEE European test workshop (ETW'98), 27–29 May 1998, Sitges, Barcelona, Spain.
2. Согомонян Е.С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е.С. Согомонян, Е.В. Слабаков. – М. : Радио и связь, 1989. – 208 с.
3. Сапожников Вал.В. Самопроверяемые дискретные устройства / Вал.В. Сапожников, Вл.В. Сапожников. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
4. Пархоменко П.П. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства) / П.П. Пархоменко, Е.С. Согомонян. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 320 с.
5. Matrosova A. A Fault-tolerant sequential circuit design for SAFs and PDFs soft errors / A. Matrosova, S. Ostanin, I. Kirienko, E. Nikolaeva // 2016 IEEE 22nd International symposium on on-line testing and robust system design (IOLTS), 4–6 July 2016. – Pp. 1–2.
6. Busaba F.Y. Self-checking combinational circuit design for single and unidirectional multibit errors / F.Y. Busaba, P.K. Lala // Journal of electronic testing : Theory and applications. – 1994. – Vol. 5. – Issue 5. – Pp. 19–28.
7. Das D. Synthesis of circuits with low-cost concurrent error detection based on bose-lin codes / D. Das, N.A. Touba // Journal of electronic testing : Theory and applications. – 1999. – Vol. 15. – Issue 1–2. – Pp. 145–155.
8. Das D. Low cost concurrent error detection based on modulo weight-based codes / D. Das, N. A. Touba, M. Seuring, M. Gossel // Proceedings of the 6th IEEE International on-line testing workshop (IOLTW), Spain, Palma de Mallorca, July 3–5, 2000. – Pp. 171–176.
9. Nicolaidis M. On-line testing for VLSI – A Compendium of approaches / M. Nicolaidis, Y. Zorian // Journal of electronic testing : Theory and application. – 1998. – Vol. 12. – Issue 1–2. – Pp. 7–20.
10. Mitra S. Which concurrent error detection scheme to choose? / S. Mitra, E.J. McCluskey // Proceedings of International test conference, 2000, USA, Atlantic City, NJ, 3–5 October 2000. – Pp. 985–994.
11. Мехов В.Б. Контроль комбинационных схем на основе модифицированных кодов с суммированием / В.Б. Мехов, Вал.В. Сапожников, Вл.В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2008. – № 8. – С. 153–165.
12. Пивоваров Д.В. Особенности организации полностью самопроверяемых структур на основе равновесного кода «1 из 4» / Д.В. Пивоваров // Материалы юбилейной XV Санкт-Петербургской Международной конференции «Региональная информатика – 2016», Санкт-Петербург, 26–28 октября 2016 г. – СПб. : СПОИСУ, 2016. – С. 307–308.
13. Сапожников Вал.В. Метод логического дополнения на основе равновесного кода «1 из 4» для построения полностью самопроверяемых структур систем функционального контроля / Вал.В. Сапожников, Вл.В. Сапожников, Д.В. Ефанов, Д.В. Пивоваров // Электронное моделирование. – 2017. – Т. 39. – № 2. – С. 15–34.

14. Ефанов Д. В. О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля / Д. В. Ефанов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 6. – С. 155–162.
15. Сапожников Вал. В. Самодвойственные дискретные устройства / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, М. Гессель. – СПб. : Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отд-ние, 2001. – 331 с.
16. Saposhnikov Val. V. Concurrent checking by Use of complementary circuits for «1-out-of-3» Codes / Val. V. Saposhnikov, A. Morozov, Vl. V. Saposhnikov, M. Goessel // 5th International workshop IEEE DDECS 2002, Brno, Czech Republic, April 17–19, 2002.
17. Гессель М. Логическое дополнение – новый метод контроля комбинационных схем / М. Гессель, А. В. Морозов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 1. – С. 167–176.
18. Сапожников Вал. В. О синтезе полностью самопроверяемых комбинационных схем / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2006. – № 1. – С. 97–110.
19. Das D. K. Constraint don't cares for optimizing designs for concurrent checking by 1-out-of-3 codes / D. K. Das, S. S. Roy, A. Dmitiriev, A. Morozov, M. Gössel // Proceedings of the 10th International workshops on boolean problems, Freiberg, Germany, September, 2012. – Pp. 33–40.
20. Efanov D. Methods of organization of totally self-checking concurrent error detection system on the basis of constant-weight «1-out-of-3»-code / D. Efanov, Val. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov // Proceedings of 14th IEEE East-West design & Test symposium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016. – Pp. 117–125.
21. Сапожников Вал. В. Построение полностью самопроверяемых структур систем функционального контроля с использованием равновесного кода «1 из 3» / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Электронное моделирование. – 2016. – Т. 38. – № 6. – С. 25–43.
22. Сапожников Вал. В. Организация функционального контроля комбинационных схем методом логического дополнения / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, А. В. Дмитриев, А. В. Морозов, М. Гессель // Электронное моделирование. – 2002. – Т. 24. – № 6. – С. 51–66.
23. Сапожников Вал. В. Контроль комбинационных схем методом логического дополнения / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Г. В. Осадчий // Конструирование, сертификация и техническая эксплуатация устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. – СПб. : Петербурсгкий гос. ун-т путей сообщения, 2003. – С. 3–8.
24. Осадчий Г. В. Разработка метода логического дополнения для диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики / Г. В. Осадчий // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2004. – № 1. – С. 84–89.
25. Осадчий Г. В. Повышение эффективности использования метода логического дополнения для контроля комбинационных схем / Г. В. Осадчий // Разработка и эксплуатация новых устройств и систем железнодорожной автоматики и теле-

механики : сб. науч. тр. – СПб. : Петербурсгкий гос. ун-т путей сообщения, 2004. – С. 32–35.
26. Saposhnikov Val. V. Design of totally self-checking combinational circuits by Use of complementary circuits / Val. V. Saposhnikov, Vl. V. Saposhnikov, A. Morozov, G. Osadtchi, M. Gossel // Proceedings of East-West design & Test workshop, Yalta, Ukraine, 2004. – Pp. 83–87.
27. Гессель М. Контроль комбинационных схем методом логического дополнения / М. Гессель, А. В. Морозов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 8. – С. 161–172.
28. Göessel M. New methods of concurrent checking : Edition 1 / M. Göessel, V. Ocheretny, E. Sogomonyan, D. Marienfeld. – Dordrecht : Springer science+business media B. V., 2008. – 184 p.
29. Sen S. K. A Self-checking circuit for concurrent checking by 1-out-of-4 code with design optimization using constraint don't cares / S. K. Sen // National conference on emerging trends and advances in electrical engineering and renewable energy (NCEEERE'2010), Sikkim manipal institute of technology, Sikkim, held during, 22–24 December, 2010.
30. Пивоваров Д. В. Один способ построения полностью самопроверяемых структур систем функционального контроля на основе равновесного кода «1 из 4» / Д. В. Пивоваров // Информационные технологии на транспорте : сб. материалов секции «Информационные технологии на транспорте» юбилейной XV Санкт-Петербургской Международной конференции «Региональная информатика – 2016», Санкт-Петербург, 26–28 октября 2016 г. ; под. ред. Вал. В. Сапожникова. – СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. – С. 17–27.
31. Ефанов Д. В. Применение равновесного кода «2 из 4» при организации систем функционального контроля / Д. В. Ефанов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2016. – № 2. – С. 269–278.
32. Сапожников Вал. В. Метод функционального контроля комбинационных логических устройств на основе кода «2 из 4» / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Известия вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59. – № 7. – С. 524–533.
33. Sapozhnikov Val. Concurrent error detection of combinational circuits by the method of boolean complement on the base of «2-out-of-4» code / Val. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov, D. Efanov // Proceedings of 14th IEEE East-West design & Test symposium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016. – Pp. 126–133.
34. Сапожников Вал. В. Построение самопроверяемых структур систем функционального контроля на основе равновесного кода «2 из 4» / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Проблемы управления. – 2017. – № 1. – С. 57–64.
35. Сапожников Вал. В. Организация систем функционального контроля с обеспечением полной самопроверяемости структуры на основе модулей сжатия парафазных сигналов / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Известия вузов. Приборостроение. – 2017. – Т. 60. – № 5. – С. 404–411.
36. Аксёнова Г. П. Необходимые и достаточные условия построения полностью проверяемых схем свертки по модулю два / Г. П. Аксёнова // Автоматика и телемеханика. – 1979. – № 9. – С. 126–135.

37. Collection of digital design benchmarks. – URL : http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks.
38. Yang S. Logic synthesis and optimization benchmarks : User Guide : Version 3.0 / S. Yang. – Microelectronics center of Nth Carolina (MCNC), 1991. – 88 p.
39. SIS : A system for sequential circuit synthesis / E. M. Sentovich, K. J. Singh, L. Lavagno, C. Moon, R. Murgai, A. Saldanha, H. Savoj, P. R. Stephan, R. K. Brayton, A. Sangiovanni-Vincentelli // Electronics research laboratory, Department of electrical engineering and computer science, University of California, Berkeley, 4 May 1992. – 45 p.
40. Сапожников Вал. В. Способ построения системы функционального контроля на основе логического дополнения по равновесному коду «1 из 5» / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, Д. В. Пивоваров // Радиоэлектроника и информатика. – 2017. – № 3. – С. 28–35.

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

Organization of concurrent error-detection systems of combinational logical circuits on the basis of Boolean complement method with «1-out-of-5» constant-weight code

In the process of building diagnostics systems of logical units, the issue of providing full self-checking ability is particularly sensitive. In the structures of functional control, built by means of Boolean component method, the issue in question is solved fairly easily, as one and the same code may have different realizations. Also in the process of choosing the method of output realization and sequence, as well as the method of clustering outputs, one can influence both the finite structure's complexity and its detectivity.

In the process of Boolean complement method application it is convenient to use different constant-weight codes, as, in order to provide complete self-checking ability of a tester, it is sufficient to provide the appearance of all constant-weight code combinations, when using such codes. There are studies dealing with the investigation of different variants of building «1-out-of-3» and «1-out-of-4» constant-weight codes. One of the variants of building a «1-out-of-5» constant-weight code, as well as the influence of output sequence alteration on the finite structure's complexity and its detectivity, was analyzed in the given article. The introduced variant of a «1-out-of-5» constant-weight code was developed in such a way as to provide full self-checking ability of both the tester and «modulo two addition» elements in the structures built by this code. The experiments were conducted on

a number of benchmarks, having five outputs. Structures' characteristics with all possible output sequences were analyzed in the experiment. It was shown that the sequence of outputs markedly affects both the finite structure's complexity and its self-checking ability.

diagnostics system; Boolean complement; constant-weight codes; «1-out-of-5» code; on-line diagnosis; diagnostics system's area

References

1. Matrosova A.Yu., Ostanin S.A. (1998). Self-checking synchronous sequential circuit design for unidirectional error. Proceedings of the IEEE European test workshop (ETW'98), 27–29 May 1998, Sitges, Barcelona, Spain.
2. Sogomonyan E.S., Slabakov E.V. (1989). Self-checking devices and fault-tolerant ststems [Samoproveryaemye ustrojstva i otkazoustojchivye sistemy]. Moscow, Radio and communication [Radio i svyaz']. – 208 p.
3. Sapozhnikov Val.V., Sapozhnikov Vl.V. (1992). Self-checking discrete devices [Samoproveryaemye diskretnye ustrojstva]. St. Petersburg, Energoatomizdat [Energoatomizdat]. – 224 p.
4. Parhomenko P.P., Sogomonyan E.S. (1981). Basics of technical diagnostics (optimization of diagnostic algorithms and equipment) [Osnovy tekhnicheskoj diagnostiki (optimizaciya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnye sredstva)]. Moscow, Energoatomizdat [Energoatomizdat]. – 320 p.
5. Matrosova A., Ostanin S., Kirienko I., Nikolaeva E. (2016). A Fault-tolerant sequential circuit design for SAFs and PDFs soft errors. 2016 IEEE 22nd International Symposium on on-line testing and robust system design (IOLTS), 4–6 July 2016. – Pp. 1–2.
6. Busaba F.Y., Lala P.K. (1994). Self-checking combinational circuit design for single and unidirectional multibit errors. journal of electronic testing: Theory and applications, vol. 5, issue 5. – Pp. 19–28.
7. Das D., Touba N.A. (1999). Synthesis of circuits with low-cost concurrent error detection based on bose-lin codes, Journal of electronic testing: Theory and applications, vol. 15, issue 1–2. – Pp. 145–155.
8. Das D., Touba N.A., Seuring M., Gossel M. (2000). Low cost concurrent error detection based on modulo weight-based codes. Proceedings of the 6th IEEE International on-line testing workshop (IOLTW), Spain, Palma de Mallorca, July 3–5, 2000. – Pp. 171–176.
9. Nicolaidis M., ZorianY. (1998). On-line testing for VLSI – A Compendium of approaches. Journal of electronic testing: Theory and application, vol. 12, issue 1–2. – Pp. 7–20.
10. Mitra S., McCluskey E.J. (2000). Which concurrent error detection scheme to Choose? Proceedings of International test conference, USA, Atlantic City, NJ, 03–05 October 2000. – Pp. 985–994.
11. Mekhov V.B., Sapozhnikov Val.V., Sapozhnikov Vl.V. (2008). Checking of combinational circuits basing on modification sum codes [Kontrol' kombinacionnyh skhem

na osnove modificirovannyh kodov s summirovaniem]. Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika], issue 8. – Pp. 153–165.
12. Pivovarov D. V. (2016). Features of the organization of totally self-checking structures on the basis of the «1-out-of-4» constant-weight code [Osobennosti organizacii polnost'yu samoproveryaemyh struktur na osnove ravnovesnogo koda «1 iz 4»]. Materials of the Jubilee XV St. Petersburg International conference «Regional informatics – 2016», St. Petersburg, October 26–28, 2016 [Materialy Yubilejnoj XV Sankt-Peterburgskoj mezhdunarodnoj konferenciya «Regional'naya informatika – 2016», Sankt-Peterburg, 26–28 oktyabrya 2016 g]. St. Petersburg, SPOISU [St. Petersburg, SPOISU]. – Pp. 307–308.
13. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V., Pivovarov D. V. (2017). Boolean complement method based on constant-weight code «1-out-of-4» for formation of totally self-checking concurrent error detection systems [Metod logicheskogo dopolneniya na osnove ravnovesnogo koda «1 iz 4» dlya postroeniya polnost'yu samoproveryaemyh struktur sistem funkcional'nogo kontrolya]. Electronic modelling [Ehlektronnoe modelirovanie], vol. 39, issue 2. – Pp. 15–34.
14. Efanov D. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2010). On summation code properties in functional control circuits [O svojstvah koda s summirovaniem v skhemah funkcional'nogo kontrolya]. Automation and remote control [Avtomatika i telemekhanika], issue 6. – Pp. 155–162.
15. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Goessel M. (2001). Self-dual discrete devices [Samodvojstvennye diskretnye ustroistva]. St. Petersburg, Energoatomizdat. – 331 p.
16. Saposhnikov Val. V., Morozov A., Saposhnikov Vl. V., Goessel M. (2002). Concurrent checking by Use of complementary circuits for «1-out-of-3» Codes. 5th International workshop IEEE DDECS 2002, Brno, Czech Republic, April 17–19, 2002.
17. Gessel' M., Morozov A. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2003). Logic complement, a new method of checking the combinational circuits [Logicheskoe dopolnenie – novyj metod kontrolya kombinacionnyh skhem]. Automation and remote control [Avtomatika i telemekhanika], issue 1. – Pp. 167–176.
18. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2006). On totally self-checking combinational circuits synthesis [O sinteze polnost'yu samoproveryaemyh kombinacionnyh skhem]. Proceedings of Petersburg transport university [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya], issue 1. – Pp. 97–110.
19. Das D. K., Roy S. S., Dmitriev A., Morozov A., Gössel M. (2012). Constraint don't cares for optimizing designs for concurrent checking by 1-out-of-3 Codes. Proceedings of the 10th International workshops on boolean problems, Freiberg, Germany, September, 2012. – Pp. 33–40.
20. Efanov D., Sapozhnikov Val., Sapozhnikov Vl. (2016). Methods of organization of totally self-checking concurrent error detection system on the basis of constant-weight «1-out-of-3»-Code. Proceedings of 14th IEEE East-West design & Test symposium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016. – Pp. 117–125.
21. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2016). Formation of totally selfchecking structures of concurrent error detection systems with the Use of constant-weight Code «1-out-of-3» [Postroenie polnost'yu samoproveryaemyh struktur

sistem funkcional'nogo kontrolya s ispol'zovaniem ravnovesnogo koda «1 iz 3»]. Electronic modelling [Ehlektronnoe modelirovanie], vol. 38, issue 6. – Pp. 25–43.
22. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Dmitriev A. V., Morozov A. V., Gessel' M. (2002). Organization of functional checking of combinational circuits by the logic complement method [Organizaciya funkcional'nogo kontrolya kombinacionnyh skhem metodom logicheskogo dopolneniya]. Electronic modelling [Ehlektronnoe modelirovanie], vol. 24, issue 6. – Pp. 51–66.
23. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Osadchij G. V. (2003). Combinational circuits checking by the method of boolean complement [Kontrol' kombinacionnyh skhem metodom logicheskogo dopolneniya]. Design, certification and technical operation of devices and systems of railway automation and remote control, Proceedings, St. Petersburg, PSTU [Konstruirovanie, sertifikaciya i tekhnicheskaya ehkspluataciya ustrojstv i sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki, Sbornik nauchnyh trudov. Sankt-Peterburg, PGUPS]. – Pp. 3–8.
24. Osadchij G. V. (2004). Development of a Boolean complement method for diagnosing and monitoring railway automation devices [Razrabotka metoda logicheskogo dopolneniya dlya diagnostirovaniya i monitoringa ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki]. Proceedings of Petersburg transport university [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya], issue 1. – Pp. 84–89.
25. Osadchij G. V. (2004). Increase the efficiency of the use of the method of logical addition for the control of combinational circuits [Povyshenie ehffektivnosti ispol'zovaniya metoda logicheskogo dopolneniya dlya kontrolya kombinacionnyh skhem]. Development and operation of new devices and systems of railway automation and remote control. Proceedings, St. Petersburg, PSTU [Razrabotka i expluataciya novyh ustrojstv i sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki. Sbornik nauchnyh trudov. Sankt-Peterburg, PGUPS]. – Pp. 32–35.
26. Saposhnikov Val. V., Saposhnikov Vl. V., Morozov A., Osadtchi G., Gossel M. (2004). Design of totally self-checking combinational circuits by Use of complementary Circuits. Proceedings of East-West design & Test workshop, Yalta, Ukraine, 2004. – Pp. 83–87.
27. Gessel' M., Morozov A. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. (2005). Checking Combinational circuits by the method of logic complement [Kontrol' kombinacionnyh skhem metodom logicheskogo dopolneniya]. Automation and remote control [Avtomatika i telemekhanika], issue 8. – Pp. 161–172.
28. Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. (2008). New methods of concurrent checking. Edition 1. Dordrecht, springer science+business media B. V. – 184 p.
29. Sen S. K. (2010). A Self-checking circuit for concurrent checking by 1-out-of-4 code with design optimization using constraint don't cares. National conference on emerging trends and advances in electrical engineering and renewable energy (NCEEERE'2010), Sikkim manipal institute of technology, Sikkim, held during 22–24 December, 2010.
30. Pivovarov D. V. (2016). One way of constructing completely self-checking structures of concurrent error-detection systems based on the «1-out-of-4» constant-weight code [Odin sposob postroeniya polnost'yu samoproveryaemyh struktur sistem

funkcional'nogo kontrolya na osnove ravnovesnogo koda «1 iz 4»]. Information technologies at transport: proc. section «Information technologies at transport» of Anniversary XV St. Petersburg int. conf. «Regional informatics – 2016», St. Petersburg, 26–28 of Oct. 2016; Ed. Val. V. Sapozhnikov [Informacionnye tekhnologii na transporte: sbornik materialov sekcii «Informacionnye tekhnologii na transporte» Yubilejnoj XV Sankt-Peterburgskoj mezhdunarodnoj konferencii «Regional'naya informatika – 2016», Sankt-Peterburg, 26–28 oktyabrya 2016 g.; pod. red. Val. V. Sapozhnikova]. St. Petersburg, PSTU [PGUPS]. – Pp. 17–27.

31. Efanov D. V. (2016). Application of the 2-Out-Of-4 Constant-weight code in organising concurrent error detection systems [Primenenie ravnovesnogo koda «2 iz 4» pri organizacii sistem funkcional'nogo kontrolya]. Proceedings of Petersburg transport university [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya]. Issue 2. – Pp. 269–278.
32. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2016). Method of operation control over combinatory logic device based on 2-Out-Of-4 Code [Metod funkcional'nogo kontrolya kombinacionnyh logicheskih ustrojstv na osnove koda «2 iz 4»]. Journal of instrument engineering [Izvestiya vuzov. Priborostroenie], vol. 59, issue 7. – Pp. 524–533.
33. Sapozhnikov Val., Sapozhnikov Vl., Efanov D. Concurrent error detection of combinational circuits by the method of boolean complement on the base of «2-out-of-4» code. Proceedings of 14th IEEE East-West design & Test symposium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016. – Pp. 126–133.
34. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2017). Design of self-checking concurrent error detection systems based on «2-Out-Of-4» constant-weight code [Postroenie samoproveryaemyh struktur sistem funkcional'nogo kontrolya na osnove ravnovesnogo koda «2 iz 4»]. Problems of control [Problemy upravleniya], issue 1. – Pp. 57–64.
35. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2017). Organization of functional control systems with totally self-checking structure based on paraphase signals compression modules [Organizaciya sistem funkcional'nogo kontrolya s obespecheniem polnoj samoproveryaemosti struktury na osnove modulej szhatiya parafaznyh signalov]. Journal of instrument engineering [Izvestiya vuzov. Priborostroenie], vol. 60, issue 5. – Pp. 404–411.
36. Aksyonova G. P. (1979). Necessary and sufficient conditions for design of completely checkable modulo convolution circuits [Neobhodimye i dostatochnye usloviya postroeniya polnost'yu proveryaemyh skhem svertki po modulyu dva]. Automation and Remote Control [Avtomatika i telemekhanika], issue 9. – Pp. 126–135.
37. Collection of digital design benchmarks. URL: http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks.
38. Yang S. (1991). Logic synthesis and optimization benchmarks: User guide: Version 3.0. Microelectronics center of Nth Carolina (MCNC). – 88 p.
39. SIS: A System for sequential circuit synthesis / E. M. Sentovich, K. J. Singh, L. Lavagno, C. Moon, R. Murgai, A. Saldanha, H. Savoj, P. R. Stephan, R. K. Brayton, A. Sangiovanni-Vincentelli. Electronics research laboratory, Department of electrical engineering and computer science, University of California, Berkeley, 4 May 1992. – 45 p.

40. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V., Pivovarov D. V. (2017). Way of formation of concurrent error detection system based on boolean complement with «1-out-of-5» code [Sposob postroeniya sistemy funkcional'nogo kontrolya na osnove logicheskogo dopolneniya po ravnovesnomu kodu «1 iz 5»]. Radioelectronics and Informatics [Radioehlektronika i informatika], issue 3. – Pp. 28–35.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Д. В. Ефановым
Поступила в редакцию 04.05.2017, принята к публикации 08.06.2017

Пивоваров Дмитрий Вячеславович – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: pivovarov. d.v.spb@gmail.com

© Пивоваров Д. В., 2017

Из истории автоматики

УДК 656.25

Н. В. Лупал, канд. техн. наук
Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»,
Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта

РАЗВИТИЕ УСТРОЙСТВ СЦБ В ПЕРИОД ИМПЕРИАЛИЗМА (1906–1917 ГГ). ЧАСТЬ 4: УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ

Данная работа содержит материалы третьего раздела неизданной монографии первого заведующего кафедрой «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта Николая Васильевича Лупала «Развитие устройств сигнализации, централизации и блокировки на железных дорогах России». Описываются устройства для борьбы с проездами закрытых семафоров. Затрагиваются проблемы обеспечения безопасности движения поездов на станциях, оборудованных механической централизацией, а также аварий на железных дорогах.

безопасность движения; семафор; ключевая зависимость; авария; катастрофа

1 Устройства для борьбы с проездами закрытых семафоров

Из-за значительного числа аварий и крушений, часть которых была вызвана проездами закрытых семафоров, требовалась разработка мероприятий и устройств по борьбе с указанными явлениями.

Какие-либо методы борьбы с проездами закрытых семафоров до начала XX в. почти отсутствовали, лишь иногда прибегали к установке на подвижном составе скоростемеров для контроля скорости движения поездов. Немногие продложения по применению сигналов на локомотиве или установке автостопов не имели успеха и совершенно не использовались.

В начале XX в. число предложений устройств локомотивной сигнализции и автостопов значительно возрастает, делаются попытки, правда весьма робкие, введения в действие подобных устройств на русских железных дорогах.

Предлагавшиеся устройства можно разделить на устройства оповестительного характера, в которых отсутствуют какие-либо специальные прибо-

ры на локомотиве, и на устройства, в которых имеет место взаимодействие путевых и локомотивных приборов.

Вторую группу устройств, в свою очередь, можно разделить на устройства, которые подают на локомотиве в необходимых случаях звуковой сигнал, и на устройства, воздействующие на тормозную систему поезда.

К группе устройств оповестительного характера относятся, например, приборы, предложенные И. М. Маевским, И. Короткевичем, И. Крживицким.

Прибор, предложенный в 1903 г. машинистом Маевским, служил для регистрации проезда закрытого семафора и подачи на пути звонкового сигнала. По предложению И. М. Маевского, на станции, в помещении дежурного, устанавливался часовой механизм с вращающимся циферблатом, имеющим деления через 10 минут. Два электромагнита управляли карандашом. Входной семафор снабжался крыловым контактом, а на пути устанавливалась механическая педаль с выступающим рычажком. При открытии семафора рычажок педали действием семафорной тяги отводился вниз. В то же время на крыловом контакте замыкалась цепь станционного электромагнита, управляющего карандашом, и последний прижимался к циферблату. При закрытии семафора электромагнит лишался тока, и карандаш отходил от циферблата. В результате на последнем отмечалась черта, показывающая время открытия и закрытия семафора. При проезде поездом закрытого семафора со стороны перегона каждая колесная пара нажимала на рычажок педали. При этом замыкалась цепь электромагнита, управляющего карандашом, и последний отмечал черту. В промежутках между наездом колесных пар электромагнит лишался тока. Таким образом, проход каждой колесной пары, по мысли изобретателя, отмечался черточкой. Одновременно звонили колокол, установленный на семафоре, и звонок у дежурного по станции. При отправлении со станции колеса состава отводили рычажок педали в сторону, и никакого действия не происходило.

Приборы Н. С. Крживицкого и И. Короткевича являлись звуковыми. По предложению Крживицкого, на некотором расстоянии от семафора устанавливалась на пути механическая педаль, а у семафора – ряд ружейных патронов с курками. При проезде закрытого семафора прибывающим поездом колесные пары локомотива посредством рычажной передачи от педали воздействовали на курок, ударом которого взрывались патроны. При открытом семафоре переводная тяга отводила рычажную передачу в сторону и воздействия на курок не получалось.

Подобное же устройство, но более совершенное, было предложено И. Короткевичем и В. Сониным. Они также предлагали педаль, посредством которой, при закрытом семафоре и проходе его поездом, освобождался груз, падающий на патроны. Это устройство испытывалось и работало на Северо-Западной железной дороге. Ввиду необходимости механической связи между педалью, семафором и стреляющим устройством приходилось устанавливать

педаль вблизи семафора. Таким образом, звук выстрела мог оказаться эффективным лишь при медленном подходе поезда, когда возможность проезда была и так невелика, а последствия такового не так страшны. При подходе же поезда к закрытому семафору с большой скоростью, когда это являлось наиболее опасным, звуковой сигнал подавался поздно, да и слышимость его на паровозе была не лучшей.

Предлагались устройства на механическом контакте, использующие взаимодействие путевых и локомотивных приборов. Часть этих предложений предвосхищала звуковую сигнализацию на локомотиве. Предполагалось, что на пути устанавливается рычаг, могущий занимать рабочее или нерабочее положение в зависимости от показания семафора. При рабочем положении рычага, соответствующем закрытому семафору, специальная выступающая часть на локомотиве, соприкасаясь с путевым рычагом, отклонялась и воздействовала либо на звонок, либо на свисток.

Подобного рода устройства механического автостопа предлагались, например, Митиным, Развадовским, Рябушкиным, Павловым-Лобановым и другими изобретателями.

Известно также предложение И. Фалька, основанное на использовании электрической цепи из проводников в виде путевых рельсов и дополнительного изолированного от земли провода, проложенного вдоль пути. В цепь последовательно включались источники тока и приемные электромагниты, установленные на локомотивах. Электромагниты могли срабатывать при увеличении тока, что происходило при сближении поездов вследствие уменьшения сопротивления дополнительного провода, по которому скользили щетки, укрепленные на паровозах. Срабатывание электромагнитов использовалось для подачи звукового сигнала и воздействия на тормоза.

А. Озолинг предлагал устанавливать на пути рычаг, сидящий на общей оси со шкивом, который охватывался тросом, связанным с семафором. При закрытом семафоре рычаг стоял в верхнем рабочем положении. При проезде локомотива имеющийся на нем ударный рычаг, ударяясь о путевой, отклонялся и производил выпуск воздуха из тормозной магистрали.

Механик Ф. Качинский и машинист Р. Милевский, предлагая подобную же систему механического автостопа, намеревались использовать его и как средство для регулировки движения поездов. Согласно их предложению, при проезде поезда первое его колесо нажимало на ролик, установленный у рельса, причем связанный с ним полосой второй ролик становился выше рельса. Второй ролик воздействовал на сигнальный прибор, который задерживал путевое устройство в этом рабочем положении для передачи воздействия на следующий поезд. Это воздействие осуществлялось от удара локомотивного рычага на поднятый ролик, что могло быть использовано для приведения в действие звонка на локомотиве или тормозной системы. При прибытии первого поезда (поставившего автостоп в рабочее положе-

ние) на следующий раздельный пункт с последнего посылался дежурным ток с индуктора в сигнальный прибор, приводящий путевой автостоп в нерабочее положение.

Имело автостоп и оригинальное устройство, предложенное Русско-Балтийским вагонным заводом. На ось тендера свободно надевались две стальные катушки. Между катушками находился ограничитель их движения, а с наружных сторон устанавливались пружины. Наружные щеки катушек, более длинные, чем внутренние, располагались выше путевых рельсов. Над внутренними щеками укреплялся на корпусе тендера кронштейн, несущий рычаги, стянутые между собою пружиной. Нижние концы рычагов прилегали к внутренним щекам катушек, а верхние были соединены с тягами, идущими к коробке (в которой имеется прибор для связи с тормозами), к свистку и пр. На соответственном расстоянии от семафора на пути укладывались контррельсы так, чтобы они были выше щек катушек. Одни концы этих рельсов удалялись от основных рельсов, и щеки катушек могли свободно проходить. При закрытом же семафоре концы контррельсов приближались к основным рельсам. При проходе поезда щеки попадали в зазор и катушки отжимались к колесам. При этом внутренние щеки катушек нажимали на рычаги, вследствие чего тяги воздействовали на прибор в коробке, что приводило в действие тормоза, свисток и пр. В коробке предлагалось также помещать часы, печатающие при нажатии тяг дату действия прибора на бумажной ленте. Предложение было отклонено по мотиву сложности устройства.

В 1914 г. на однопутном участке Гатчина-Товарная-Владимирская Северо-Западной железной дороги была установлена и испытывалась система точечного автостопа с локомотивной сигнализацией.

В системе применялись рельсовые цепи.

В начале каждого блок-участка в середине пути устанавливались на расстоянии 200 сажен (425 м) друг от друга по два жезловых бруса. Брусья были длиной около 20 м и имели форму трапеции. Верхние точки первого по ходу поезда бруса имели высоту 2 1/4" (56 мм), а второго – 3 3/4" (94 мм).

Под паровозом подвешивался контактный башмак, который при проходе поезда над брусьями набегал на последние, устанавливая соответствующий контакт между паровозными электрическими приборами и линейными батареями на постах. Одновременно, в зависимости от высоты бруса, по которому скользил паровозный башмак, происходило размыкание одного из контактов. Устройство системы и ее электрические схемы, примененные в установке, остались неизвестными, известно только, что они отличались от описанных в привилегиях.

Предполагалось, что размыкание контакта вызывало, при свободном участке и исправности всех устройств, звонок на паровозе, а при занятом участке или исправности устройств – тревожный свисток и отклонение индикатора в виде небольшого семафорчика, установленного на паровозе.

Если машинист не обращал внимания на поданные ему тревожные сигналы и следовал далее, то при проезде над вторым брусом и размыкании контактов автоматически приводились в действие тормоза, переводился в закрытое положение регулятор и раздавался тревожный свисток. Для оттормаживания поезда после вынужденной остановки необходимо было сорвать пломбу с особого рычажка.

Система увязывалась также с устройствами на станциях в целях исключения отправления поезда или его приема на станцию без разрешения дежурного по станции.

Для осуществления этих зависимостей, а также для постановки паровозных приборов в зависимость от состояния участка и соответственной коммутации тока вдоль линии подвешивалось четыре провода.

В мае 1915 г. эта система испытывалась и показала благоприятные результаты. Война 1914–1918 гг. помешала дальнейшим испытаниям, устройства были заброшены, выведены из действия и сняты.

2 Вопросы борьбы с авариями и попытки правильной организации этой борьбы

Рост железнодорожной сети и интенсивности движения на ней требовал улучшения технической вооруженности железных дорог и широкого внедрения устройств для обеспечения безопасности следования поездов. Между тем последним вопросом в царском министерстве путей сообщения никто не занимался и дело было предоставлено на усмотрение местных управлений дорог. Участившиеся аварии и крушения, скромно именовавшиеся то время «происшествиями», росли из года в год. Вопрос об авариях живо интересовал общество, что выражалось и в газетных статьях, и в запросах левых фракций в Государственной Думе. В 1912 г. при управлении железных дорог министерства созывается «особое совещание по вопросам, относящимся к безопасности движения». Во вступительной речи председатель констатировал, что участились сходы поездов в пределах станций. При рассмотрении вопроса совещание весьма осторожно наметило меры, имевшие в основном организационный характер. Радикальные меры, как требующие расходов, относились к более далеким срокам после «всестороннего изучения» вопроса. Часть предложенных мер была отмечена выше. Такие меры, как введение самопишущих указателей скорости движения поездов, считались также требующими значительных расходов и потому могущими быть отложены. О приборах, предложенных русскими изобретателями, не вспоминали. Как на возможное мероприятие по борьбе с проездами закрытых семафоров робко указывалось на надобность установки предупредительных сигнальных приборов перед входными семафорами.

Некоторый план действий и основы требований к устройствам централизации были намечены в решениях XVIII съезда представителей службы движения по докладу П. П. Дмитренко. В постановлении съезда рекомендовалось управлениям дорог приступить к составлению общего плана введения приборов взаимного замыкания стрелок и сигналов, при этом предлагалось на малых станциях применять системы взаимного замыкания при стрелках местного обслуживания (ключевые зависимости). В числе требований к системе взаимного замыкания, намеченных постановлением, были: транспортивность (гибкость, приспособляемость к изменениям путевого развития), обеспечение при централизации видимости стрелок, а при отсутствии видимости – введения автоматической деблокировки маршрутов, увязка станционной и перегонной блокировок, обязательность контроля установки маршрута дежурным по станции без возложения на него большого физического труда и т. п.

Продолжавшиеся крушения и аварии, в частности случаи аварий на централизованных стрелках, стали причиной создания в 1914 г. при Министерстве путей сообщения нового «особого совещания под председательством председателя инженерного совета Д. П. Козырева по рассмотрению вопросов о применении на железных дорогах систем централизации стрелок и сигналов». Совещания происходили в марте и апреле 1914 г., предварительная работа протекала в подкомиссии под председательством П. П. Дмитренко. Работа, произведенная совещанием, является весьма интересной и ценной, хотя многие из выводов и предложений могли быть использованы и фактически были применены лишь после Октябрьской революции и ликвидации капитализма.

В основном деятельность совещания свелась к разработке мероприятий по борьбе с авариями, планированию способов взаимозамыкания стрелок и сигналов, а также наиболее приемлемых систем централизации, обсуждению вопросов планирования строительства устройств централизации и блокировки и разработке программы издания правил, инструкций, технических условий. В отношении аварий, имевших место на централизованных установках, были проанализированы случаи за три года – 1911–1913-й.

Наибольшее число аварий происходило: а) вследствие перевода стрелок под составом, б) вследствие приема поездов на занятые пути, в) из-за неплотного прилегания остряков к рамным рельсам. По последней причине аварии наблюдались, главным образом, на централизациях с жесткой передачей и частично на гидравлической и почти не наблюдались на централизации с гибкими тягами.

В качестве мероприятий по борьбе с переводом стрелок под составом совещание наметило: 1) назначение специальных дежурных сигналистов на балконы централизованных постов, 2) применение механических педалей (прижимных шин), 3) введение станционной блокировки там, где она не имелась, 4) применение автоматической деблокировки (размыкания) маршрутов.

В отношении борьбы с приемом поездов на занятые пути рекомендовалось: 1) введение специализации путей, 2) введение станционной блокировки, 3) индикация состояния путей, 4) введение изоляции путей.

В качестве мер для борьбы с авариями из-за неплотного прилегания перьев к рамным рельсам совещание наметило:1) обязательность устройства специального соединения для скрепления стрелочных тяг с замыкателем с закрытием его железным кожухом, 2) замену деревянных фундаментов под угловые шкивы каменными или металлическими, 3) применение тяжелых типов стрелок, 4) дополнительное замыкание противошерстных стрелок.

Наконец, совещание разработало правила, определяющие возможность спаривания стрелок, – примерно те же, которые применяют в настоящее время, а также рекомендовало производство периодических комиссионных осмотров устройств централизации и блокировки.

Многое из приведенного кажется азбучными истинами, но надо учесть, что, как уже отмечалось, в то время общих указаний по устройствам централизации министерство не давало и дороги действовали по собственным соображениям. Уже формулировка этих требований и рекомендация их дорогам имели весьма большое значение.

По вопросу выбора способов взаимного замыкания стрелок и сигналов совещание признало целесообразным применение устройств ключевой зависимости. Вместе с тем совещание отметило, что при применении той или иной системы взаимного замыкания «должно быть выполнено требование о соответствии пропускной способности перегонов с приемоотправочной способностью станции. Из этого общего условия (при наличии на станции достаточного числа путей) вытекает, что время, необходимое для установки и отмены маршрутов на станции, не должно превышать того минимального интервала в следовании попутных (на двухпутных дорогах) или попутных и встречных (на однопутных дорогах) поездов, который определяется пропускной способностью смежных со станцией перегонов и принятым на них способом сношений по движению поездов, что и должно быть определено соответствующим расчетом».

По вопросу выбора системы централизации совещание высказалось осторожно, рекомендуя в дальнейшем применять системы с гибкими тягами и электрические, причем было отмечено, что «последним следует отдавать предпочтение там, где обеспечено получение в необходимых размерах электрической энергии и где, кроме того, можно ожидать интенсивной работы стрелок и сигналов».

Вслед за созданием в это же время специальной части централизации и блокировки при центральном управлении железных дорог начали разрабатываться общие планы по оборудованию казенных железных дорог устройствами централизации и блокировки.

Разработка такого плана требовала разрешения вопроса об унификации устройств. Между тем по устройствам централизации наблюдалось весьма большое разнообразие типов не только на разных дорогах, но даже в пределах одной дороги. Это затрудняло техническое и эксплуатационное обслуживание, снабжение запасными частями, переброску при необходимости технического штата и пр.

Совещание считало важным заняться вопросами унификации. Во-первых, отмечая удачный опыт введения однотипных систем на Сибирской и Забайкальской железных дорогах, совещание наметило три основных вида устройств взаимного замыкания стрелок и сигналов: а) ключевые зависимости с использованием переменного тока; б) механическая централизация гибких тяг; в) электрическая централизация. Во-вторых, совещание признало целесообразным унификацию отдельных деталей установок, как, например, стрелочных замыкателей, принадлежностей гибкой передачи и т. п.

Совещание рекомендовало издать в общем порядке: а) правила проектирования станций, б) правила проектирования устройств централизации и блокировки, в) технические условия на устройства централизации и блокировки, г) типовые чертежи приборов и технические описания, д) инструкции по периодическому осмотру устройств централизации и блокировки.

К сожалению, многие из намеченных совещанием мероприятий не могли быть осуществлены из-за начавшейся вскоре Первой мировой войны.

Заключение монографии

В период 1901–1917 гг. продолжалось развитие устройств блокировки и централизации. Были разработаны и внедрены отечественные системы механической централизации стрелок и сигналов с гибкой передачей, системы станционной блокировки. Появились первые предложения по борьбе с приемами поездов на занятые пути, в частности, предложены станционные рельсовые пути (Г. Цебоев).

Особое внимание было уделено вопросам регулирования движения поездов на одноколейных железных дорогах и обеспечения безопасности движения на малых станциях с ручными стрелками. Появился ряд предложений по предупреждению проезда закрытых семафоров. Русскими изобретателями были разработаны приборы для регулирования движения на одноклейных дорогах – электроблокировочные (В. А. Зееста и В. А. Ремцова) и жезловые (Р. И. Заурбрея, Н. Г. Дикушина и гг. Вершинина).

Русские изобретатели сталкивались с многочисленными трудностями при продвижении своих изобретений. Как указывалось, постановка патентного дела в царской России отнюдь не способствовала развитию отечественного изобретательства. Высокие пошлины, длительность выдачи привиле-

гий (по несколько лет), необходимость быстрой реализации без какой-либо помощи со стороны государства – вот что встречал русский изобретатель на своем пути.

Громадное большинство изобретателей не имели средств и не получали материальной поддержки для изготовления моделей и испытания своих изобретений. Надо было найти и заинтересовать какого-либо капиталиста для возможности производства изобретенного. Часто отсутствовала и необходимая производственная база, так как специализированных заводов не было.

Первое время иностранная аппаратура СЦБ целиком ввозилась в Россию. Позже иностранные фирмы создают в России небольшие мастерские, главным образом, сборочного характера, иногда с небольшими производственными цехами для выпуска изделий, которые было невыгодно ввозить. Беззастенчивость иностранных фирм, шедших на подкуп отдельных чиновников с целью монопольного распространения своих изделий, использование рационализаторских предложений русских техников с выдачей их за фирменные, покупка отдельных изобретений с тем, чтобы их похоронить, – вот характерные черты деятельности этих фирм. В то же время в кругах Министерства путей сообщения весьма недоверчиво относились к русским изобретениям и предложениям.

Несмотря на все отмеченные препятствия, русские техники и изобретатели внесли большой вклад в дело развития устройств обеспечения безопасности движения поездов.

Изобретения и предложения делались не только квалифицированными инженерами, как, например, Гордеенко, Вурцелем, Дмитриенко, Рудневым, Зеестом и другими, но и рядовыми работниками железных дорог (механик Графтио, электрики Дикушин и Вершинин, техник Сухарников, машинист Маевский и многие другие).

Весьма плохо до революции обстояло дело и с подготовкой квалифицированных кадров. Инженерные кадры для железных дорог подготавливались в двух-трех высших учебных заведениях. С подготовкой кадров в области железнодорожной связи и сигнализации дело обстояло совсем худо, и, можно сказать, что такая подготовка вообще отсутствовала. В 1908 г. при Петербургском электротехническом институте была организована небольшая лаборатория «электрической сигнализации», преподавателем И. П. Вальдом читался небольшой курс сигнализации, лабораторные занятия проводил Н. О. Рогинский. Последним в 1913 г. было выпущено «Краткое руководство по железнодорожной сигнализации и централизации стрелок и сигналов». Эта книга в то время являлась «единственным руководством, дающим возможность русским техникам ознакомиться с современным положением и развитием техники железнодорожной сигнализации».

Так же плачевно обстояли дела с подготовкой технического персонала среднего и низкого уровней. До революции практически не существовало должной подготовки технических агентов как в области связи, так и в обла-

сти блокировки и централизации. Как исключение можно привести попытку организации Сибирской железной дорогой «курсов для подготовки техников централизации и надсмотрщиков по телеграфу и блокировке».

Неудовлетворительное положение с сигнализацией, ее непродуманность и пестрота, слабая насыщенность устройствами централизации и блокировки при росте интенсивности движения обусловили в начале XX в. увеличение числа железнодорожных аварий и крушений.

Вопрос о железнодорожной катастрофах сильно волновал общественность и вызвал необходимость его рассмотрения в Государственной Думе. На заседании Думы представителям левых фракций указывалось, что на железных дорогах имели место значительные увольнения опытных железнодорожников за «революционные настроения» и замена их неопытными людьми, большей частью ставленниками черносотенных организаций. Отмечались тяжелые материальные и культурные условия жизни железнодорожников, часто заброшенных в глухие углы.

Под влиянием общественного воздействия управление железных дорог просило министра путей сообщения об ассигновании 50 тысяч рублей для выдачи работающим над изобретениями в области обеспечения безопасности движения поездов. Эти деньги предназначались для покрытия расходов, связанных с разработкой и испытанием изобретений.

Упомянутое выше особое совещание 1914 года наметило ряд рациональных мероприятий по повышению безопасности движения, по вопросам планирования развития устройств централизации и блокировки, изданию инструкций, технических условий и т. п.

Конечно, полностью плановое развитие устройств в условиях капитализма было неосуществимо, но и частичное упорядочение применения устройств централизации и блокировки имело большое значение.

Полное планирование оборудования железных дорог устройствами централизации и блокировки было достигнуто лишь после Великой октябрьской революции. Коммунистическая партия и Советское Правительство придавали и придают большое значение обеспечению безопасности движения поездов. За годы советской власти наши железные дороги весьма значительно обогатились новыми техническими устройствами автоматики и телемеханики. Организована надлежащая производственная база, производится подготовка квалифицированных кадров, созданы соответственные научно-исследовательские и проектные организации, поощряется изобретательство. Ничего подобного не имелось в капиталистической России. В результате мы имеем в настоящее время широко развитую новейшую технику, как, например: автоблокировку различных видов, автостопы и локомотивную сигнализацию, релейную и маршрутно-релейную централизацию, диспетчерский контроль и диспетчерскую сигнализацию, механизацию сортировочных горок с автоцентрализацией.

Nicolay V. Lupal
«Automation and remote control on railways» department,
Leningrad institute of railway engineers

Signals and interlocking development during imperialism (1906–1917). Part 4: Safety devices

The study in question contains the materials of the third part of an unpublished monography manuscript «The development of signaling arrangement on Russian railroads» written by Nikolay Vasiliyevich Lupal, the first head of «Automatics and telemechanics on railroads» chair at Leningrad institute of railway engineers. The issues of train safe control at the stations, equipped with mechanical interlocking were touched upon in the given study.

safety of operation; color light signal; key interlocking; traffic hazard; fatal crash

ЛУПАЛ Николай Васильевич (1887–1966) – кандидат технических наук, основатель и первый заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта (годы руководства – 1930–1960). Сорок два года жизни Н. В. Лупал посвятил педагогической работе в высших учебных заведениях. В 1934 г. на станции Гудермес Северо-Кавказской железной дороги была построена первая установка релейной централизации, реализованная по его идеям и схемам. В сферу занятий Н. В. Лупала входили также принципы построения кодовых систем управления. Результаты этой работы были положены впоследствии в основу систем диспетчерской централизации.

© Лупал Н. В., 2017

Краткие сообщения

УДК 378.147+656.25

Д. В. Ефанов, канд. техн. наук
Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»,
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

ТРЕТЬЯ ОЛИМПИАДА ПО ТЕОРЕТИЧЕСКИМ ДИСЦИПЛИНАМ КАФЕДРЫ «АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ» ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ ИМПЕРАТОРА АЛЕКСАНДРА I

На кафедре автоматики и телемеханики на железных дорогах с целью популяризации транспортной науки и повышения мотивации студентов к образовательной деятельности ежегодно проводится олимпиада в цикле учебных дисциплин «Теория построения безопасных систем управления». В этом году была проведена уже третья олимпиада, собравшая 74 студентов факультета автоматизации и интеллектуальных технологий Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I. Приводятся некоторые итоги проведенного мероприятия.

железнодорожная автоматика и телемеханика; теория дискретных устройств; основы технической диагностики; олимпиада

Одно из направлений работы кафедры автоматики и телемеханики на железных дорогах нашего университета – развитие и популяризация транспортной науки [1]. С этой целью на кафедре создана и успешно функционирует научная школа технической диагностики дискретных систем, возглавляемая профессорами кафедры, братьями Сапожниковыми [2]. Участники научной школы исследуют новые вопросы в таком сложном направлении, как техническая диагностика устройств автоматики, проводятся еженедельные научно-практические семинары, а также конкурсы среди студентов факультета автоматизации и интеллектуальных технологий [3, 4]. Важным мероприятием научной школы является ежегодная олимпиада по теоретическим дисциплинам кафедры – теории дискретных устройств (ТДУ) и основам технической диагностики (ОТД).

17 мая 2017 г. состоялась Третья олимпиада, собравшая 74 студентов 2-го и 3-го курсов факультета автоматизации и интеллектуальных технологий (49 из них приняли участие в олимпиаде по ТДУ и 25 – по ОТД).

В этом году организаторами мероприятия было решено выбрать нестандартный формат проведения олимпиады по ТДУ. Студенты заранее подавали заявки на участие, разбившись на 14 команд по 3–4 человека в каждой (рис. 1). На олимпиаде предлагался ряд простых вопросов, ответы на которые должны были быть получены командами за установленное время. Кроме того, был организован конкурс капитанов. В результате первое место между собой поделили две команды (рис. 2 и рис. 3) в составе студентов Иванова К. А. (АТ-503), Назарова Р. С. (АТ-502), Пушкина И. А. (АТ-501), Растобаровой Ю. А. (АТ-503), Смышляевой В. И. (АС-507), Филипповой У. И. (АТ-502) и Фолленвейдера Д. С. (АТ-502).

Олимпиада по дисциплине ОТД прошла в классическом формате: студентам был дан ряд нестандартных задач и три часа на их решение (рис. 4 и 5). Сами задачи представлены в приложении. Первое место занял студент Ванелик В. А. (АТ-401), второе – Петухова А. С. (АС-408) и третье – Васильева А. А. (АТ-402).

Подобные мероприятия повышают мотивацию студента к обучению и способствуют раскрытию их инженерной мысли. Отличившиеся на олимпиаде студенты были награждены памятными грамотами и призами, а «лучшие из лучших» получили приглашение к участию в работе научной школы кафедры.

Не стоит забывать, что развитие транспорта возможно только при наличии творческих и грамотно мыслящих специалистов. Олимпиада по теоретическим дисциплинам кафедры автоматики и телемеханики на железных

Рис. 1. Командная олимпиада по ТДУ

Рис. 2. Первая команда-победитель по дисциплине ТДУ.
Слева направо: Смышляева В. И. (АС-507), Назаров Р. С. (АТ-502), Фолленвейдер Д. С. (АТ-502), Филиппова У. И. (АТ-502)

Рис. 3. Вторая команда-победитель по дисциплине ТДУ.
Слева направо: Растобарова Ю. А. (АТ-503), Иванов К. А. (АТ-503), Пушкин И. А. (АТ-501)

Рис. 4. Олимпиада по ОТД

Рис. 5. Победитель олимпиады по ОТД – студент факультета автоматизации и интеллектуальных технологий Ванелик В. А. (АТ-401)

дорогах позволяет будущим специалистам стать на ступеньку выше в инженерном деле.

Библиографический список

1. Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения в XX – начале XXI в. /

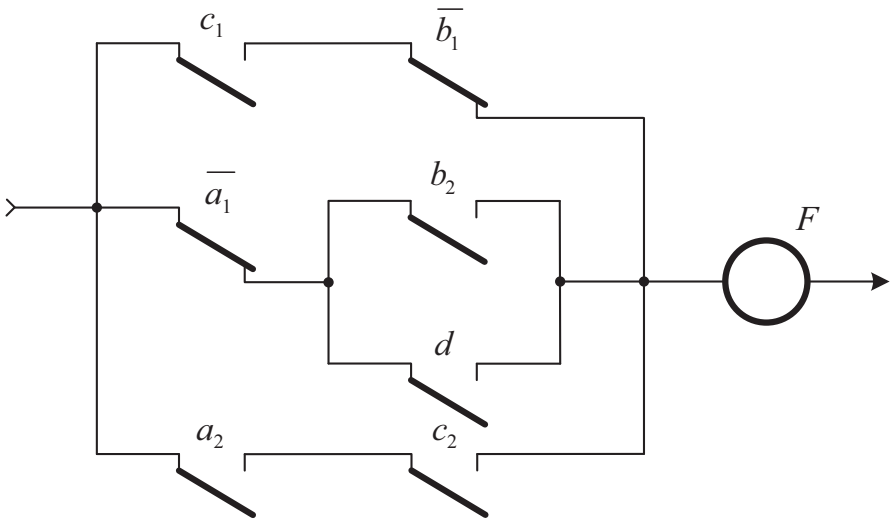
Вал. В. Сапожников, М. Н. Василенко, П. Е. Булавский, А. Б. Никитин, А. А. Лыков, О. А. Наседкин, В. В. Нестеров, В. Б. Соколов, М. Б. Соколов ; под ред. Вал. В. Сапожникова, Вл. В. Сапожникова. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2009. – 346 с.
2. Труды по теории синтеза и диагноза конечных автоматов и релейных устройств / Под ред. Вал. В. Сапожникова, Вл. В. Сапожникова. – СПб. : Элмор, 2009. – 900 с.
3. Ефанов Д. В. Научно-практический семинар «Автоматика и дискретная математика» / Д. В. Ефанов, В. В. Дмитриев // Сборник трудов научно-практической конференции «Проблемы безопасности и надежности микропроцессорных комплексов» ; под ред. Вал. В. Сапожникова. – СПб. : ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. – С. 180–186.
4. Никитин А. Б. Развитие научной школы кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I / А. Б. Никитин // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. – № 4. – С. 433–451.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Олимпиадные задачи по дисциплине «Основы технической диагностики»

Задачи, оцениваемые на 1 балл

1. Определить, какое количество одиночных и кратных неисправностей возможно в приведенной схеме.



2. Привести пример логической схемы, для которой любая одиночная константная неисправность будет транслироваться на выход. Дать обоснование и доказательство этого факта для приведенной схемы.

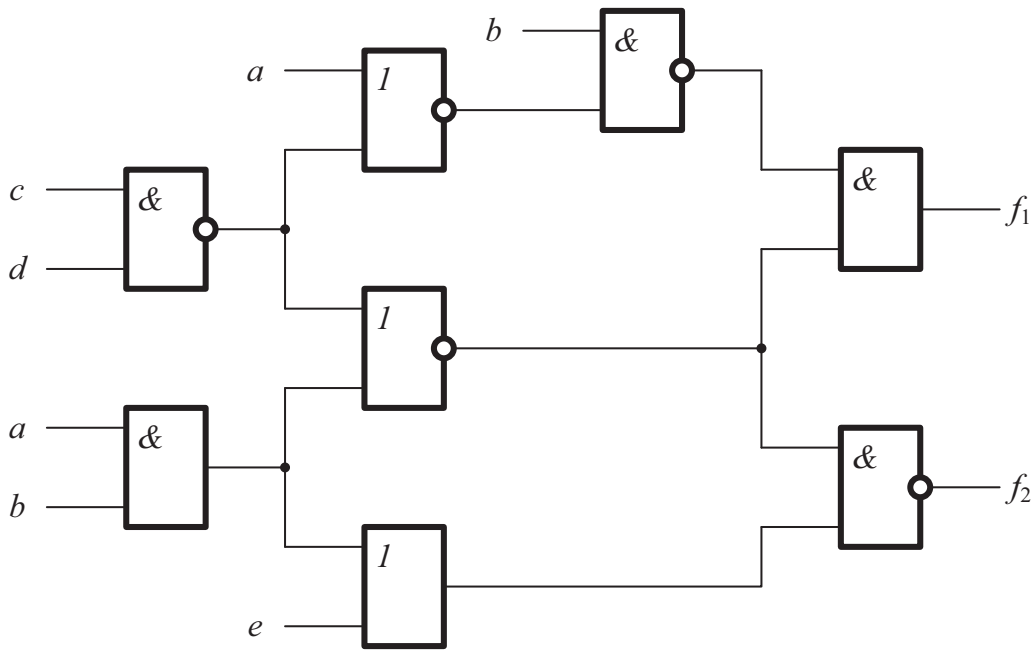
3. Установить, какие элементарные функции алгебры логики могут быть использованы для сравнения эталонных и рабочих сигналов в схемах контроля.

4. Записать в парафазном виде функцию сложения по модулю два. Синтезировать схему.

Задачи, оцениваемые на 2 балла

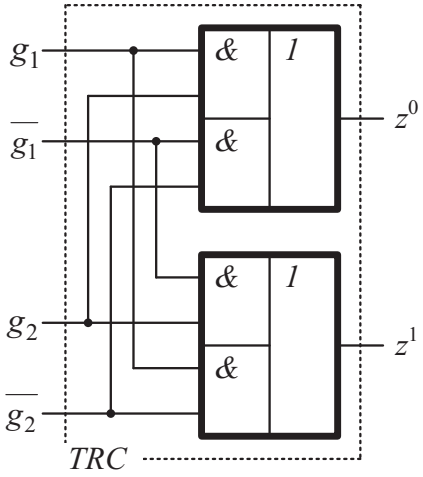
5. Построить одиночный проверяющий тест для полного сумматора.

6. Записать эквивалентную нормальную форму для выходов заданной схемы.

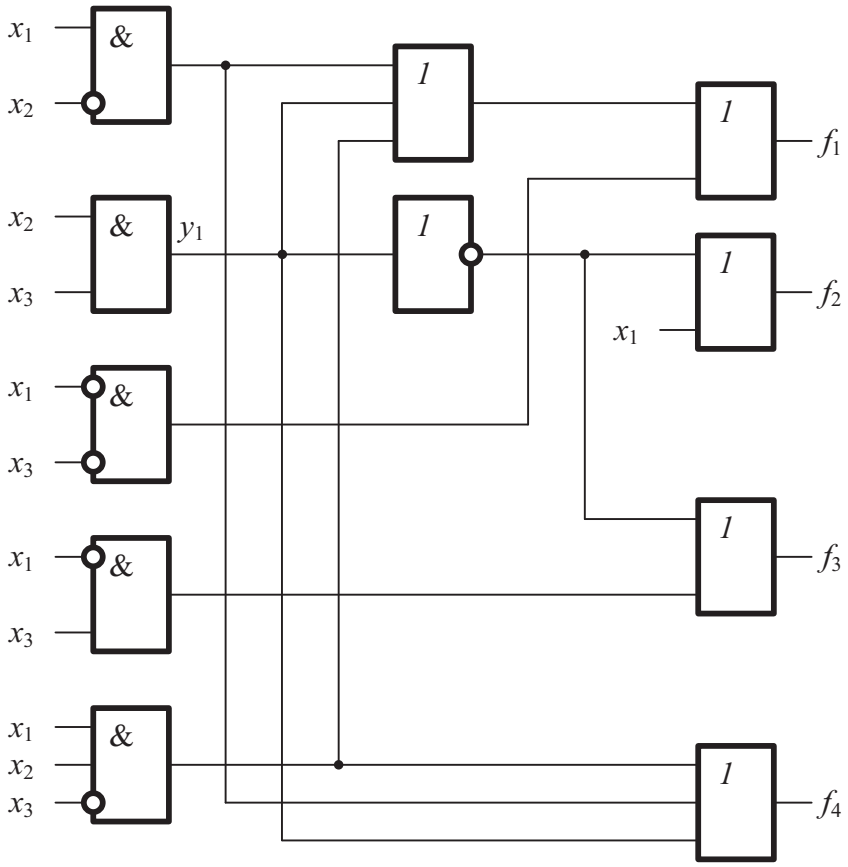


Задачи, оцениваемые на 3 балла

7. Найти множество тестовых комбинаций для полной проверки самопроверяемого модуля сжатия парафазных сигналов.



8. Возможна ли организации контроля заданной схемы на основе кода Бергера со 100%-м обнаружением искажений в выходном векторе $<f_1 f_2 f_3 f_4>$? Дать обоснование.

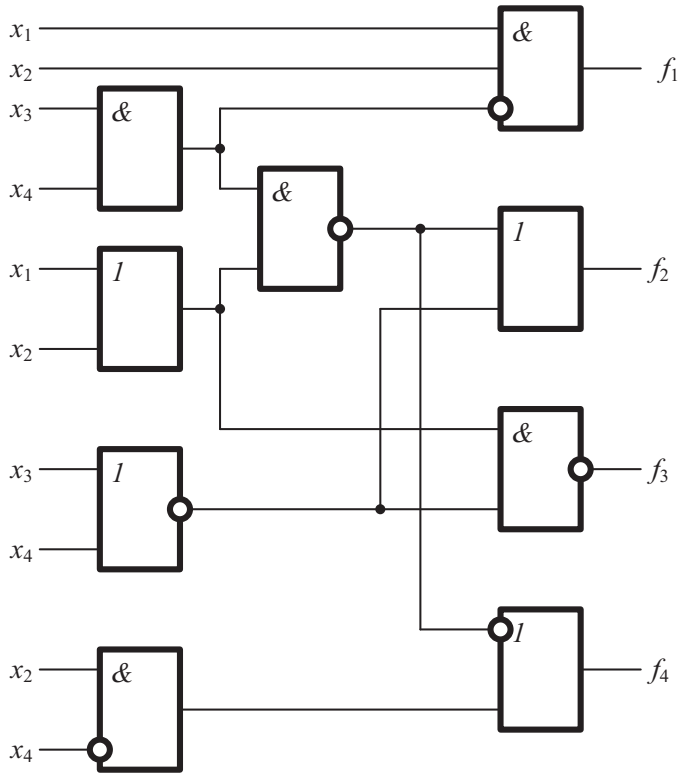


9. Почему, если $\frac{\partial f_i}{\partial y_t} \cdot \frac{\partial f_j}{\partial y_t} = 0,$ то выходы f_i и f_j независимы относительно неисправности выхода элемента y_t? Привести обоснование.

10. Синтезировать полный сумматор с маскировкой одиночных неисправностей.

11. Построить одиночный проверяющий тест для синхронного *RS*-триггера.

12. Указать и обосновать, на каком количестве входных наборов будут возникать необнаруживаемые искажения выходного вектора $<f_1 f_2 f_3 f_4>$ при контроле заданной схемы на основе кода паритета.



Задачи, оцениваемые на 4 балла

13. Почему в схеме, функции которой являются монотонными, можно обнаруживать любые одиночные неисправности на основе кода Бергера? Привести пример.

Задачи, оцениваемые на 5 баллов

14. Имеется схема с тремя входами и тремя выходами. Изобразить такую топологию схемы, в которой со всеми тремя выходами будет связан путями хотя бы один логический элемент, но при этом на всех входных наборах не будет возможно возникновение трехкратной ошибки в выходном векторе.

Максимальное количество баллов – 35.

Dmitry V. Efanov
«Automation and remote control on raylways» department
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

The third Olympiad on theoretical disciplines of automation and remote control on railways department at Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university

«The theory of building safe operation systems» Olympiad in the course of academic disciplines is held annually at the chair of «Automation and telemechanics on railroads» in order to promote transportation science and boost students' motivation in the sphere of educational activities. The third Olympiad has already been held this year gathering 74 students of «Automation and intelligent technologies» faculty at Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. The note presents the outcome of the event in question.

railway automatics and telemechanics; theory of discrete devices; fundamentals of technical diagnostics; Olympiad; students

References

1. «Automation and remote control on railways» department of Petersburg state transport university in 20th century – in the early of 21st century [Kafedra «Avtomatika i telemekhanika na zheleznyh dorogah» Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya v XX – nachale XXI v] / Val. V. Sapozhnikov, M. N. Vasilenko, P. E. Bulavskij, A. B. Nikitin, A. A. Lykov, O. A. Nasedkin, V. V. Nesterov, V. B. Sokolov, M. B. Sokolov; ed. Val. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov. St. Petersburg, PSTU [SPb, PGUPS], 2009. – 346 p.
2. Proceedings on the theory of synthesis and diagnosis of finite state machines and relay devices [Trudy po teorii sinteza i diagnoza konechnyh avtomatov i relejnyh ustrojstv]. Eds. Val. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov. St. Petersburg, Elmor [St. Petersburg, Elmor], 2009. – 900 p.
3. Efanov D. V., Dmitriev V. V. (2015). Scientific and practical seminar «Automation and discrete mathematics» [Nauchno-prakticheskij seminar «Avtomatika i diskretnaya matematika»]. Proceedings of scientific-practical conference «Problems of safety and reliability of microprocessor complexes» [Sbornik trudov nauchno-prakticheskoj konferencii «Problemy bezopasnosti i nadezhnosti mikroprocessornyh kompleksov»]. Ed. Val. V. Sapozhnikov. St. Petersburg, PSTU [St. Petersburg, PGUPS]. – Pp. 180–186.
4. Nikitin A. B. (2015). The scientific school of «Automation and remote control on railways» department of Petersburg state transport university [Razvitie nauchnoj shkoly kafedry «Avtomatika i telemekhanika na zheleznyh dorogah» Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya Imperatora Aleksandra I]. Automation on transport [Avtomatika na transporte], vol. 1, issue 4. – Pp. 433–451.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Вал. В. Сапожниковым
Поступила в редакцию 02.06.2017, принята к публикации 30.06.2017

ЕФАНОВ Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: TrES-4b@yandex.ru.

© Ефанов Д. В., 2017

СПИСОК СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В 2017 ГОДУ

Автоматизация проектирования

Василенко М. Н., Гордон М. А., Зуев Д. В., Седых Д. В.
Разработка и внедрение средств автоматизированного проектирования железнодорожной автоматики и телемеханики — № 2, с. 250–269

Седых Д. В., Зуев Д. В., Гордон М. А.
Отраслевой формат технической документации на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики.
Часть 1: Концепция создания — № 1, с. 112–128

Седых Д. В., Зуев Д. В., Гордон М. А.
Отраслевой формат технической документации на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики.
Часть 2: Сравнение с форматом railML® — № 2, с. 270–279

Седых Д. В., Зуев Д. В., Гордон М. А.
Отраслевой формат технической документации на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики.
Часть 3: Структура и содержимое — № 3, с. 399–413

Седых Д. В., Зуев Д. В., Гордон М. А.
Отраслевой формат технической документации на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики.
Часть 4: Представление элементов — № 4, с. 563–577

Живучесть, надежность, безопасность

Богданов А. Г., Скороходов Д. А.
Принципы сбора данных об отказах элементов систем управления транспортными средствами — № 4, с. 491–505

Володарский В. А.
Исследование надежности постовых устройств микропроцессорной централизации EBILock 950 — № 4, с. 477–490

Володарский В. А.
Стратегии, критерии и расчет периодичности замен аппаратуры автоматики и телемеханики — № 2, с. 165–177

Горелик А. В., Тарадин Н. А., Веселова А. С., Солдатов Д. В.
Оценка качества технической эксплуатации систем железнодорожной автоматики и телемеханики — № 3, с. 319–334

Комнатный Д. В.
Наведение помех в межсоединениях электронной аппаратуры железнодорожной автоматики импульсами электромагнитного поля — № 3, с. 335–344

Шаманов В. И.
Математические модели надежности систем железнодорожной автоматики и телемеханики — № 1, с. 7–19

Из истории автоматики

Лупал Н. В.
Развитие устройств СЦБ в период империализма (1906–1917 гг.). Часть 1: Сигнализация и связь на железных дорогах — № 1, с. 148–157

Лупал Н. В.
Развитие устройств СЦБ в период империализма (1906–1917 гг.). Часть 2: Регулирование движения поездов, электрожезловая система и перегонная блокировка — № 2, с. 302–311

Лупал Н. В.
Развитие устройств СЦБ в период империализма (1906–1917 гг.). Часть 3: Механическая централизация стрелок и сигналов — № 3, с. 458–469

Лупал Н. В.
Развитие устройств СЦБ в период империализма (1906–1917 гг). Часть 4: Устройства защиты — № 4, с. 625–635

Интеллектуальные системы управления

Дегтярев В. Г., Ходаковский В. А.
Эффективный метод поиска оптимального решения транспортной задачи по критерию минимальной стоимости — № 1, с. 20–38

Краткие сообщения

Ефанов Д. В.
Третья олимпиада по теоретическим дисциплинам кафедры автоматики и телемеханики на железных дорогах Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра — № 4, с. 636–645

Проектирование и тестирование логических устройств

Ефанов Д. В.
Особенности обнаружения ошибок в информационных векторах модифицированных кодов Бергера — № 3, с. 434–457

Пивоваров Д. В.
Организация систем функционального контроля комбинационных логических схем на основе метода логического дополнения по равновесному коду «1 из 5» — № 4, с. 605–624

Пивоваров Д. В.
Синтез JK-триггеров с различными свойствами — № 1, с. 129–147

Сапожников Вал. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.
Алгоритмы синтеза генераторов модульных кодов с суммированием взвешенных переходов с последовательностью весовых коэффициентов, образующей натуральный ряд чисел — № 2, с. 280–301

Сапожников Вал. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.
Выбор модифицированного кода с суммированием единичных информационных разрядов для логических устройств с известной топологией — № 4, с. 578–604

Сапожников Вал. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., Дмитриев В. В.
Код с суммированием взвешенных информационных разрядов без переносов в системах функционального контроля — № 3, с. 314–333

Системы и устройства автоматики и телемеханики

Долгий И. Д., Розенберг И. Н., Баяндурова А. А.
Синтез тесно интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы локомотива на основе аналитической модели его движения — № 4, с. 506–525

Кокурин И. М.
Теоретические и технологические основы построения адаптивной системы диспетчерской централизации — № 3, с. 345–354

Кушпиль И. В., Бут А. Н.
Использование фотоэлектрических модулей для питания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики — № 2, с. 202–215

Наседкин О. А., Ледяев Е. В.
Разработка имитатора характеристик кабельной линии связи сигнализации, централизации и блокировки для испытаний светооптических светодиодных систем — № 3, с. 355–367

Никитин А. Б., Ковкин А. Н.
Использование принципа релейно-полупроводниковой коммутации для управления стрелочными приводами в современных системах горочной централизации — № 2, с. 178–191

Никитин Д. А.
Повышение информативности системы интервального регулирования движения поездов АЛС-ЕН путем использования модульно взвешенного кода с суммированием — № 4, с. 526–545

Шатохин В. А., Порошин А. А.
Комплексный подход к контролю устройств электропитания железнодорожной автоматики и телемеханики — № 2, с. 202–215

Стандартизация и сертификация

Марков Д. С., Наседкин О. А., Васильев Д. А., Бутузов М. А.
Терминологические особенности этапов разработки и доказательства безопасности железнодорожной автоматики и телемеханики — № 3, с. 368–379

Техническая диагностика и прогнозирование

Марлей В. Е., Макшанов А. В., Гарибин П. А., Ольховик Е. О., Олейник А. Ю.
Информационная система мониторинга деформаций гидротехнических сооружений на основе интернет-технологий и микроконтроллеров — № 1, с. 54–68

Ефанов Д. В., Седых Д. В., Осадчий Г. В.
Результаты использования системы непрерывного мониторинга железнодорожной контактной подвески на участке Торбино – Боровенка линии скоростного сообщения Санкт-Петербург – Москва — № 1, с. 39–53

Хорошев В. В.
Непрерывный контроль механических параметров подвижных элементов стрелочных переводов — № 1, с. 69–87

Эксплуатация транспортных систем

Аблялимов О. С.
Анализ перевозочной работы электровозов 3 ВЛ80 с на участке Мароканд – Каттакурган в условиях эксплуатации — № 2, с. 216–234

Электронное моделирование

Арипов Н. М., Баратов Д. Х.
Методика построения математической модели электронного документооборота технической документации железнодорожной автоматики — № 1, с. 98–111

Василенко М. Н., Ковалев Р. А. Метод выделения структуры принципиальной электрической схемы железнодорожной автоматики и телемеханики при распознавании печатной документации	№ 1, с. 88–97
Никитчин А. А., Богданов Н. А., Рыбкин В. С. Анализ существующих программных комплексов для построения геоинформационной системы управления работой структурных подразделений ОАО «РЖД»	№ 4, с. 546–562
Черных А. К., Яшин М. Г. Концептуальные принципы синтеза моделей управления организационными системами, функционирующими в реальном масштабе времени	№ 3, с. 380–398
Шарова В. О. Моделирование пассажиропотока на станции «Киевская» Московского метрополитена	№ 2, с. 235–249

LIST OF ARTICLES PUBLISHED IN 2017

Computer-aided design

Vasilenko M. N., Gordon M. A., Zuev D. V., Sedykh D. V.
Development and implementation of tools of computer aided design of railway automation and remote control systems — N 2, Pp. 250–269

Sedykh D. V., Zuev D. V., Gordon M. A.
Industry framework for technical documentation for railway automation and remote control devices. Part 1: Concept of design — N 1, Pp. 112–128

Sedykh D. V., Gordon M. A., Zuev D. V.
Branch format of technical documentation on devices of railway automation and remote control. Part 2: Comparison with railML® format — N 2, Pp. 270–279

Sedykh D. V., Zuyev D. V., Gordon M. A.
Branch format of technical documentation on devices of railway automatics and telemechanics. Part 3: Structure and contents — N 3, Pp. 399–413

Sedykh D. V., Zuyev D. V., Gordon M. A.
Branch format of technical documentation on devices of railway automation and remote control. Part 4: Presentation of elements — N 4, Pp. 563–577

Viability, reliability, safety

Bogdanov A. G., Skorokhodov D. A.
Principles of data gathering about refusals of the equipment of vehicles at their operation — N 4, Pp. 491–505

Volodarskiy V. A.
The study of EBILock 950 interlocking tower equipment reliability — N 4, Pp. 477–490

Volodarsky V. A.
Strategies, criteria and calculation of replacement periodicity of automation and remote control equipment — N 2, Pp. 165–177

Gorelik A. V., Taradin N. A., Vesyelova A. S., Soldatov D. V.
Quality assessment of railway automatics and telemechanics *maintenance systems* — N 3, Pp. 319–334

Komnatniy D. V.
Interference induction in interconnections of electronic installations of railway automatics by means of electromagnetic fi eld momentum — N 3, Pp. 335–344

Shamanov V. I.
Mathematical models of reliability of systems railway automation and teleautomatics — N 1, Pp. 7–19

History of automation

Lupal N. V.
Development of signaling, centralization and blocking devices during the period of imperialism (1906–1917). Part 1: Railway signalling and communication — N 1, Pp. 148–157

Lupal N. V.
Development of signaling devices in the period of imperialism (1906–1917). Part 2: Regulation of traffic, electric rod system and open line block — N 2, Pp. 302–311

Lupal N. V.
Signals and interlocking development during imperialism (1906–1917). Part 3: Mechanical interlocking of points and signals — N 3, Pp. 458–469

Lupal N. V.
Signals and interlocking development during imperialism (1906–1917). Part 4: Safety devices — N 4, Pp. 625–635

Intelligent control systems

Degtyarev V. G., Khodakovsky V. A.
Efficient method of searching the optimum solution of transportation problem by minimum price criterion — N 1, Pp. 20–38

Brief papers

Efanov D. V.
The third Olympiad on theoretical discilines of automation and remote control on railways department at Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university — N 4, Pp. 636–645

Design and test of logical devices

Efanov D. V.
The peculiarities of error detection in data vectors of modifi ed Berger codes — N 3, Pp. 434–457

Pyvovarov D. V.
Organization of functional control systems of combinational logical circuits on the basis of Boolean complement method with «one-out-of-five» constant-weight code — N 4, Pp. 605–624

Pivovarov D. V.
Synthesis of JK flip-flops with different characteristics — N 1, Pp. 129–147

Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V.
Algorithms of synthesis of generators of modulo codes with summation of weighted transitions with sequence of weight coefficients forming natural series of numbers — N 2, Pp. 280–301

Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V.
The selection of a modified code with summation of unit data bits for logical units with a given topology — N 4, Pp. 578–604

Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V., Dmitriev V. V.
Code with summation of weighted data bits without carries within concurrent error detection systems — N 3, Pp. 414–433

Systems and devices of automation and remote control

Dolgy I. D., Rozenberg I. N., Bayandurova A. A.
The synthesis of the tight coupling inertial-satellite navigation system *locomotive based on the analytical model of it's movement* — N 4, Pp. 506–525

Kokurin I. M.
Theoretical and technological foundation of constructing a self-organizing centralized traffi c control system — N 3, Pp. 345–354

Kushpil' I. V., But A. N.
Use photovoltaic modules for powering signaling interlocking and blocking devices — N 2, Pp. 202–2015

Nasedkin O. A., Ledyayev E. V.
A simulator of signalling, centralization and blocking cable line characteristics for light-optical light-emitting-diode systems' testing — N 3, Pp. 368–379

Nikitin A. B., Kovkin A. N.
Using the principle of relay-semiconductor communication for controlling points in modern hump interlocking systems — N 2, Pp. 178–191

Nikitin D. A.
Information capacity improvement of collision avoidance system for integrated continous automatic cab signaling trains movement by means of modular weighted summation code — N 4, Pp. 526–545

Shatokhin V. A., Poroshin A. A.
Integrated approach to monitoring of electric power supplies for railway automation and remote control — N 2, Pp. 192–201

Standardization and certification

Markov D. S., Nasedkin O. A., Vasilyev D. A., Butuzov M. A.
Terminological peculiarities of stages of railway automatics and telemechanics safety development and proving — N 3, Pp. 368–379

Technical diagnostics and prediction

Marley V. E., Makshnov A. V., Garibin P. A., Ol`khovik E. O., Olejnik A. Yu.
Information system of deformation processes monitoring of hydraulic structures, based on internet technologies and microcontrollers — N 1, Pp. 54–68

Osadchy G. V., Sedykh D. V., Efanov D. V.
Results of using the continuous monitoring system for railway overhead catenary at the section Torbino – Borovenka of speed line St. Petersburg – Moscow
N 1, Pp. 39–53

Khoroshev V. V.
Continuous monitoring of mechanical parameters of point switch moving parts
N 1, Pp. 69–87

Operation of transport systems

Ablyalimov O. S.
Analysis of transportation working by 3VL80^{S} electric locomotives on Marokand – Kattakurgan railway area in operational conditions
N 2, Pp. 216–234

Electronic simulation

Aripov N. M., Baratov D. Kh.
Methods of building the mathematical mode of electronic document management of technical documentation for railway automation
N 1, Pp. 98–111

Vasilenko M. N., Kovalev R. A.
Method of selection the structure of fundamental electric circuit of railway automation and remote control during the recognition of printed documentation
N 1, Pp. 88–97

Nikitchin A. A., Bogdanov N. A., Rybkyn V. S.
The analysis of the existing software systems with the purpose of building a geographic information control system of JSC «Russian Railways» departments
N 4, Pp. 546–562

Chernykh A. K., Yashin M. G.
Conceptual principles of control models' synthesis of organizational systems, functioning on a real-time basis
N 3, Pp. 380–398

Sharova V. O.
Simulation of passenger traffic on the subway station «Kievskaya»
N 2, Pp. 235–249

Подписано в печать с оригинал-макета 27.12.2017. Формат 60×84/9,5. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 19,4. Уч.-изд. л. 11,5. Установочный тираж 500 экз. Заказ 7. Цена свободная.
Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО ПГУПС. 190031, СПб., Московский пр., 9.