Автоматика на транспорте

Automation on Transport

№ 1

Том 2

Март, 2016
March, 2016

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»

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала
Перевод на английский язык *О. В. Керханиди, А. А. Блюдова*
Литературное редактирование и корректура *И. А. Шабранской*
Верстка *А. А. Стукановой*

Journal staff
English translation *O. V. Kerkhanidi, A. A. Blyudov*
Editing and proofreading *I. A. Shabranskaya*
Layout *A. A. Stukanova*

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016

© PSTU, 2016

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

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,
ответственный секретарь журнала
«Автоматика на транспорте»,
ПГУПС, Санкт-Петербург

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

Бестемьянов Петр Филимонович
доктор техн. наук, профессор,
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,
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

Aleksander 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

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

Editorial team

Aleksander B. Nikitin
D. Sc., Professor, deputy editor-in-chief of «Automation on Transport», Petersburg State Transport University, St. Petersburg

Dmitry V. Efanov
Ph. D., executive editor of «Automation on Transport», Petersburg State Transport University, St. Petersburg

Leonid A. Baranov
D. Sc., Professor, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow

Petr F. Bestemiyanov
D. Sc., Professor, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow

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

Michael N. Vasilenko
D. Sc., Professor, 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, 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, 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, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow

Valentin A. Khodakovsky
D. Sc., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg

СОДЕРЖАНИЕ

Системы и устройства автоматики и телемеханики

Никитин А. Б., Ковкин А. Н.
Использование функциональных преобразователей с несимметричным отказом для управления электроприводами переменного тока 7

Интеллектуальные системы управления

Таранец О. И.
Моделирование скатывания отцепов с сортировочной горки в условиях действия случайных факторов 19

Никищенков С. А., Фокеев А. Б.
Эмулятор графиков движения поездов и работы станций 35

Стандартизация и сертификация

Бочков К. А., Харлап С. Н., Сивко Б. В.
Разработка отказоустойчивых систем на основе диверситетных аксиоматических базисов 47

Техническая диагностика и прогнозирование

Иванов А. А., Легоньков А. К., Молодцов В. П.
Передача данных с устройств оборудования переезда аппаратурой АПК-ДК при отсутствии физической линии и круглосуточного дежурства 65

Электронное моделирование

Булавский П. Е., Марков Д. С.
Методика оценки временных характеристик процессов электронного документооборота технической документации 81

Проектирование и тестирование логических устройств

Сапожников Вал. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., Дмитриев В. В., Черепанова М. Р.
Способ построения кода с суммированием с улучшенными показателями обнаружения ошибок в информационных векторах 95

Из истории автоматики

Ефанов Д. В.
Становление и перспективы развития систем функционального контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики 124

Лупал Н. В.
Развитие устройств СЦБ в период промышленного капитализма (1861–1900 гг.). Часть 3: Регулирование движения на перегонах 149

CONTENTS

Automation and remote control systems and devices

Nikitin A. B., Kovkin A. N.
Using of functional generators with asymmetrical failure for AC electric drive control 7

Intelligent control systems

Taranets O. I.
The simulation of rolling cuts from hump in the random factors action 19

Nikishchenkov S. A., Fokeev A. B.
Emulator of train schedule and work of stations 35

Standardization and certification

Bochkov K. A., Kharlap S. N., Sivko B. V.
Design of axiomatic based fault-tolerant systems 47

Technical diagnostics and prediction

Ivanov A. A., Legon`kov A. K., Molodtsov V. P.
Data transmission from APK-DK devices of rail crossing under the absence of physical link and clock duty 65

Electronic Simulation

Bulavsky P. E., Markov D. S.
The method of estimation of time characteristics of execution of processes of technical documentation electronic management 81

Design and test of logical devices

Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V., Dmitriev V. V., Cherepanova M. R.
Method of formation of sum code with improved efficiency of error detection in data vectors 95

History of automation

Efanov D. V.
Becoming and development prospects of concurrent error detection and monitoring systems of railway automation and remote control devices. 124

Lupal N. V.
Development of signaling, centralization and blocking devices during the period of industrial capitalism (1861–1900). Part 3: Traffic control on open lines. 149

Системы и устройства автоматики и телемеханики

УДК 621.313.333+656.257

А. Б. Никитин, д-р техн. наук,
А. Н. Ковкин, канд. техн. наук
Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»,
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С НЕСИММЕТРИЧНЫМ ОТКАЗОМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В статье рассмотрены особенности использования мостовых преобразовательных схем для управления двигателями переменного тока в компьютерных системах железнодорожной автоматики. Особое внимание уделено оценке коэффициента полезного действия преобразовательных схем и показано, что применение низкочастотных режимов работы силовых ключей позволяет существенно повысить эффективность преобразователей в составе устройств сопряжения. Предложено техническое решение для реализации пятипроводных схем управления двигателями переменного тока, представляющее собой пятифазную мостовую схему преобразования. Выполнен краткий обзор современной элементной базы, используемой для построения инверторов, дана оценка электронных компонентов с точки зрения возможности подбора аналогов. Кроме того, рассмотрены вопросы применения в составе функциональных преобразователей электромагнитных реле, обеспечивающих повышение надежности и электробезопасности аппаратуры.

функциональный преобразователь; электропривод; трехфазный асинхронный двигатель; безопасное управление; инвертор; мостовая схема; коэффициент полезного действия; широтно-импульсная модуляция; транзисторы с изолированным затвором; малогабаритные реле; механическое размыкание цепи

Введение

Управление напольными объектами в компьютерных системах автоматики железных дорог требует использования специальных устройств сопряжения, имеющих несимметричную характеристику отказов. Такие устройства могут создаваться на основе элементов с несимметричным отказом, в качестве кото-

рых чаще всего рассматриваются электромагнитные реле первого класса надежности. Однако более прогрессивным решением является использование бесконтактных схем на основе полупроводниковой элементной базы. Безопасность в этом случае обеспечивается либо за счет применения функциональных преобразователей с несимметричным отказом, обеспечивающих активизацию исполнительного объекта только при условии динамической работы полупроводниковых элементов, либо путем периодической проверки исправности полупроводниковых ключей и отключения питания от исполнительных объектов в случае обнаружения отказа [1–5].

Безопасное управление электрическими приводами может быть реализовано путем использования всех перечисленных выше методов. В настоящее время наибольшее распространение получают приводы на основе трехфазных асинхронных двигателей переменного тока, существенным преимуществом которых является отсутствие щеточно-коллекторного узла [5]. Важным свойством таких двигателей является то, что вращение ротора возможно лишь при подаче на обмотки двигателя переменного напряжения. Более того, вращение таких двигателей под нагрузкой возможно только при наличии трехфазного напряжения, создающего в обмотках двигателя вращающееся магнитное поле. Указанные особенности трехфазных асинхронных двигателей делают весьма привлекательным использование для управления электроприводами функциональных преобразователей с несимметричным отказом. Схемное решение функциональных преобразователей представляет собой обычный инвертор, преобразующий постоянное напряжение источника питания в переменное трехфазное напряжение, необходимое для работы двигателя.

1 Особенности работы трехфазных инверторов при управлении двигателями в системах железнодорожной автоматики

Преобразователи для трехфазных асинхронных двигателей переменного тока обычно строятся с использованием мостовой схемы [6, 7], формирующей переменное напряжение, необходимое для получения вращающегося магнитного поля в статоре двигателя. Такие преобразователи часто применяются в случаях, когда необходимо обеспечивать работу асинхронных двигателей при отсутствии трехфазной электросети. Кроме того, трехфазные инверторы незаменимы для создания приводов с регулируемой частотой вращения. Частота вращения асинхронного двигателя достаточно жестко связана с частотой питающего напряжения, поэтому задача регулирования частоты вращения сводится к изменению частотных параметров управляющих сигналов на силовых ключах инвертора. Известно, что крутящий момент асинхронного двигателя определяется величиной тока, протекающего через его обмотки. Сопротивление обмоток имеет индуктивный характер, а значит, зависит от частоты. Поэтому,

для поддержания постоянного крутящего момента при изменении частоты вращения, необходимо иметь возможность регулирования напряжения на обмотках двигателя [6]. Это достигается путем использования широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Применение ШИМ позволяет не только регулировать величину напряжения, но и получать форму напряжения, максимально приближенную к синусоиде.

При построении устройств сопряжения, обеспечивающих управление нагрузками мощностью порядка сотен ватт, значимым параметром является коэффициент полезного действия (КПД). Величина КПД важна не только с точки зрения экономии электроэнергии. Данный параметр оказывает непосредственное влияние на массогабаритные показатели устройств, поскольку от величины рассеиваемой мощности зависят габариты теплоотводов в силовых схемах. Кроме того, значительные потери мощности на устройствах сопряжения могут привести к необходимости организации принудительного охлаждения, что повышает стоимость оборудования и способствует снижению его надежности.

Наибольшие потери мощности в преобразовательных схемах имеют место на коммутационных элементах и трансформаторах (при наличии последних). Важным преимуществом мостовых схем преобразования является то, что в случаях, когда не требуется гальваническая развязка и нет необходимости в масштабировании напряжения, нагрузка может подключаться к коммутационным элементам без использования трансформатора. В этом случае при определении КПД учитываются только потери мощности на силовых ключах. При оценке величины КПД принято отдельно рассматривать статические потери (потери проводимости) и динамические потери (потери переключения) [6, 8]. Потери проводимости возникают во время нахождения силовых ключей в открытом состоянии и определяются падением напряжения на ключах при протекании через них тока. Потери переключения возникают в периоды открывания и закрывания ключей, и их величина находится в прямой зависимости от частоты переключения. Использование ШИМ обычно сопряжено с высокой частотой работы ключей, что приводит к наличию значительных потерь переключения. Поэтому применение ШИМ в функциональных преобразователях устройств сопряжения должно быть обоснованным.

Особенностью использования преобразователей для управления двигателями является отсутствие необходимости в обеспечении синусоидальной формы выходного напряжения. Кроме того, при разработке устройств сопряжения для управления стрелочными приводами в системах централизации не ставится задача регулирования частоты вращения и величины напряжения на двигателе. Это означает, что в данной области применения можно отказаться от использования ШИМ и реализовать низкочастотный режим работы силовых ключей, при котором частота переключения будет иметь величину 50 Гц (рис. 1). При такой частоте динамическими потерями можно пренебречь и КПД мостовой схемы будет определяться исключительно потерями проводимости. Это дает

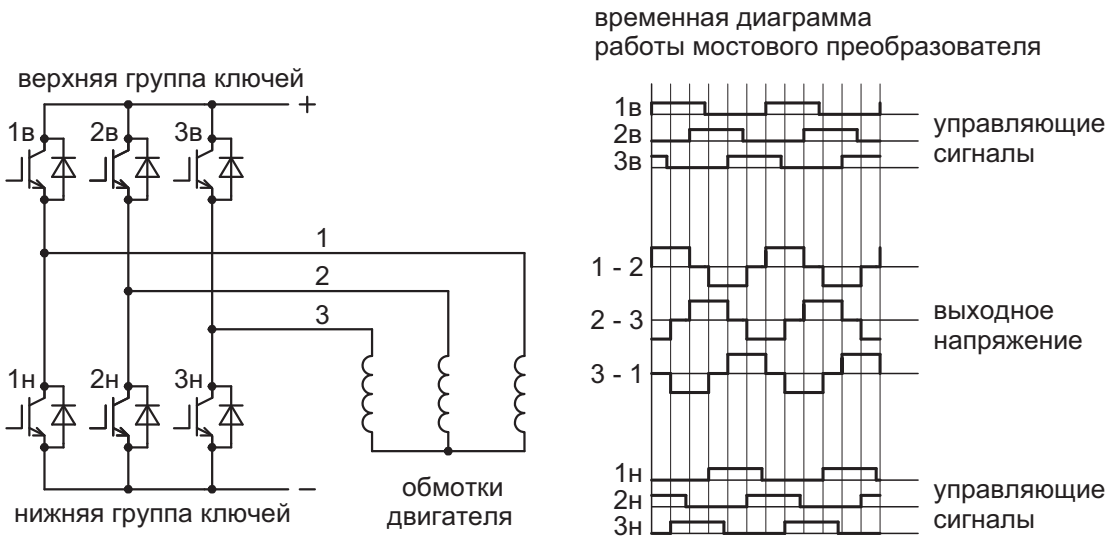

Рис. 1. Управление трехфазным асинхронным двигателем с помощью мостового преобразователя с низкочастотным режимом работы силовых ключей

возможность создавать преобразователи, имеющие КПД выше 95 %. Форма напряжения между фазами будет иметь прямоугольный характер с длительностью импульсов, равной 2/3 от длительности полупериода. Амплитуду напряжения на выходе преобразователя можно считать равной величине постоянного напряжения, подаваемого на мостовую схему. Если питание мостовой схемы осуществляется путем выпрямления и сглаживания переменного напряжения 220 В, на шине питания инвертора будет присутствовать постоянное напряжение около 300 В, а действующее значение выходного напряжения инвертора будет иметь величину порядка 200 В. Это дает возможность осуществлять управление трехфазными асинхронными двигателями МСТ-0,3 и их аналогами с напряжением питания 190 В$^{+30}_{-5}$% [9] без использования трансформаторов.

Высокий КПД в сочетании с повторно-кратковременным режимом работы электроприводов позволяет существенно снизить требования к отводу тепла от силовых компонентов преобразователя. Это означает, что радиаторы в таких устройствах могут иметь незначительные размеры, что, наряду с отсутствием трансформатора, способствует существенному уменьшению габаритов изделия в целом. Таким образом, функциональный преобразователь для управления трехфазными асинхронными двигателями стрелочных электроприводов, использующий низкочастотный режим работы ключей, представляет собой относительно технологичное и компактное электронное изделие, которое может составить достойную конкуренцию устройствам сопряжения, в которых используются иные принципы безопасного управления.

Примером использования трехфазного мостового преобразователя для управления стрелочным электроприводом переменного тока является аппаратура безопасного сопряжения в системе МПЦ-МПК [10]. В последней модификации данной аппаратуры управление стрелочным приводом, контроль положения

стрелки, а также ряд функций, связанных с диагностикой напольного оборудования, реализуются с помощью модуля, выполненного в конструктиве «Евромеханика» и имеющего габариты 262×250×50 мм.

Вместе с тем в некоторых случаях используются двигатели, требующие меньшего значения напряжения. Так, на асинхронный двигатель электромеханического автостопа в метрополитенах требуется подавать напряжение 127 В [11], что создает некоторые проблемы с организацией электропитания преобразователей. Одним из путей решения этих проблем можно считать понижение выходного напряжения инвертора за счет использования ШИМ. Применение ШИМ в целях получения напряжений, близких к синусоиде, можно считать оправданным тогда, когда преобразователь используется в качестве резервного источника питания рабочих цепей стрелок в релейных системах электрической централизации, поскольку при использовании прямоугольных напряжений сложно обеспечить нормальную работу фазоконтрольных блоков.

2 Реализация пятипроводных схем управления трехфазными асинхронными двигателями

При использовании трехфазной мостовой схемы для управления стрелочными электроприводами двигатель подключается к преобразователю без контактов автопереключателя. Двигатель останавливают путем прекращения подачи управляющих сигналов на силовые ключи преобразователя по факту получения контроля крайнего положения стрелки. Реверсирование двигателя осуществляется путем изменения порядка подачи управляющих сигналов на ключевые элементы преобразователя. Недостатком данного решения является отсутствие возможности последовательного перевода спаренных стрелок с помощью одного комплекта аппаратуры, поскольку для этого требуется наличие пятипроводной рабочей цепи [12]. Кроме того, существуют приводы, которые в силу своих особенностей требуют обязательного использования многопроводных схем. Таковым, например, является привод электромеханического автостопа на метрополитенах [11].

Использование в типовых схемах для данного привода пяти проводов рабочей цепи связано с наличием в его составе токоограничивающих дросселей, которые включаются в цепь после открытия автостопа для снижения потребляемой мощности в режиме удержания. Удачным решением для управления подобными приводами является использование многофазных преобразовательных схем. Так, для управления электромеханическим автостопом предложена пятифазная мостовая схема преобразования (рис. 2).

Особенностью функционирования данной схемы является то, что в процессе формирования трехфазного переменного напряжения для двигателя работают три из пяти пар ключей. При этом пара ключей *5* является общей для обоих

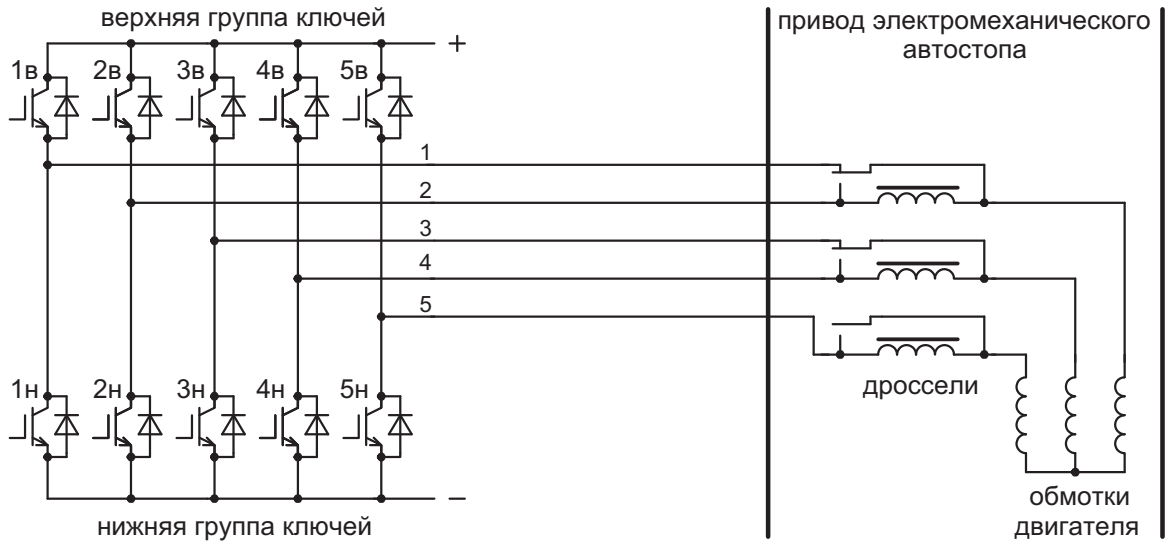

Рис. 2. Использование пятифазной схемы преобразования для управления электромеханическим автостопом

направлений вращения двигателя, а остальные пары используются в зависимости от необходимого направления. При открытии и удержании автостопа задействованы пары *2* и *4*. При закрытии автостопа работают пары *1* и *3*, питающие две обмотки двигателя в обход токоограничивающих дросселей.

3 Элементная база функциональных преобразователей, используемых для управления электроприводами

В современных схемах преобразователей для мощностей до нескольких десятков киловатт в качестве коммутационных приборов используются полевые транзисторы с изолированным затвором (МОП-транзисторы) или биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT-транзисторы) [6, 8]. Основным достоинством транзисторов с изолированным затвором является незначительное потребление мощности от источника управляющих сигналов, что позволяет использовать для формирования сигналов управления относительно несложные схемотехнические решения, реализуемые, как правило, в микроэлектронном исполнении. При разработке преобразователей для электрических приводов предпочтительным является использование IGBT-транзисторов. Эти транзисторы сочетают в себе положительные качества полевых и биполярных приборов и при величинах рабочего напряжения порядка нескольких сотен вольт имеют меньшую, чем у МОП-транзисторов, величину статических потерь. Диоды, включенные параллельно транзисторам, предназначены для рекуперации энергии, накапливаемой в индуктивной составляющей нагрузки преобразователя. Указанные диоды, как правило, входят в состав современных силовых транзисторов, разработанных для использования в преобразовательных схемах.

Следует отметить, что преобразователи часто выполняются не на отдельных транзисторах, а в виде микросборок, включающих в себя необходимый набор силовых компонентов [6]. В ряде случаев в состав таких микросборок входят схемы формирования управляющих сигналов и схемы защиты преобразователя при аварийных режимах работы. Такие микросборки принято называть интеллектуальными силовыми модулями (IPM). Применение IPM вместо отдельных транзисторов и микросхем является прогрессивным вариантом, поскольку упрощает схемотехнику изделия и уменьшает его габариты. Вместе с тем необходимо учитывать, что в настоящее время конструктивное и схемотехническое исполнение подобных микросборок не стандартизировано. Указанный фактор существенно усложняет подбор аналогов для силовых элементов преобразователей. Поэтому, по мнению авторов, использование отдельных силовых ключей сохраняет актуальность, поскольку позволяет уменьшить зависимость разработчиков от продукции конкретных производителей электронных компонентов.

Управляющие сигналы для силовых ключей трехфазного мостового преобразователя теоретически могут генерироваться вычислительными средствами системы автоматики. Однако на практике предпочтительным является использование отдельного генератора управляющих сигналов. Объясняется это стремлением к более эффективному использованию вычислительных ресурсов системы, а также необходимостью исключения повреждения силовых компонентов при возникновении сбоев в работе управляющего вычислительного комплекса. Ранее для построения таких генераторов использовались транзисторные и микроэлектронные схемы с «жесткой логикой» [8]. Сегодня для этой цели используются микроконтроллеры, что позволяет значительно упростить схемные решения, реализовать более совершенные алгоритмы работы, а также обеспечить легкую перенастройку временных параметров управляющих сигналов без изменения аппаратных средств. Безопасное управление генератором можно обеспечивать разными способами: например, путем подачи питания на генератор от маломощного функционального преобразователя с несимметричным отказом, работающего под воздействием динамических сигналов от управляющего вычислительного комплекса.

При разработке систем железнодорожной автоматики необходимо обеспечивать высокий уровень надежности аппаратуры. Одним из способов повышения надежности является резервирование аппаратных средств. При резервировании устройств сопряжения необходимо учитывать, что выходы основного и резервного комплектов аппаратуры фактически объединены между собой, поскольку работают на одни и те же напольные объекты. Это отрицательно сказывается на эффективности резервирования, поскольку отказы одного комплекта аппаратуры могут влиять на работоспособность другого комплекта. Для снижения вероятности такого влияния желательно иметь возможность механического размыкания выходной цепи неиспользуемых в текущий момент времени аппаратных средств. Более того, механическое размыкание цепи можно использовать

как самостоятельный метод повышения надежности аппаратуры в условиях воздействия перенапряжений, поступающих из кабельных линий, соединяющих устройства сопряжения и исполнительные объекты. Наконец, применение механического размыкания является действенным методом обеспечения электробезопасности для обслуживающего персонала. Это особенно актуально при отсутствии трансформаторов на выходе силовых схем, поскольку в этом случае при пробое силовых ключей существует вероятность появления на элементах кабельной сети и напольных объектов постоянного напряжения опасной для человека величины.

Единственным методом реализации механического размыкания цепи является использование электромагнитных реле или подобных им устройств (например, контакторов). При наличии функционального преобразователя с несимметричным отказом нет необходимости в применении реле, удовлетворяющих требованиям первого класса надежности, и могут быть использованы широко распространенные и недорогие малогабаритные реле, предназначенные для монтажа на печатную плату. Единственное требование к этим реле состоит в том, чтобы их контактная система была рассчитана на рабочий ток, протекающий в цепи исполнительного объекта. Управление этими реле должно быть реализовано таким образом, чтобы включение реле происходило до начала работы преобразователя, а выключение – после окончания работы преобразовательной схемы. Это позволит обеспечить работу реле в режиме коммутации при нулевом токе, исключив тем самым образование дуги и искрения на контактах. В результате срок службы реле будет соответствовать его механическому ресурсу, который обычно на порядок выше электрического ресурса реле при номинальной нагрузке. Поэтому в большинстве случаев ресурс реле не будет являться ограничивающим фактором при определении срока службы аппаратуры. Таким образом, применение электромагнитных реле в составе устройств сопряжения на основе функциональных преобразователей можно считать целесообразным, поскольку это способствует повышению надежности и электробезопасности. При этом термин «бесконтактное устройство сопряжения» будет иметь относительный характер и означать, что полупроводниковая элементная база в таких устройствах обеспечивает безопасность управления, а также берет на себя задачу коммутации рабочего тока в цепи, устраняя тем самым основные недостатки традиционных релейных схем.

Заключение

Использование функциональных преобразователей с несимметричным отказом является перспективным способом реализации безопасного сопряжения для исполнительных объектов, нечувствительных к постоянному току. Такими объектами являются трехфазные асинхронные двигатели, широко применяемые в электроприводах железнодорожной автоматики.

Одним из важнейших критериев эффективности устройств сопряжения на основе функциональных преобразователей, применяемых для мощных нагрузок, таких как двигатели электроприводов, является коэффициент полезного действия. Для достижения высокого уровня КПД и улучшения массогабаритных показателей следует выбирать технические решения, не требующие использования трансформаторов, и избегать высокой частоты переключения коммутационных элементов. В соответствии с этим наиболее подходящим решением являются мостовые схемы преобразования. Одним из примеров практической реализации данной концепции является аппаратура безопасного сопряжения для управления стрелочными приводами переменного тока в системе МПЦ-МПК.

Применение ШИМ, предусматривающей высокую частоту переключения коммутационных элементов, не должно являться самоцелью для разработчика, и оправдано только в тех случаях, когда это действительно необходимо для решения конкретных задач: например, масштабирования напряжений или обеспечения работы элементов, чувствительных к форме переменного напряжения.

Использование мостовых преобразователей открывает широкие возможности для реализации многопроводных схем управления двигателями, что особенно актуально при управлении приводами электромеханических автостопов на метрополитенах, требующими отдельных проводов для разных направлений работы.

При разработке функциональных преобразователей целесообразно ориентироваться на современную элементную базу, выпускаемую широким кругом производителей электронных компонентов. В составе такой элементной базы следует особо выделить биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT-транзисторы) как наиболее подходящие для управления электроприводами. Помимо полупроводниковых компонентов, в схемах функциональных преобразователей вполне оправдано применение малогабаритных реле, реализующих механическое размыкание цепи, поскольку в ряде случаев это позволяет повысить надежность и электробезопасность аппаратуры.

Библиографический список

1. Гавзов Д. В. Методы обеспечения безопасности дискретных систем / Д. В. Гавзов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 8. – С. 3–50.
2. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов, Д. В. Гавзов ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : Транспорт, 1995. – 272 с.
3. 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. Тря-

сов ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 398 с.
4. Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Методы и принципы обеспечения безопасности микроэлектронных СЖАТ. РТМ 32 ЦШ 1115842.01–94. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 1994. – 120 с.
5. Гавзов Д. В. Сравнительная оценка основных принципов обеспечения безопасности устройств сопряжения с учетом современных достижений в области силовой электроники / Д. В. Гавзов, А. Н. Ковкин // Разработка и эксплуатация новых устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2004. – С. 66–69.
6. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение / П. А. Воронин. – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2001. – 384 с.
7. Готтлиб И. М. Источники питания. Инверторы, конверторы, линейные и импульсные стабилизаторы / И. М. Готтлиб. – М. : Постмаркет, 2000. – 552 с.
8. Семенов Б. Ю. Силовая электроника для любителей и профессионалов / Б. Ю. Семенов. – М. : СОЛОН-Р, 2001. – 327 с.
9. Архипов Е. В. Справочник электромонтера СЦБ / Е. В. Архипов, В. Н. Гуревич. – М. : Транспорт, 1990. – 287 с.
10. Сапожников Вл. В. Микропроцессорная система электрической централизации МПЦ-МПК / Вл. В. Сапожников, А. Б. Никитин // Наука и транспорт. – 2009. – С. 18–21.
11. Лаврик В. В. Электрическая централизация стрелок и сигналов метрополитенов / В. В. Лаврик. – М. : Транспорт, 1984. – 239 с.
12. Переборов А. С. Телеуправление стрелками и сигналами : учебник для вузов ж.-д. транспорта / А. С. Переборов, А. М. Брылеев, В. Ю. Ефимов, И. М. Кокурин, Л. Ф. Кондратенко ; под ред. А. С. Переборова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1981. – 390 с.

Nikitin Alexander B.,
Kovkin Alexey N.

«Automation and Remote Control on Railways» department,
Petersburg State Transport University

Using of functional generators with asymmetrical failure for AC electric drive control

This article examines the particularities of using the bridge converter circuit to control AC motors in railway automation computer systems. Special attention is paid to assessing the coefficient of efficiency of converter circuit, and the article shows, that using of low-frequency modes of power tongs can significantly improve the efficiency of using converters

within interface loops. Also, the article suggests a technical solution for the implementation of the five-wire control circuits for AC motors, which is a five-phase bridge mapping circuit. As part of this work a brief overview of modern electronic components, used to design inverters is carries out, and there is an assessment of electronic components in terms of the selectivity of similar components. In addition, the problems of using within the functional generators the electromagnetic relay, that improve the reliability and electrical safety of equipment, are covered.

functional generator; electric drive; three-phase induction motor; safe control; inverter; bridge circuit; efficiency coefficient; pulse-width modulation; insulated gate transistors; compact relay; mechanical circuit opening

References

1. Gavzov D. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. Safety methods for discrete systems. Automation and remote control (Avtomatika i telemekhanika), 1994, № 8, pp. 3–50.
2. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Khristov Kh. A., Gavzov D. V. Methods for building up safe microelectronic systems of railway automation. Under the editorship of Vl. V. Sapozhnikov. Moscow, Transport, 1995, 272 p.
3. 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. Microprocessor-based systems of centralization: textbook for vocational training and colleges of railway transport. Under the editorship of Vl. V. Sapozhnikov. Moscow, GOU «Training center for railway transport education», 2008, 398 p.
4. Safety of railway automation and remote control. Methods and principles of microelectronic SzhAT safety. RTM 32 CSh 1115842.01–94. St. Petersburg, PGUPS, 1994, 120 p.
5. Gavzov D. V., Kovkin A. N. Comparative evaluation of basics for interface loops safety considering the present-day development of power electronics. The development and operation of new devices and systems of railway automation and remote control: collection of research papers. St. Petersburg, PSTU, 2004, pp. 66–69.
6. Voronin P. A. Power semiconductor tongs: lines, characteristics, application. Moscow, Publishing house «Dodeka-XXI», 2001, 384 p.
7. Gottlib I. M. Power supply. Invertors, convertors, line and pulse stabilizers. Moscow, Postmarket, 2000, 552 p.
8. Semenov B. Yu. Power electronics for enthusiasts and professionals. Moscow, SOLON-R, 2001, 327 p.
9. Arkhipov E. V., Gurevich V. N. Reference book of electrician of signaling, centralization and blocking devices. Moscow, Transport, 1990, 287 p.
10. Sapozhnikov Vl. V., Nikitin A. B. Microprocessor system of electric centralization MPC-MPK. Science and transport (Nauka i transport), 2009, pp. 18–21.
11. Lavrik V. V. Electric centralization of points and signals of subway. Moscow, Transport, 1984, 239 p.
12. Pereborov A. S., Bryleev A. M., Efimov V. Yu., Kokurin I. M., Kondratenko L. F. Remote control of points and signals: textbook for railway transport universities. Under

the editorship of A. S. Pereborov. 3rd edition, revised and enlarged. Moscow, Transport, 1981, 390 p.

Статья представлена к публикации членом редколлегии
Вал. В. Сапожниковым
Поступила в редакцию 14.08.2015, принята к публикации 26.10.2015

НИКИТИН Александр Борисович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: nikitin@crtc.spb.ru

КОВКИН Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: akovkin@yandex.ru

© Никитин А. Б., Ковкин А. Н., 2016

Интеллектуальные системы управления

УДК 656.212.5:681.3

О. И. Таранец, канд. техн. наук
Кафедра «Управление эксплуатационной работой»,
Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
им. акад. В. Лазаряна

МОДЕЛИРОВАНИЕ СКАТЫВАНИЯ ОТЦЕПОВ С СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ СЛУЧАЙНЫХ ФАКТОРОВ

Основным мероприятием, обеспечивающим повышение безопасности движения, улучшение условий труда и уменьшение эксплуатационных расходов на переработку вагонопотоков на сортировочных станциях, является автоматизация процесса расформирования – формирования составов на сортировочных горках. Качество работы автоматизированных систем управления роспуском определяют: полнота и точность учета факторов, влияющих на процесс скатывания отцепов; технические средства реализации управляющих воздействий; технологические принципы определения управляющих воздействий. Комплексный учет влияния указанных факторов на показатели работы сортировочных горок позволит уменьшить как капитальные затраты на их сооружение или реконструкцию, так и эксплуатационные расходы, связанные с их функционированием. В связи с этим моделирование скатывания отцепов с сортировочной горки в условиях действия случайных факторов является актуальной проблемой для улучшения работы железнодорожного транспорта.

В статье рассматривается усовершенствованная имитационная модель процесса скатывания отцепов с сортировочной горки. Сложность оценки технико-эксплуатационных характеристик существующих и проектируемых систем связана с тем, что сортировочные горки работают в условиях неопределенности входной информации. В то же время математические модели процесса скатывания отцепов и методы решения задачи оптимизации режимов торможения базируются на допущении, что значения величин основного удельного сопротивления, сопротивления стрелкам и кривым, сопротивления окружающей среде и ветру, сопротивления тормозным заменителям известны до начала скатывания. Для учета случайности характеристик отцепов и условий их скатывания автором усовершенствована базовая имитационная модель сортировочной горки.

режимы торможения; отцеп; сортировочная горка; имитационная модель; случайные функции; случайные числа

Введение

При проектировании сортировочных горок, усовершенствовании их конструкции и исследовании горочных процессов, в том числе процесса скатывания, достаточно широко используются математические методы.

Сортировочная горка представляет собой сложную систему, в которой происходят десятки параллельных процессов, связанных с движением отцепов и работой горочных устройств. Синхронизация этих процессов в имитационной модели требует использования модели движения.

Впервые необходимость процесса моделирования скатывания отцепов была обозначена в проектных задачах проверки высоты, плана и профиля сортировочных горок и условий разделения отцепов. В этих задачах процесс движения отцепа был представлен при помощи дифференциального уравнения $v' = f(s, v)$.

Первое аналитическое решение уравнения для отцепа как материальной точки и случая, когда $F(s) = i = \text{const}$, было получено проф. В. Н. Образцовым [1]:

$$P = mv\frac{dv}{ds}, \tag{1}$$

где P – движущая сила; m – масса отцепа; s – расстояние скатывания; v – скорость отцепа.

На рис. 1 представлена схема сил, действующих на отцеп в процессе скатывания.

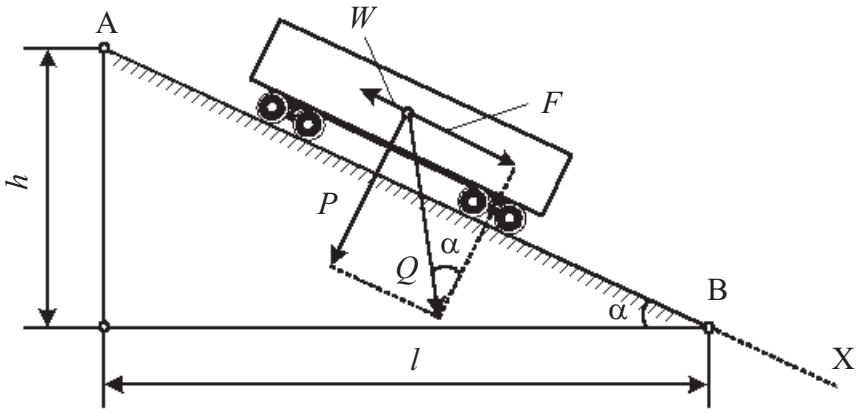

Рис. 1. Силы, действующие на отцеп в процессе скатывания

В этом случае движущая сила определяется из выражения:

$$P = F - W, \tag{2}$$

где F – проекция веса вагона на плоскость скатывания отцепа; W – сила сопротивления движению отцепа.

Проекция веса вагона на плоскость скатывания отцепа определяется по формуле:

$$F = Q \sin \alpha_{н}, \tag{3}$$

а величина сопротивления движению – по формуле:

$$W = Qw_0 + 0,07 f_{в}(v + v_{в})^2 + 0,75\frac{Q}{R}, \tag{4}$$

где $\alpha_{н}$ – угол наклона; w_0 – основное удельное сопротивление движению вагона; $f_{в}$ – площадь поперечного сечения вагона; $v_{в}$ – скорость ветра; Q – вес отцепа; R – радиус кривой.

Далее В. Н. Образцовым получено точное решение дифференциального уравнения движения отцепа в виде аналитических выражений вида $s = f(v)$ [2].

С целью учета сил, которые действуют на отцеп, выражение (1) было уточнено. На отдельном шаге удельное сопротивление движения отцепа определяется по формуле

$$W = w_0 + w_{св} + w_{ск} + b_{т}, \tag{5}$$

где w_0 – удельное сопротивление; $w_{ск}$ – сопротивление стрелкам и кривым; $w_{св}$ – сопротивление окружающей среде и ветру.

Интегрирование уравнения движения отцепа как материальной точки приводило к достаточно сложным выражениям и громоздким расчетам, что было неудобно для практического использования, особенно в условиях отсутствия средств вычислительной техники. Поэтому для упрощения расчетов проф. В. Д. Никитиным был разработан приближенный аналитический метод решения уравнения движения [3], который базировался на предположении о постоянном сопротивлении движению на некотором участке маршрута скатывания. В дальнейшем делались попытки практических расчетов графоаналитическим и графическим методами [4].

Аналитическое решение дифференциального уравнения скатывания в виде системы функций $v(t)$ и $s(t)$ впервые было получено Ф. Раабом [5].

Для определения величины сопротивления вагонов Всесоюзным научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ) был выполнен комплекс экспериментальных исследований основного сопротивления движению вагонов, сопротивления стрелкам и кривым, а также сопротивления окружающей среде и ветру [6]. В результате было установлено, что основное удельное сопротивление движению одиночного вагона представляет собой случайную величину, которая имеет гамма-распределение и в отдельном опыте при имитационном моделировании определяется как

$$w_0 = -\frac{1}{b}\ln\left(\prod_{j=1}^{a} R_j\right), \tag{6}$$

где a, b – параметры гамма-распределения, которые зависят от весовой категории отцепа; R_j – случайные числа, которые равномерно распределены в интервале [0, 1].

Сопротивление стрелкам и кривым на маршруте скатывания пропорционально квадрату скорости движения и рассчитывается по формуле, указанной в [7]:

$$w_{\text{ск}}(v) = K_{\text{ск}} v^2, \tag{7}$$

где $K_{\text{ск}}$ – средневзвешенный коэффициент сопротивления стрелкам и кривым.

Среднее значение удельной работы сил сопротивления стрелкам и кривым в границах участка скатывания определяется по формуле:

$$\overline{h_{\text{ск}}} = (0{,}56n + 0{,}23\sum a_{\text{ск}})v^2 \cdot 10^{-3}, \tag{8}$$

где n, $a_{\text{ск}}$ – соответственно количество стрелочных переводов и сумма углов поворота, с учетом стрелочных углов на маршруте скатывания.

При имитационном моделировании процесса скатывания отцепов работа сил сопротивления движению стрелкам и кривым в границах участка скатывания отцепа может рассматриваться как случайная величина и определяться при помощи выражения

$$h_{\text{ск}} = -0{,}125\overline{h_{\text{ск}}}\ln\left(\sum_{j=1}^{8} R_j\right). \tag{9}$$

Для определения сопротивления окружающей среде и ветру в [6] проведены наблюдения за скатыванием реальных вагонов и ряд экспериментов по обдуву масштабных моделей вагонов в аэродинамической трубе. В результате для определения удельного сопротивления окружающей среды движению отцепа и ветра было предложено использовать выражение

$$w_{\text{св}} = c v_{\text{от}}^2, \tag{10}$$

где c – приведенный коэффициент воздушного сопротивления; $v_{\text{от}}$ – относительная результирующая скорость отцепа и ветра.

Недостатком упоминаемых работ является то, что сопротивления движению рассматриваются как случайные величины, которые имеют постоянные значения на маршруте скатывания.

В первых теоретических работах по вопросам горочных процессов отцеп рассматривается как материальна точка, что является источником ошибок при

моделировании скатывания многовагонных отцепов. Методы моделирования движения многовагонных отцепов представлены в работах проф. Ю. А. Мухи [8] и проф. Е. М. Шафита [9]. Полученные модели использованы для выполнения горочных расчетов на аналоговых [10] и цифровых ЭВМ [11, 12].

Для усовершенствования учета влияния продольного профиля на процесс движения отцепа проф. Ю. А. Мухой и проф. В. И. Бобровским в [13] предложена вагонная модель отцепа, позволяющая исследовать процесс скатывания неоднородных отцепов. Указанная модель позволяет учитывать эквивалентный уклон, по которому движется каждый вагон отцепа на шаге Δs, по разности отметок его крайних осей. Наиболее точно определять эквивалентный уклон под отцепом позволяет осевая модель отцепа, предложенная проф. В. И. Бобровским [14]. Осевая модель отцепа представляет собой систему шарнирно соединенных материальных точек, соответствующих отдельным колесным парам вагонов. Такая модель дает возможность с достаточной точностью определять все силы (движущие, силы сопротивления, тормозные), действующие на отцеп в процессе скатывания.

Проф. В. И. Бобровский предлагает представление дифференциального уравнения движения отцепа $v' = f(t, v)$ в виде

$$dt = \frac{dv}{g'(i(s) - w_0 - w_{\text{ск}}(v) - w_{\text{св}}(v)) \cdot 10^{-3})}. \tag{11}$$

В указанном выражении делается допущение, что $w_{\text{ск}}$, $w_{\text{св}}$ и уклон $i(s) = i_{\text{э}}$ являются постоянными величинами [15].

С учетом обозначенных допущений, в дальнейшем данный метод будем называть приближенным.

Наиболее точное решение уравнения (11), которое учитывает зависимость сопротивления $w_{\text{ск}}$ и $w_{\text{св}}$ от скорости движения отцепа v, было получено проф. И. В. Жуковицким [16]. Уравнение (11) представляется соответственно в следующем виде:

$$\int_{t_0}^{t_1} dt = \frac{1}{g' \cdot 10^{-3}} \int_{v_0}^{v_1} \frac{dv}{i_{\text{э}} - w_0 - w_{\text{ск}}(v) - w_{\text{св}}(v)}. \tag{12}$$

Метод, который базируется на интегрировании (12) и не требует указанных выше допущений, в дальнейшем будем называть точным.

Указанные уравнения достаточно точно характеризуют процесс скатывания отцепа с сортировочной горки, но их недостатком является то, что величины основного удельного сопротивления, сопротивления стрелкам и кривым, сопротивления окружающей среде и ветру, сопротивления тормозным замедлителям ($w_{\text{Т}}$) имеют постоянные значения на маршруте скатывания. В то же время указанные величины имеют случайный характер на маршруте скатывания.

Исследование влияния случайных факторов на процесс расформирования составов и скатывания отдельных отцепов позволит усовершенствовать методику оценки технико-эксплуатационных характеристик сортировочных горок и разработать более эффективные алгоритмы оперативного управления процессом роспуска составов.

1 Базовая модель скатывания с сортировочной горки

Базовой является модель перемещения отцепа по маршруту скатывания, которая обеспечивает переход между текущими положениями процесса скатывания [9]. Имитационная модель включает модель маршрута скатывания, вагонно-осевую модель отцепа, а также данные об условиях скатывания, необходимые для адекватного моделирования процесса скатывания отцепа с горки.

В соответствии с [9] входная модель маршрута скатывания отцепа с горки представлена выражением:

$$P_u = \{l_u, w_u, \theta_u, i_u, R_{\text{в}u}\},\ u = 1,\ ...,\ M, \tag{13}$$

где l_u – длина элемента, м; w_u – параметр, который характеризует сопротивление движению стрелок и кривых; θ_u – тип; i_u – уклон, ‰; $R_{\text{в}u}$ – радиус вертикальной кривой, м; M – число элементов маршрута.

Весь маршрут скатывания отцепа разделяется на последовательные элементы так, чтобы их границами были характерные точки плана горочной горловины. К таким точкам отнесены начало и конец рельсовых цепей разделительных стрелок и замедлителей, начало и конец рабочих длин замедлителей, начало и конец элементов, которые оказывают дополнительное сопротивление движению (стрелочные переводы, глухие пересечения, кривые), начало и конец сортировочного пути, вершина горки, а также точки перелома профиля. Указанные точки, в зависимости от их типа, могут располагаться в начале элемента, в конце или на обеих его границах.

Входная модель отцепа представляется выражением, которое содержит данные о вагонах отцепа:

$$B_u\ \{\gamma_i, v_{\text{В}i}, \rho_i, Q_{\text{в}i}, w_{0i}\},\ i = 1,\ ...,\ m, \tag{14}$$

где γ_i – тип i-го вагона; $v_{\text{В}i}$ – количество осей; ρ_i – тип подшипников; $Q_{\text{в}i}$ – вес; w_{0i} – основное удельное сопротивление; m – количество вагонов в отцепе.

На основе данных входной модели с помощью программных средств строится внутренняя вагонно-осевая модель, которая непосредственно используется для имитационного моделирования скатывания отцепа с горки.

Условия скатывания отцепа задаются списком параметров:

$$Y = \{V_0, S_{\text{прц}}, V_{\text{в}}, \beta, t^\circ, \Delta s, N\}\,, \tag{15}$$

где V_0 – скорость роспуска состава; $S_{\text{прц}}$ – координата точки прицеливания; $V_{\text{в}}$ – скорость ветра; β – направление ветра; t° – температура окружающей среды; Δs – шаг моделирования; N – номер пути скатывания.

Процесс перемещения отцепа моделируется при помощи дифференциального уравнения (11).

Для расчета сил, которые действуют на отцеп в процессе скатывания, используется вагонно-осевая модель отцепа [15]. Мгновенное значение уклона $i(s)$, по которому двигается центр массы отцепа, когда его первая ось находится в точке s, определяется по выражению

$$i(s) = \frac{1}{Q_{\text{отц}}} \sum_{i=1}^{m_{\text{отц}}} q_i \sum_{r=1}^{v_{Bi}} i(s_{ir})\,, \tag{16}$$

где $Q_{\text{отц}}$ – масса отцепа; q_i – нагрузка на ось i-го вагона в отцепе ($q_i = Q_{\text{в}} / v_{\text{в}i}$); s_{ir} – координата точки, в которой находится r-я ось i-го вагона; $i(s_{ir})$ – значение уклона, на котором находится r-я ось i-го вагона.

Сопротивление стрелкам и кривым $w_{\text{ск}}$ определяется как функция мгновенной скорости отцепа (7). При этом для расчета средневзвешенного коэффициента сопротивления стрелкам и кривым в модели горки содержится информация о параметрах и размещении стрелок и кривых на путях скатывания.

Удельная сила сопротивления окружающей среде и ветру определяется по формуле (10).

Для моделирования торможения отцепов на тормозных позициях в модели определяется удельное сопротивление тормозным замедлителям, которое рассматривается как сумма удельных тормозных сил замедлителей разного типа, которые могут одновременно действовать на длинный отцеп:

$$w_{\text{т}} = w_{\text{тн}} + w_{\text{тв}} + w_{\text{РНЗ}}\,, \tag{17}$$

где $w_{\text{тн}}$, $w_{\text{тв}}$, $w_{\text{РНЗ}}$ – удельные тормозные сопротивления соответственно нажимных, весовых и весово-нажимных (РНЗ) замедлителей.

Величина $w_{\text{тн}}$ для замедлителей нажимного типа определяется по формуле [7]:

$$w_{\text{тн}} = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^{v} w_{\text{тн}i}\,, \tag{18}$$

где $w_{\text{тн}i}$ – удельная тормозная сила замедлителя нажимного типа, которая действует на i-ю ось отцепа; v – количество осей в отцепе.

Для замедлителей весового типа величина $w_{\text{тв}}$ определяется с учетом нагрузки на ось отцепа q_i, который тормозится:

$$w_{\text{тв}} = \frac{1}{Q_{\text{отц}} \sum_{i=1}^{m_{\text{отц}}} q_i \sum_{r=1}^{v_{\text{в}i}} w_{\text{тв}i}}. \tag{19}$$

Величина $w_{\text{тв}}$ определяется для осей отцепа, которые двигаются на очередном шаге перемещения Δs в границах замедлителей весового типа, аналогично (18). При этом значение тормозной мощности весового замедлителя $H_{\text{т}}$ выбирается в зависимости от количества осей вагона $v_{\text{в}}$, который тормозится.

Для замедлителей РНЗ, тормозная характеристика которых постоянна и не зависит от количества осей, которые тормозятся, величина удельной тормозной силы определяется следующим образом:

$$w_{\text{РНЗ}} = \sum_{k=1}^{z} w_{\text{РНЗ}k}, \tag{20}$$

где $w_{\text{РНЗ}k}$ – удельная тормозная сила k-го замедлителя данного типа; z – количество замедлителей РНЗ на маршруте скатывания отцепа.

2 Усовершенствованная модель сортировочной горки

Процесс скатывания отцепа описывается дифференциальным уравнением:

$$v' = \frac{dv}{dt} = g'(i - w_0 - w_{\text{св}}(v) - w_{\text{ск}}(v) - b_{\text{т}}) \cdot 10^{-3}, \tag{21}$$

где i – уклон пути на маршруте скатывания; w_0 – основное удельное сопротивление движению отцепа, Н/кН; $w_{\text{св}}$ – дополнительное удельное сопротивление движению от окружающей среды, Н/кН; $w_{\text{ск}}$ – дополнительное удельное сопротивление, которое возникает при прохождении стрелок и кривых Н/кН; v – скорость отцепа, м/с; g'– ускорение свободного падения с учетом инерции частей вагона, которые вращаются, м/с^2; $b_{\text{т}}$ – сопротивление движению от тормозных замедлителей, Н/кН:

$$b_{\text{т}} = F(v_{\text{тп}}^{\text{вх}}, v_{\text{тп}}^{\text{з}}, \sigma_{\text{тп}}), \tag{22}$$

где $v_{\text{тп}}^{\text{вх}}$ – скорость входа отцепа на тормозную позицию, км/ч; $v_{\text{тп}}^{\text{з}}$ – случайная величина скорости выхода отцепа с тормозной позиции, которая распределена

по нормальному закону, км/ч; $\sigma_{тп}$ – математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение случайной величины скорости отцепа.

Для исследования процесса роспуска составов в условиях действия случайных факторов усовершенствована базовая модель (11) скатывания отцепов с горки.

Согласно [2], параметры и закон распределения случайной величины ω_0 зависят от весовой категории вагонов q и типа подшипников. Для вагонов с роликовыми подшипниками величина w_0 имеет гамма-распределение с коэффициентами α и β:

$$F = (w_0) = \frac{\beta^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)} \int_0^{w_0} e^{-\beta w_0} w_0^{\alpha-1} dw_0 . \qquad (23)$$

На рис. 2 приведен график плотности распределения $f(w_0)$ отцепов легкой и тяжелой весовых категорий.

Рассмотрим более подробно моделирование случайной величины основного удельного сопротивления на маршруте скатывания отцепа.

Пусть $w_1, w_2, ..., w_\tau$ – временной ряд, который описывает изменения показателя w_t «колебательного характера», $t = \overline{1,\tau}$ [17], а $w(t)$ – предполагаемая теоретическая зависимость, соответствующая экспериментальной.

Функцию $w(t)$ в исследуемом интервале времени можно, при выполнении некоторых условий, представить рядом синусоидальных и косинусоидальных функций (ряд Фурье), например, если функция кусочно-монотонная и ограниченная (условие Дирихле).

Первая гармоника имеет период, равный длине исследуемого периода. Вторая – равный половине основного, третья – равный одной третьей основного и т. д. В общем, если имеется τ наблюдений, то число гармоник не будет превышать $\frac{\tau}{2}$. Для функции колебательного характера, как правило, их необходимо

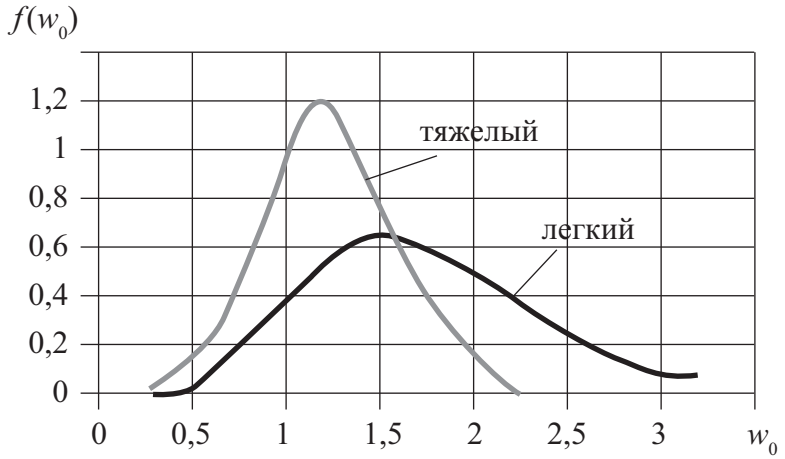

Рис. 2. График плотности распределения $f(w_0)$ отцепов легкой и тяжелой весовых категорий

определить меньше, также функции хорошо описываются несколькими первыми гармониками.

Записываем $w(t)$ в виде суммы $\frac{\tau}{2}$ гармоник:

$$w_0(t) = \overline{w_0} + \sum_{i=1}^{\frac{\tau}{2}} \left(A_i \cos\frac{2\pi ti}{\tau} + B_i \sin\frac{2\pi ti}{\tau} \right), \tag{24}$$

где A_i, B_i – коэффициенты ряда Фурье; $\frac{2\pi ti}{\tau}$ – частота i-й гармоники; τ – продолжительность измерения, с; i – количество гармоник; $\overline{w_0}$ – математическое ожидание величины сопротивления движению, кгс/тс:

$$\overline{w_0} = -\frac{1}{b}\ln(\prod\nolimits_{j=1}^{a} R_j), \tag{25}$$

где a, b – параметры гамма-распределения; R_j – случайные числа, равномерно распределенные в интервале (0; 1).

Коэффициенты A_i, B_i и a_0 оцениваются по методу наименьших квадратов:

$$\sum\nolimits_{t=1}^{\tau} (y_t - y(t))^2 \to \min. \tag{26}$$

Получение формул для коэффициентов облегчается благодаря свойству ортогональности:

$$\sum\nolimits_{t=1}^{\tau} \sin\left(\frac{2\pi}{p} it\right) \sin\left(\frac{2\pi}{p} it\right) = \begin{cases} 0, i \neq 1; \\ \frac{\tau}{2}, i = j \neq 0 \neq \frac{\tau}{2}. \end{cases} \tag{27}$$

Подобное равенство имеет место, если оба члена заменены косинусами; если же один член заменен косинусом, то сумма в левой части равна нулю.

Обозначим:

$$S(a_0, A_1, A_2, A_{\frac{\tau}{2}}, B_{\frac{\tau}{2}}) = \sum_{t=1}^{\tau} w_t = -a_0 - \sum_{i=1}^{\frac{\tau}{2}} \left[A_i \sin\left(\frac{2\pi}{\tau} it\right) + B_i \cos\left(\frac{2\pi}{\tau} it\right) \right]^2.$$

Оценки параметров, A_i, B_i и a_0 находятся из системы уравнений:

$$\sum_{t=1}^{\tau} w_t = \tau a_0 + \sum_{t=1}^{\tau} \sum_{i=1}^{\frac{\tau}{2}} A_i \sin\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right) + \sum_{t=1}^{\tau} \sum_{i=1}^{\frac{\tau}{2}} B_i \cos\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right);$$

$$\sum_{i=1}^{\tau} w_t \sin\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right) = a_0 \sum_{t=1}^{\tau} \sin\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right) +$$

$$+\sum_{t=1}^{\tau}\sum_{i=1}^{\frac{\tau}{2}} A_i \sin\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right) A_i \sin\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right) + \sum_{t=1}^{\tau}\sum_{i=1}^{\frac{\tau}{2}} A_i \sin\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right) A_i \cos\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right);$$

$$\sum_{t=1}^{\tau} w_t \cos\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right) = a_0 \sum_{t=1}^{\tau} \cos\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right) +$$

$$+\sum_{t=1}^{\tau}\sum_{i=1}^{\frac{\tau}{2}} A_i \sin\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right) B_i \cos\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right) + \sum_{t=1}^{\tau}\sum_{i=1}^{\frac{\tau}{2}} A_i \cos\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right) A_i \cos\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right);$$

$$j = 1, \frac{\tau}{2}.$$

Оценки параметров A_i, B_i и a_0 имеют вид:

$$a_0 = \frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau} w_t;$$

$$A_i = \frac{2}{\tau} w_t \sin\left(\frac{2\pi t}{\tau}\right);$$

$$B_i = \frac{2}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau} w_t \cos\left(\frac{2\pi it}{\tau}\right), \tag{28}$$

если $i < \frac{p}{2}$ при $i = \frac{p}{2}$, $A_{\frac{\tau}{2}} = 0$, $B_{\frac{\tau}{2}} = \frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}(-1)^t w_t$.

Полученные уравнения позволят моделировать величину основного удельного сопротивления на маршруте скатывания.

Для моделирования случайного значения дополнительного удельного сопротивления, которое возникает при прохождении стрелок и кривых $w_{ск}$, используется выражение [7]:

$$w_{ск}(v) = v^2 \sum_{j=1}^{m_{отц}} q_{отцj} \sum_{i=\alpha_j}^{j} \frac{C_{скi}}{l_{скi}}, \tag{29}$$

где v – скорость скатывания отцепа, м/с; $m_{отц}$ – количество вагонов в отцепе; $q_{отцj}$ – масса отцепа, т; $l_{скi}$ – длина участка скатывания отцепа, м.

Случайное значение $C_{скi}$ для отдельной стрелки или кривой определяется по формуле:

$$C_{\text{ск}i} = -\frac{0,56\theta_n + 0,23\varphi_n}{8} \ln \prod_{k=1}^{8} R_k, \tag{30}$$

где θ_n – тип n-го элемента ($\theta_n = 0$ – кривая; $\theta_n = 1$ – стрелка); φ_n – угол поворота кривой n-го элемента, град; R_k – случайные числа, распределенные равномерно в интервале (0; 1).

Случайная величина дополнительного удельного сопротивления движению воздушной среды $w_{\text{св}}$ на маршруте скатывания отцепа моделируется при помощи выражения (10). В указанном выражении $v_{\text{от}}$ относительная результирующая скорость отцепа и ветра, м/с, которая определяется по формуле:

$$v_{\text{от}} = v^2 + v_{\text{в}}^2 \pm 2vv_{\text{от}} \cos\beta, \tag{31}$$

где v – скорость скатывания отцепа, м/с; β – угол между направлением ветра и осью участка пути, по которому движется отцеп; $v_{\text{в}}$ – скорость ветра, которая моделируется при помощи гармонической функции, как и величина основного удельного сопротивления, м/с:

$$v_{\text{в}} = \overline{v_{\text{в}}} + \sum_{i=1}^{\frac{\tau}{2}} \left(A_i \cos\frac{2\pi i}{\tau} + B_i \sin\frac{2\pi t i}{\tau} \right), \tag{32}$$

где $\overline{v_{\text{в}}}$ – математическое ожидание величины скорости ветра, м/с.

Направление ветра в модели моделируется при помощи следующего выражения:

$$\alpha(t) = \overline{\alpha} + \sum_i \left(A_i \cos\frac{2\pi t}{\tau} + B_i \sin\frac{2\pi t}{\tau} \right), \tag{33}$$

где $\overline{\alpha}$ – математическое ожидание угла направления ветра, град.

В [18] рассмотрены разные методы определения массы, а также приведены результаты исследования случайной величины массы вагона. В отдельном опыте значение этой случайной величины может быть смоделировано при помощи выражения:

$$Q_{\text{в}} = M[Q] + \sigma[Q] \cdot z, \tag{34}$$

где $M[Q]$ – математическое ожидание случайной величины массы отцепа, т; $\sigma[Q]$ – величина различия массы груза указанной в перевозочных документах и массы груза после перевешивания.

Математические ожидания случайных величин сопротивления движению $\overline{w_0}$, $w_{\text{т}}$ моделируются в соответствии с [7].

Заключение

Существующие имитационные модели для исследования процесса скатывания отцепов позволяют лишь сравнивать варианты конструкций сортировочных горок и не учитывают случайный характер параметров отцепов на маршруте скатывания и условий окружающей среды, которые влияют на показатели работы сортировочных горок. В статье представлена имитационная модель скатывания отцепов с горки, в которой сопротивления движению рассматриваются как случайные функции. Предложенные методы и модели реализованы в виде программного комплекса для ЭВМ «Скатывание одиночного отцепа».

Разработанные автором имитационные модели и программные средства позволяют сравнивать варианты конструкции сортировочных горок, оценивать эффективность их технического оборудования и алгоритмов управления систем автоматического роспуска составов, которые проектируются при автоматизации сортировочных горок, а также решать разнообразные оптимизационные задачи.

Неопределенность параметров отцепов и условий скатывания влияет на интервальное и прицельное регулирование скорости, в связи с этим задача уточнения характеристик отцепов является актуальной.

Библиографический список

1. Образцов В. Н. К вопросу о тяговых расчетах сортировочных горок / В. Н. Образцов // Труды МИИТа. – Вып. 9. – М., 1928. – С. 129–152.
2. Образцов В. Н. Станции и узлы / В. Н. Образцов, В. Д. Никитин, Ф. Н. Шаульский, С. П. Бузанов. – М. : Трансжелдориздат, 1949. – С. 540.
3. Никитин В. Д. Проектирование продольного профиля парков сортировочной станции с помощью математического моделирования маневровых процессов на ЭЦВМ / В. Д. Никитин, С. С. Мацкель // Вопросы расчета и проектирования железнодорожных станций и узлов : тр. МИИТа. – Вып. 304. – М. : Транспорт, 1969. – С. 4–41.
4. Ющенко Н. Р. Графический метод построения кривых скорости и времени скатывания отцепов с горки / Н. Р. Ющенко // Труды ДИИТа. – Вып. 21. – М. : Трансжелдориздат, 1951. – С. 271–287.
5. Raab F. Bewegungsgleichungen und nomographische Rechentafeln als Hilfsmittel für ablaufdynamischen Untersuchungen / F. Raab. – Rangiertechnik, 1956. – H. 16.
6. Сопротивление движению грузовых вагонов при скатывании с горок / Е. А. Сотников // Труды ВНИИЖТа. – Вып. 545. – М. : Транспорт, 1975. – 151 с.
7. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Союза ССР. ВСН 207–89. – М. : Транспорт, 1992. – 104 с.
8. Муха Ю. А. Построение кривых скорости скатывания длинных отцепов с сортировочной горки и сравнение этих кривых с опытными / Ю. А. Муха // Вопросы

механизации и автоматизации сортировочных горок : тр. ДИИТа. – Вып. 41. – Днепропетровск, 1962. – С. 85–110.
9. Шафит Е. М. Дифференциальные уравнения скатывания отцепов с сортировочной горки при различных способах аппроксимации продольного профиля / Е. М. Шафит // Вопросы механизации и автоматизации сортировочных горок : тр. ДИИТа. – Вып. 52. – М. : Транспорт, 1965. – С. 55–72.
10. Шафит Е. М. Машинное решение дифференциальных уравнений скатывания отцепов с сортировочной горки / Е. М. Шафит // Вопросы механизации и автоматизации сортировочных горок : труды ДИИТа. – Вып. 52. – М. : Транспорт, 1965. – С. 73–95.
11. Буянова В. К. Моделирование на ЭЦВМ процесса роспуска вагонов с сортировочной горки / В. К. Буянова // Вестник ВНИИЖТа. – 1965. – № 6. – С. 60–64.
12. Павлов В. Е. Об алгоритме расчета скорости вагона на горке в зависимости от расстояния / В. Е. Павлов // Труды ЛИИЖТ. – Вып. 259. – Л. : Транспорт, 1967. – С. 95–100.
13. Муха Ю. А. Моделирование на ЭЦВМ процесса скатывания отцепов с сортировочной горки / Ю. А. Муха, В. И. Бобровский // Вопросы механизации и автоматизации сортировочного процесса на станциях : тр. ДИИТа. – Вып. 90/6. – Днепропетровск, 1969. – С. 53–63.
14. Муха Ю. А. Алгоритмы и библиотека программ для моделирования на ЭВМ «Наири-К» сортировочного процесса на горках / Ю. А. Муха, В. И. Бобровский // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях : тр. ДИИТа. – Вып. 194/11. – Днепропетровск, 1977. – С. 53–102.
15. Бобровский В. И. Дифференциальные уравнения движения отцепа и методы их решения / В. И. Бобровский // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1996. – № 6. – С. 34–39.
16. Жуковицкий И. В. Решение дифференциального уравнения свободного скатывания отцепа с горки / И. В. Жуковицкий // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1997. – № 4. – С. 14–17.
17. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – М., 1974. – 832 с.
18. Устав железных дорог Украины : утв. постановлением Кабинета министров Украины от 06.04.98 № 457. – Киев : Транспорт, 1998. – 83 с.

Taranets Olga I.

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport
named after Academician V. Lazaryan

Simulation of set of cars rolling from the hump under the influence of random factors

The basic measure that provides traffic safety raise, working conditions improvement and operating costs of traffic volume conversion reduction on marshalling yards is automation of

forming and disbanding of trains on humps processes. The quality of automated detaching control system is determined be the following factors: fullness and accuracy of accounting of factors affecting the set of cars rolling process; technical means of control implementation; technological principles of control. Complex accounting of influence of declared factors on the parameters of hump operation allows to reduce capital expenditures for their construction and reconstruction as well as operating costs related with their functioning. Thereby, simulation of set of cars rolling from the hump under the influence of random factors is an actual problem for the railway transport.

In this article the enhanced simulation model of set of cars rolling from the hump is described. The complexity of evaluation of technical and operational characteristics of existing systems and being developed ones is connected with the fact that humps are functioning under the conditions of uncertainty of input data. But mathematical models of set of cars rolling process and methods of solution of braking mode optimization problem are based on the assumption that resistance of air and wind, resistance of points and curves, resistance of retarding mechanisms for the movement of set of cars are known before the start of rolling. Thereby for accounting of random characteristics of sets of cars and condition of their rolling the basic simulation model of hump was enhanced.

braking mode; set of cars; hump; simulation model; random functions; random values

Reference

1. Obraztsov V. N. On the question of traction calculations marshalling yards. Proceedings of the MIIT, vol. 9, Moscow, 1928, pp. 129–152.
2. Obraztsov V. N., Nikitin V. D., Shaulsky F. N., Buzanov S. P. Stations and units. Moscow, Transzheldorizdat, 1949, 540 p.
3. Nikitin V.D, Matskel S.S. Design of the longitudinal profile of parks yard with the help of mathematical modeling of processes by computer shunting. Questions of calculation and design of railway stations and junctions. MIIT Proceedings, vol. 304, Moscow, Transport, 1969, pp. 4–41.
4. Yushchenko N. R. graphical method of constructing curves of speed and time to unhook from the rolling hills DIIT. Works, vol. 21, Moscow, Transzheldorizdat, 1951, pp. 271–287.
5. Raab F. Bewegungsgleichungen und nomographische Rechentafeln als Hilfsmittel für ablayfdynamischen Untersuchungen. Rangiertechnik, 1956, H. 16.
6. Sotnikov E. A. Resist the movement of freight cars while sliding down a rollercoaster VNIIZhT. Works, vol. 545, Moscow, Transport, 1975, 151 p.
7. Rules and regulations of the design of sorting devices on the railways of the USSR. VSN 207–89. Moscow, Transport, 1992, 104 p.
8. Muha Y. A. Deriving speed rolling long unhooked with hump and a comparison of these curves with experienced. Questions of mechanization and automation of gravity humps. DIIT Proceedings, vol. 41, Dnepropetrovsk, 1962, pp. 85–110.
9. Shafit E. M. Differential equations with rolling unhook hump at various ways of approximating the longitudinal profile. Questions of mechanization and automation of gravity humps. Proceedings of the DTIS, vol. 52, Moscow, Transport, 1965, pp. 55–72.

10. Shafit E. M. Machinery solution of differential equations with rolling unhook hump. Questions of mechanization and automation of gravity humps. Proceedings of the DTIS, vol. 52, Moscow, Transport, 1965, pp. 73–95.
11. Buyanova V. K. By computer modeling of the dissolution of the wagons hump. Herald VNIIZhT, 1965, issue 6, pp. 60–64.
12. Pavlov V. E. On an algorithm for calculating the speed of the car on a hill depending on the distance LIIZhT. Works, vol. 259, Leningrad, Transport, 1967, pp. 95–100.
13. Muha Y. A., Bobrowski V. I. By computer simulation of the process rolling to unhook hump. Questions of mechanization and automation of the sorting process at the stations. DIIT Proceedings, vol. 90/6, Dnepropetrovsk, 1969, pp. 53–63.
14. Muha Y. A., Bobrowski V. I. Algorithms and software library for computer simulation of «Nairi-K» screening process on a rollercoaster. Mechanization and automation of the sorting process at the stations. DIIT Proceedings, vol. 194/11, Dnepropetrovsk, 1977, pp. 53–102.
15. Bobrowski V. I. Differential equations of motion unhooked and solution methods. Information-management systems in rail transport, 1996, issue 6, pp. 34–39.
16. Zhukovitsky I. V. Solutions of differential equations with a free rolling unhooked from hamp. Information-management systems in rail transport, 1997, issue 4, pp. 14–17.
17. Korn G., Korn T. Reference mathematics (for scientists and engineers). Moscow, 1974, 832 p.
18. Charter of railways of Ukraine. Approved by the Cabinet of Ministers of Ukraine of 06.04.98 № 457, Kiev, Transport, 1998, 83 p.

Статья представлена к публикации членом редколлегии И. М. Кокуриным
Поступила в редакцию 26.11.2015, принята к публикации 24.12.2015

ТАРАНЕЦ Ольга Игоревна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна.
e-mail: taranetsolga@rambler.ru

© Таранец О. И., 2016

УДК 625.2

С. А. Никищенков, д-р техн. наук,
А. Б. Фокеев, канд. техн. наук
Кафедра «Управление эксплуатационной работой, станции и узлы»,
Самарский государственный университет путей сообщения

ЭМУЛЯТОР ГРАФИКОВ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ И РАБОТЫ СТАНЦИЙ

В статье рассматриваются вопросы построения эмуляторов графиков движения поездов и работы станций, предназначенных для диспетчерского персонала дирекций управления движением. Показаны принципы организации и базовая система правил построения эмуляторов. Рассмотрены данные для эмуляции, содержащие описание перегонов и станций. Представлены базовая блок-схема железнодорожного полигона и архитектура программно-аппаратного комплекса для его комплексной эмуляции. Показана взаимосвязанность моделей диспетчерских участков, примыкающих к сортировочной станции. Приводятся экранные формы автоматизированных рабочих мест при работе эмулятора движения. Продемонстрированы совмещенные исполненные и прогнозные графики как результат работы эмулятора. Рассмотрены организационно-технические мероприятия, необходимые для практического внедрения технологии эмуляции графиков.

графики движения поездов и работы станций; принципы и правила эмуляции; схема диспетчерского участка; архитектура эмулятора; совмещенные исполненные и прогнозные графики; рабочее место диспетчера

Введение

Внедрение программных комплексов прогнозирования работы полигона, включающего диспетчерские участки и сортировочные станции, остается в центре внимания дирекций по управлению движением и научно-исследовательских организаций [1–9].

В известных разработках процесс прогнозирования был автоматизирован на основе расчетных моделей раздельно для перегонов и станций. В Самарском государственном университете путей сообщения реализована технология комплексного взаимоувязанного прогнозирования и графического отображения поездной работы сортировочной и технических станций с примыкающими к ним перегонами на основе усовершенствованных методов имитационного моделирования и автоматизированной системы комплексной эмуляции [10–12].

Эмуляция (emulation) – воспроизведение (*эмулирование*) функций одной системы на другой, отличной от первой системы таким образом, чтобы эмулированное поведение соответствовало поведению оригинальной системы. Эмуляция

осуществляется путем использования комплекса соответствующих программных и аппаратных средств. Целью является максимально точное воспроизведение поведения системы в отличие от разных форм моделирования, с помощью которых имитируется поведение некоторой абстрактной модели. Эмуляция для операционных систем компьютеров и игровых устройств представляет собой способ преодоления проблем работы на устаревающих объектах и позволяет пользователю получить доступ к любому типу прикладного программного обеспечения на современной платформе. Это решение может применяться не только к устаревшим системам, но и к новым версиям. На практике, если выпускается новая версия приложения с целью обеспечения совместимости и миграции всех входящих в него компонентов, необходимо создать эмулятор для этого приложения, обеспечивающий доступ ко всем упомянутым компонентам. Эмуляция сохраняет вид, поведение и свойства оригинальных систем, что не менее важно, чем данные сами по себе. Несмотря на высокую изначальную стоимость создания эмулятора, со временем эмуляторы могут стать более выгодным финансовым решением. Внедрение эмуляторов сокращает трудозатраты, так как вместо долгой и постоянной работы по миграции данных в эмулятор для каждого прошлого и настоящего объекта можно использовать одинаковые технологии.

1 Принципы эмулирования графиков движения

Автоматизированный эмулятор графиков движения (ЭГД) предназначен для использования на всей вертикали управления движением, но, прежде всего, ориентирован на диспетчерский аппарат – поездного диспетчера, диспетчера сортировочной станции, маневрового диспетчера, дежурного по депо и т. д. При создании его использовались не только знания ученых, системный и онтологический подход к решению проблемы, но и опыт практиков – специалистов в области перевозок и автоматизированных систем управления (АСУ), а также достижения в области программирования и построения интеллектуальных систем на транспорте.

В рамках принятой концепции, в отличие от имитационного моделирования, создана и используется библиотека функционально-поведенческих программных моделей статических и динамических объектов полигона. Организация ЭГД позволяет в режиме реального времени с заданным упреждением (горизонтом) воспроизводить поездное положение. При этом используется нормативно-справочная информация по участку и типовым операциям, оперативно учитывается текущая информация, возможна настройка эмуляции по критериям управления.

В основу ЭГД диспетчерского участка положены следующие принципы:

1. Формирование и использование библиотеки программных моделей типовых статических и динамических объектов (перегонов, станций, путей, поез-

дов, вагонов, локомотивов, бригад), их категорий и характеристик, постоянных и временных ограничений скорости движения.

2. Концептуальное представление технологического процесса как трехуровневой иерархической композиции «этапы – сценарии – последовательности операций» с учетом категорий объектов.

3. Формирование и загрузка данных по поездам, локомотивам и вагонам в реальном времени. Ввод информации о событиях, влияющих на процесс, осуществляется как автоматически (выдача предупреждений, «бросание» поезда, поломка локомотива, опоздание пассажирского поезда и т. д.), так и диспетчером (закрытие для движения пути перегона, пути станции, стрелочного перевода; задание продолжительности времени операции, например, стоянки поезда и др.).

4. Эмуляция осуществляется постоянно в заданном регламенте от заданной точки текущего времени с горизонтом упреждающего просмотра 3–24 часа по поездам и вагонам на диспетчерском участке, при этом обеспечивается оперативность эмуляции (быстродействие ЭГД).

5. Взаимодействие с отраслевыми АСУ и информационными системами, использование нормативно-справочной информации АСУ сортировочных станций.

6. Совместное и одновременное формирование графиков исполненного движения (ГИД) и графиков исполненной работы (ГИР) станций и прогнозных графиков – графика прогнозного движения (ГПД) и графика прогнозной работы (ГПР).

К основным архитектурным и технологическим решениям ЭГД относятся следующие.

1. Данные для эмуляции содержат описание перегонов и станций:

– перегоны описываются с точностью до путей и блок-участков;

– для каждого пути перегона задаются профиль, участки ограничения скорости, направление действия автоблокировки, определяется наличие контактной сети и вида тока;

– описание станции включает в себя описание сортировочной системы, парков и путей;

– для парков и путей задается действующая специализация;

– для участка дороги строится его топология;

– станции связываются с перегонами, на станциях задаются направления.

2. На участке для поездов и групп вагонов определяются место и продолжительность стоянки.

3. Для парков станций производится эмуляция операций с поездами, локомотивами и вагонами.

4. Прогнозный процесс формируется из набора сценариев поведения объектов в зависимости от категории (поезд – грузовой, сборный, вывозной, хозяйственный, восстановительный, пассажирский, пригородный; путь – главный, приемоотправочный, сортировочный и т. д.).

5. Сценарий определяется как последовательность операций с нормативным временем.

6. Для компоновки сценариев используются базовая и максимально возможная цепочки операций.

7. Базовая система правил:

– поезд может приниматься только на специализированный путь в специализированный парк;

– отправление поезда с технической станции производится при технической готовности состава, готовности локомотива, наличии локомотивной бригады и свободной нитки в расписании;

– для расформирования направляется поезд, первым прибывший в парк;

– поезд формируется до достижения длины или веса, заданных в плане формирования, и т. д.

8. При возникновении ситуаций (событий), влияющих на процесс, изменяется последовательность сценариев и время выполнения операций.

9. Ведется постоянный мониторинг, выдаются сигнальные сообщения (прогнозные данные) о превышении времени рабочей смены локомотивной бригады.

На рис. 1 представлен используемый для целей эмуляции типовой диспетчерский участок, включающий сортировочную и примыкающие станции и перегоны.

2 Программно-аппаратный комплекс и работа эмулятора графиков движения

Архитектура ЭГД полигона включает один сервер территориального подразделения и более мощный сервер для централизованного представления поездной ситуации по объединенному полигону в целом (рис. 2).

Интерфейс ЭГД позволяет пользователю просматривать на одном экране ГИД и ГПР с прокруткой по всему полигону (рис. 3), аналогично – для ГИР и ГПР (рис. 4 и 5), при этом достаточно выбрать соответствующую закладку и нитку.

С помощью ЭГД на заданном горизонте управления – в интервале времени от 3 до 12 часов – можно видеть прогноз продвижения поездов, их сортировку, исполненную работу и принимать управленческие решения в критической ситуации либо для улучшения эксплуатационной работы.

В ходе опытного тестирования подтвердились широкие возможности системы эмулировать работу диспетчерских участков, станций и полигона в целом. Ее внедрение позволяет автоматизировать формирование плана работы участков и станций по пропуску поездопотоков на 12 и более часов.

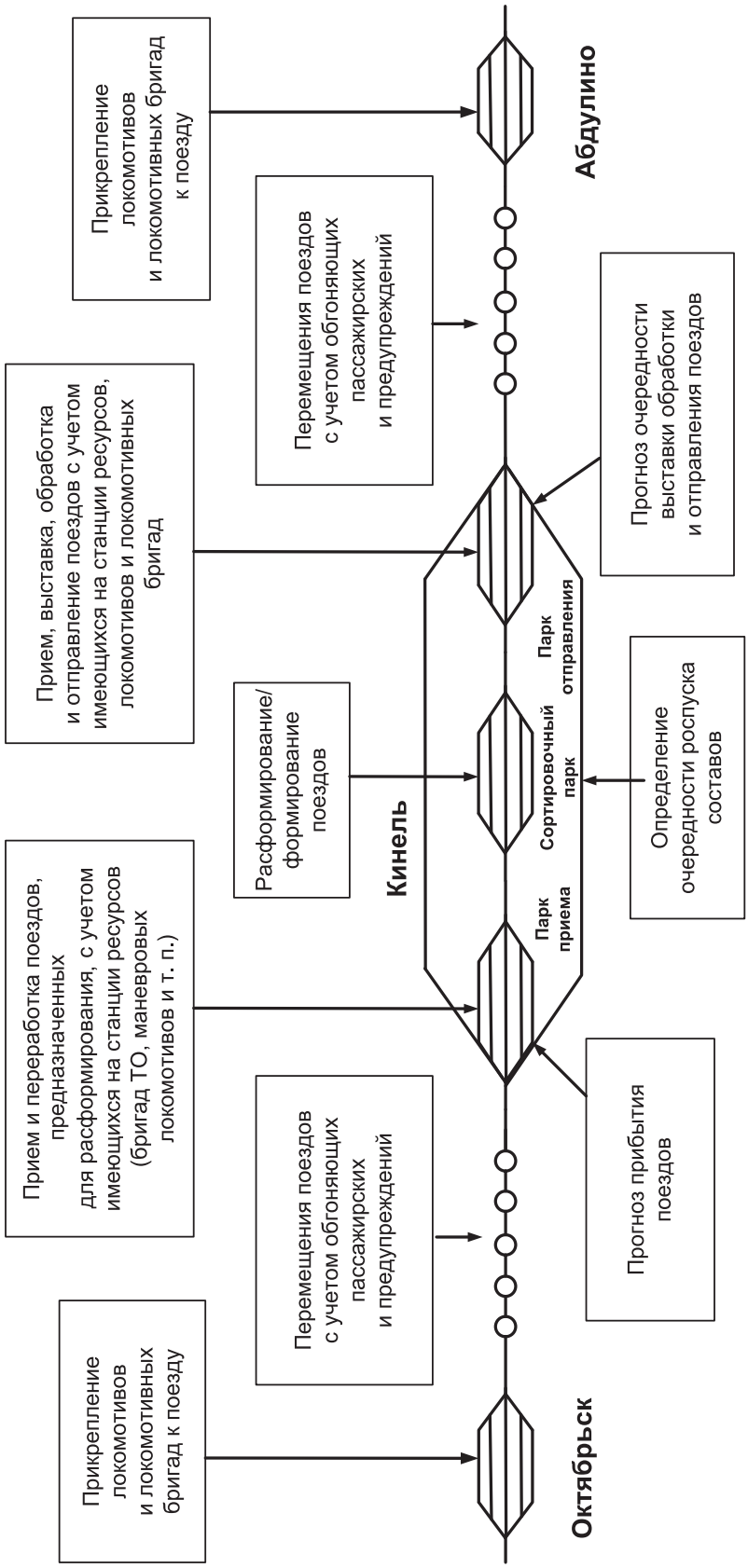

Рис. 1. Укрупненная структура диспетчерского участка

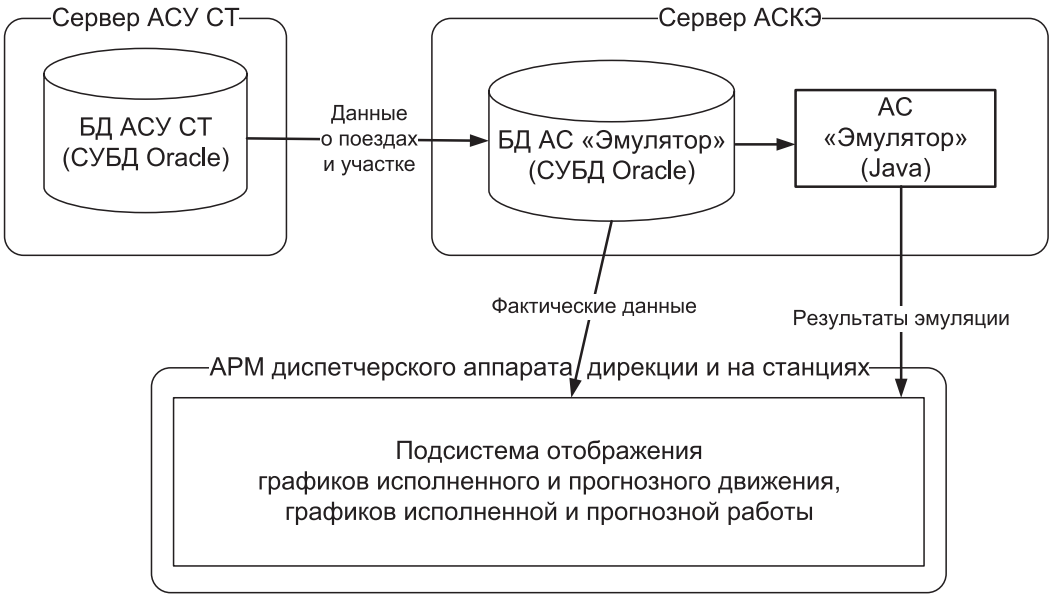

Рис. 2. Архитектура ЭГД

При внедрении и эксплуатации ЭГД решались организационные задачи:

– поскольку в АСУ сортировочных станций не представлен требуемый набор параметров путей и парков станций (например, в электронном варианте не отражены приоритеты по пропуску видов поездов по путям парков станций, наличие контактного провода и вида тока и т. п.), ввод данных производился работниками информационно-вычислительных центров и дирекций управления движением в имеющиеся в наличии формы;

– выполнена формализация и перевод в электронный вид данных, описывающих технологические ограничения (например, нормы времени на закрепление состава и др.);

– решена задача обеспечения требуемой производительности ЭГД.

Заключение

Преимущества ЭГД заключаются в детальном комплексном прогнозе работы диспетчерских участков и станций, в непрерывном режиме обработки текущей информации при взаимосвязи моделей диспетчерских участков, в целях достижения максимальной эффективности (минимизация простоев, пропуск большегрузных поездов, ускоренная доставка вагонов с просрочкой и т. д.). Любое событие на одном участке – выдача предупреждений, задержка приема или отправления поездов по станции – отражается в прогнозе работы следующего участка, куда направляются поезда. Благодаря эмуляции последствия этих событий можно спрогнозировать и заранее спланировать действия без ошибок в поездной работе.

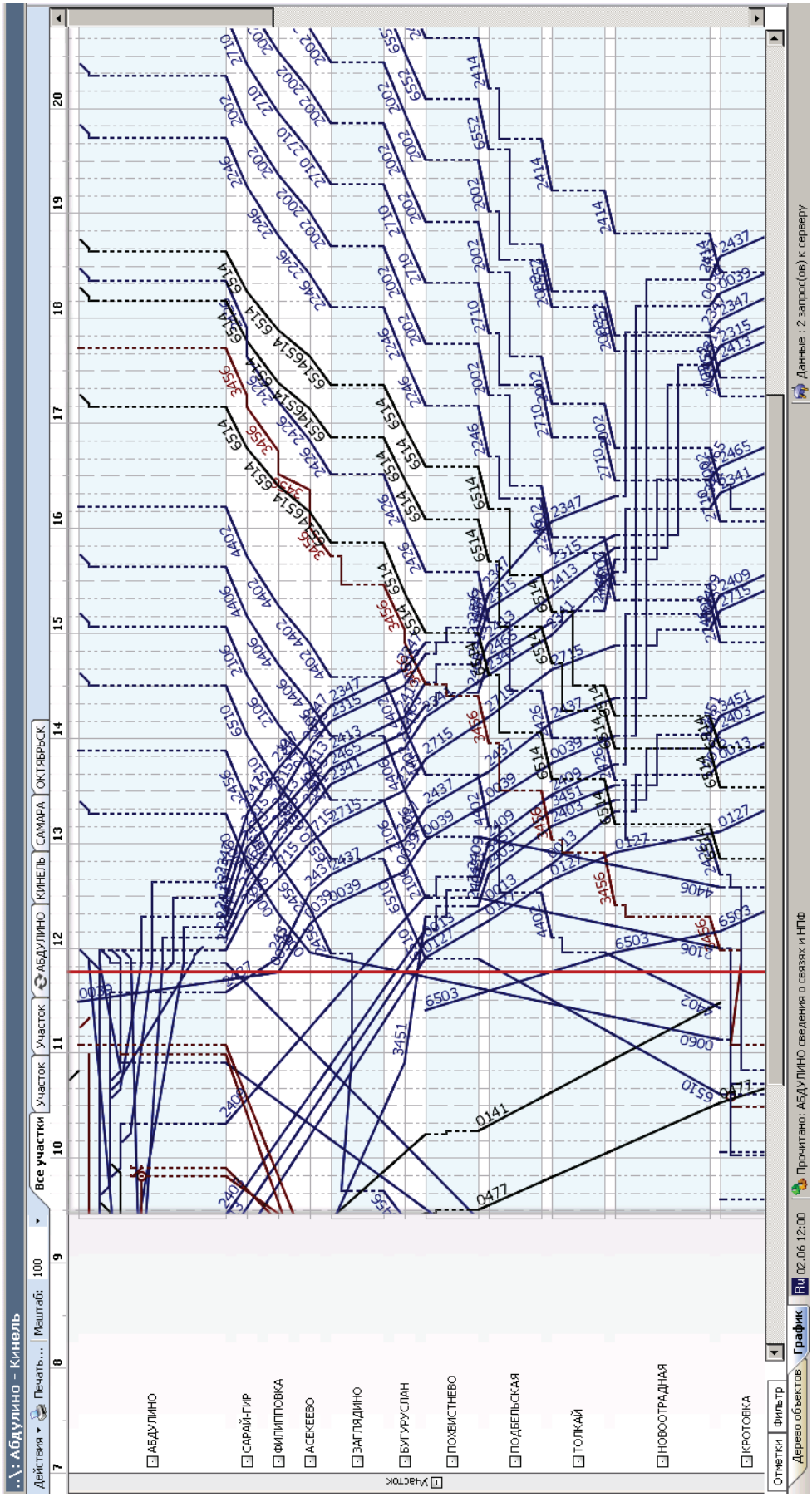

Рис. 3. Совмещенные исполненный и прогнозный графики движения

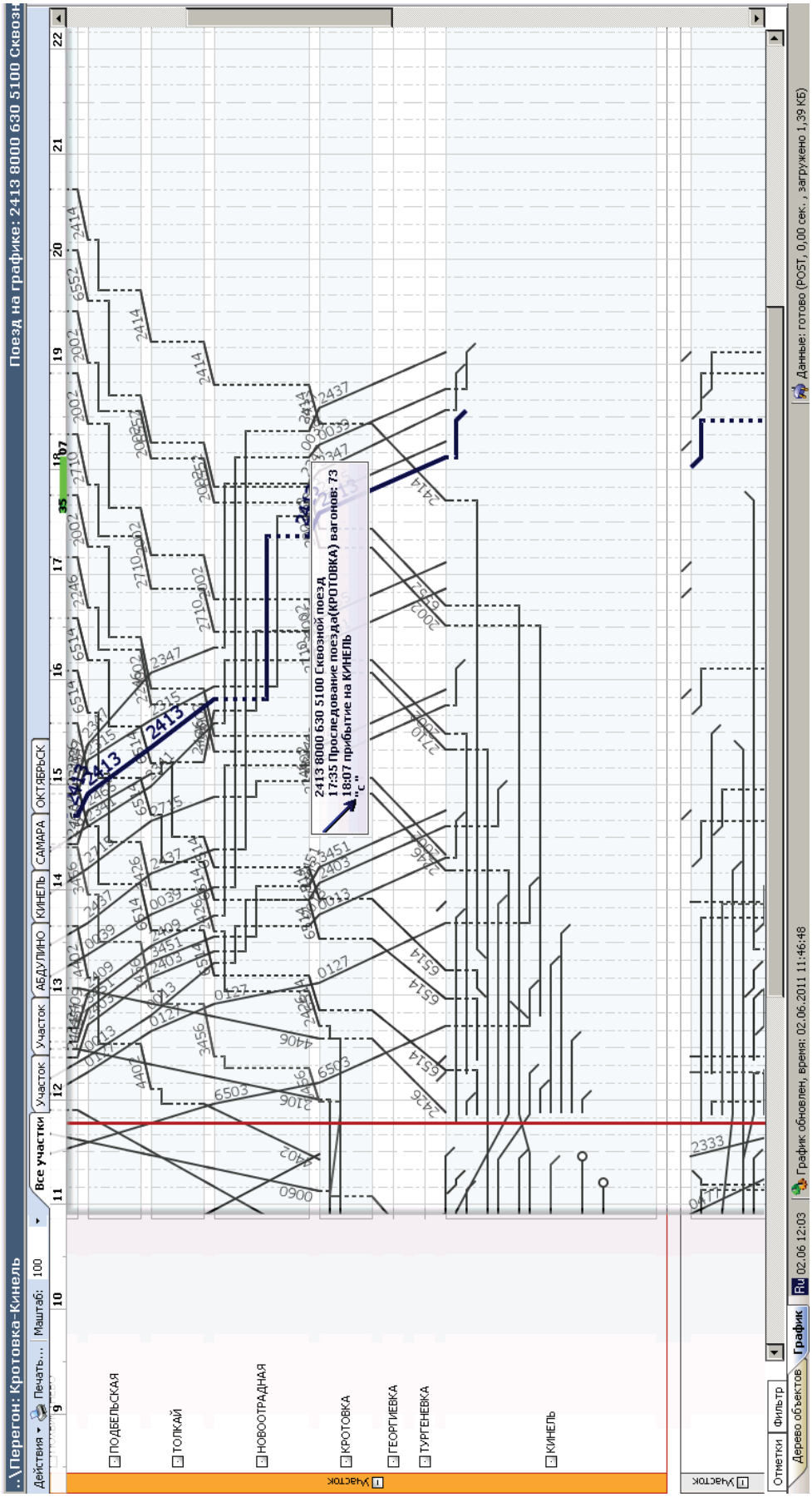

Рис. 4. Выборка поезда на графике прогнозного движения

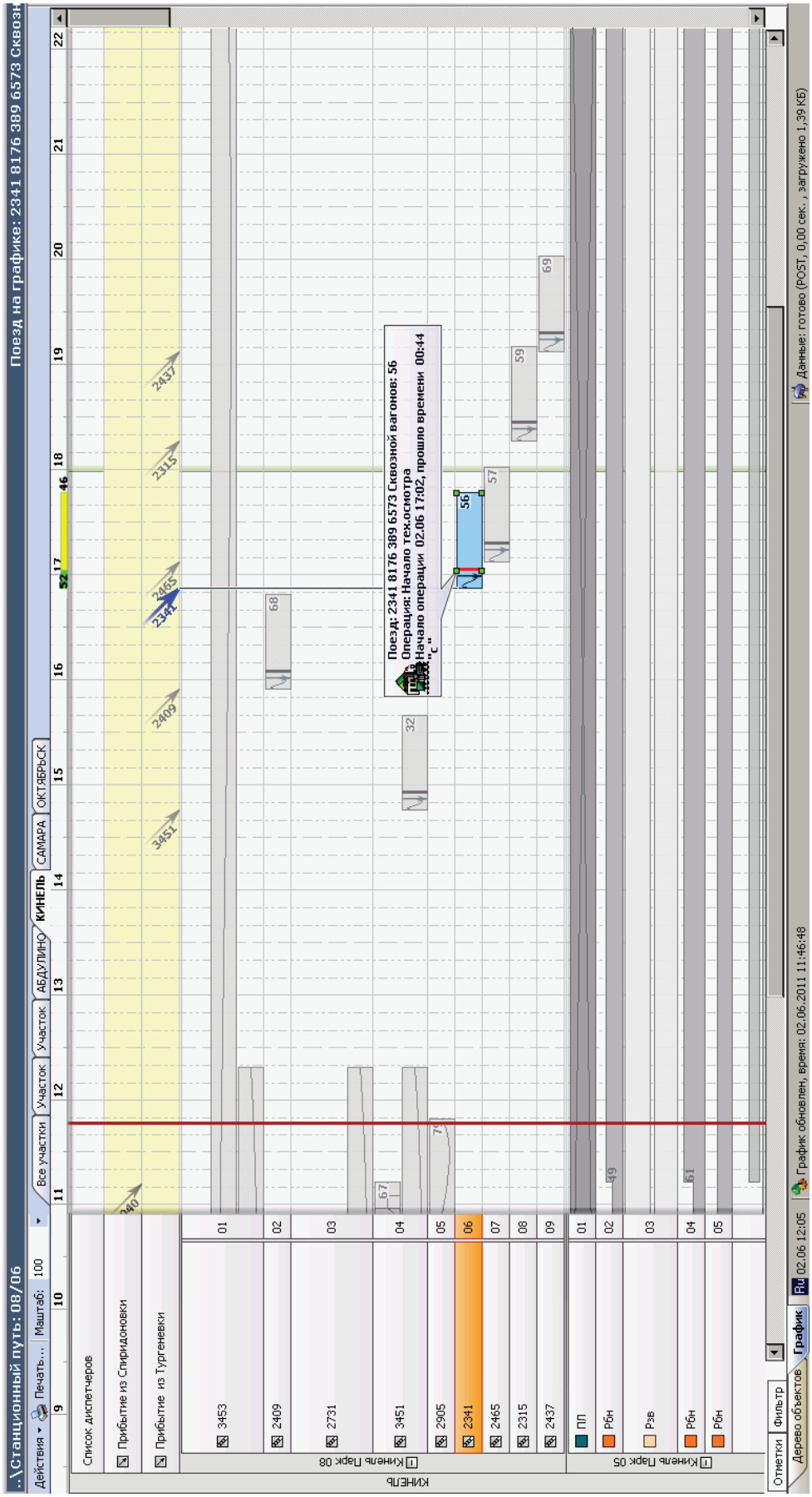

Рис. 5. Совмещенные исполненный и прогнозный графики работы

Система позволяет единообразно строить ГИД, ГПД, ГИР и ГПР, сопоставлять графики и контролировать работу полигона. Все прогнозы рассчитываются с учетом реально сложившегося поездопотока, выполнения графика следования пассажирских и пригородных поездов, действующего нормативного графика движения поездов. Наличие эффективного инструмента поддержки управленческих решений диспетчеров всех уровней сокращает потери в эксплуатационной работе.

Возможное применение ЭГД: как интеллектуальный компонент автоматизированной технологии управления оперативной работой полигона; подсистема поддержки принятия решений диспетчерским персоналом; вычислитель прогнозных вариантов «что, если…»; обучающая среда для работников дирекции управления движением.

Библиографический список

1. ГИД «Урал-ВНИИЖТ» : опыт внедрения и перспективы развития / Г. А. Кузнецов, В. П. Крайсвитний, С. В. Крашенинников, Н. Ф. Слободенюк // Железнодорожный транспорт. – 2006. – № 5. – С. 38–42.
2. Инструкция по разработке графика движения поездов в ОАО «РЖД» / ВНИИАС. – М.: Техинформ, 2006. – 183 с.
3. Система ГИД «Урал-ВНИИЖТ» : внедрение, модернизация, перспективы развития / Г. А. Кузнецов [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 2. – С. 15–21.
4. Учет выполнения графика движения грузовых поездов / Г. А. Кузнецов [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 3. – С. 20–25.
5. Шаров В. А. Интегрированная технология управления движением грузовых поездов по расписанию / В. А. Шаров, А. Ф. Бородин // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 8. – С. 11–22.
6. ГИД «Урал-ВНИИЖТ» : аналитические функции и автоматизация труда диспетчеров / Г. А. Кузнецов [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 3. – С. 21–25.
7. Иванов П. А. График движения поездов как основа качества перевозочного процесса // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 2. – С. 21–23.
8. Кирякин В. Ю. Полигонная технология формирования прогнозных вариантных графиков с использованием АПК «ЭЛЬБРУС» / В. Ю. Кирякин, А. В. Новгородцева // Бюллетень объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2014. – № 1. – С. 16–20.
9. Реализация полигонной технологии с использованием АПК «Эльбрус» / В. Ю. Кирякин [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 6. – С. 18–24.
10. А. с. № 2008615232. Имитационная модель перемещения поезда по диспетчерскому участку с учетом предупреждений и обгонов / С. А. Никищенков, А. Н. Черемухин, А. Ю. Павлов, М. В. Додонов ; опубл. 31.10.2008.
11. А. с. № 2009610264. Имитационная модель обработки поездов в парке прибытия / С. А. Никищенков, А. Н. Черемухин, А. Ю. Павлов, М. В. Додонов ; опубл. 11.01.2009.

12. Никищенков С. А. Комплексная эмуляция работы железнодорожного полигона с совмещенными исполненными и прогнозными графиками движения поездов и работы станций / С. А. Никищенков, А. Н. Черемухин, А. Ю. Павлов // Информационные и математические технологии в науке и управлении : тр. Байкальской Всероссийской конференции. Ч. 1. – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2015. – С. 79–85.

Nikishchenkov Sergey A.,
Fokeev Anatoliy B.
«Management of Operational Work, Stations and Units» department,
Samara State Transport University

Emulator of train schedule and work of stations

The article deals with the construction of emulators train schedules and work stations designed for dispatching personnel directorates traffic control. We present the basic principles and rules of the system emulators. We consider these to emulate, describing hauls and stations. It is a basic block diagram of the railway site and architecture of hardware and software for its comprehensive emulation. It is shown that interconnectedness models dispatching areas adjacent to the yard. Provides screen forms of workstations when using the emulator movement. Showing combinations of performance and forward-looking graphic as a result of the emulator. The organizational and technical measures in the practical implementation of technology emulation charts.

train schedule and work stations; principles and rules of emulation; supervisory circuit section; architecture emulator; combinations of performance and forward-looking graphic; workspace manager.

References

1. Kuznetsov G. A., Kraysvitny V. P., Krasheninnikov S. V., Slobodenyuk N. F. GID «Ural-VNIIZHT» : the experience of the implementation and development prospects. Railway Transport, 2006, issue 5, pp. 38–42.
2. Instructions on the development of the train schedule at JSC «Russian Railways». VNIIAS, Moscow, Techinform, 2006, 183 p.
3. Kuznetsov G. A. et al. System GID «Ural-VNIIZHT» : implementation, modernization, development prospects. Railway Transport, 2008, № 2, pp.15–21.
4. Kuznetsov G. A. et al. Accounting for Performance schedule of freight trains. Railway Transport, 2011, issue 3, pp. 20–25.
5. Sharov V. A., Borodin A. F. Integrated control technology of freight trains on schedule. Railway Transport, 2011, issue 8, pp.11–22.
6. Kuznetsov G. A. et al. GID «Ural-VNIIZHT» : analytic functions and automation of work of dispatchers. Railway Transport, 2012, issue 3, pp. 21–25.

7. Ivanov P.A. Train schedule as a basis for the quality of the transportation process. Railway Transport, 2014, issue 2, pp. 21–23.
8. Kiryakin V.J., Novgorodtseva A.V. Polygon technology of forward-looking variant graphs using APC «Elbrus». Bulletin of the Joint Scientific Council of JSC «Russian Railways», 2014, issue 1, pp. 16–20.
9. Kiryakin V.Y. et al. Implementation of the polygon technology using APC ELBRUS. Railway Transport, 2014, issue 6, pp. 18–24.
10. Nikishchenkov S.A., Cheremuhin A.N., Pavlov A.Yu., Dodonov M.V. Simulation model of train travel on the dispatch area in view of warnings and overtaking. Certificate of official registration of the computer program № 2008615232 from 31.10.2008.
11. Nikishchenkov S.A., Cheremuhin A.N., Pavlov A.Yu., Dodonov M.V. The simulation model of the processing train in the park of arrival. Certificate of official registration of the computer program № 2009610264 from 11.01.2009.
12. Nikishchenkov S.A., Cheremuhin A.N., Pavlov A.Yu. Integrated emulation of rail polygon with the combined performance and the forecast timetable of trains and work stations. Information and mathematical technologies in science and management. Proceedings of the Russian Conference of the Baikal. Irkutsk, 2015, pp. 79–85.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Вал. В. Сапожниковым
Поступила в редакцию 13.11.2015, принята к публикации 18.12.2015

НИКИЩЕНКОВ Сергей Алексеевич – профессор, доктор технических наук, проректор по науке и инновациям Самарского государственного университета путей сообщения.
e-mail: nikishchenkovs@mail.ru

ФОКЕЕВ Анатолий Борисович – доцент, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой, станции и узлы» Самарского государственного университета путей сообщения.
e-mail: fokeevab@gmail.com

© Никищенков С.А., Фокеев А.Б., 2016

Стандартизация и сертификация

УДК 004.052.2

К. А. Бочков, д-р техн. наук,
С. Н. Харлап, канд. техн. наук,
Б. В. Сивко
Научно-исследовательская лаборатория
«Безопасность и ЭМС технических средств»,
Белорусский государственный университет транспорта

РАЗРАБОТКА ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ДИВЕРСИТЕТНЫХ АКСИОМАТИЧЕСКИХ БАЗИСОВ

В статье рассматривается решение задачи, характерной для систем железнодорожной автоматики и телемеханики с применением диверситетных аксиоматических базисов – построение отказоустойчивой и безопасной микропроцессорной системы относительно заданных отказов. В качестве исследуемой системы выступает микропроцессорное устройство, выполняющее счет осей подвижного состава. На основании имитационных испытаний выполнено сравнение отказоустойчивости и безопасности таких систем с рассматриваемым диверситетом и без диверситета. Приведен пример последовательного усиления диверситета согласно аксиоматико-базисному подходу. Усиление диверситета возможно с помощью разделения памяти и регистров, адресов, множеств команд микропроцессора, а также защиты программного счетчика. Представлена формализация условий диверситета и основанная на нем защита от отказов по общей причине. На примере показано, что диверситет аксиоматических базисов и самотестирование общего базиса решают задачу обнаружения опасных отказов (диверситет решает задачу обнаружения опасных отказов диверситетных базисов, а самотестирование обнаруживает маскируемые отказы). В ходе эксперимента выявлено, что нарушение общего базиса ведет к отказам по общей причине и тем самым обоснован его обязательный контроль. Применение диверситетных аксиоматических базисов создает условия, при которых происходит усиление диверситета программного обеспечения. Выявлено, что во время проектирования и разработки диверситетного программного обеспечения возможно создание диверситетных высокоуровневых абстракций, что позволяет выбирать уровень абстракции диверситета. Рассмотрены особенности применения диверситетных аксиоматических базисов при разработке и верификации безопасных и отказоустойчивых систем.

отказоустойчивость; доказательство безопасности; диверситет; формальные методы; критические системы информационной инфраструктуры; обнаружение отказов

Введение

В настоящее время одной из актуальных проблем управления является влияние отказов по общей причине (CCF, common cause failure) на безопасность и отказоустойчивость многоканальных систем [1, 2]. Ее решение необходимо для разработки и верификации новых аппаратно-программных комплексов (АПК), относящихся к критическим системам информационной инфраструктуры (safety-critical systems). К данным системам относится множество устройств, влияющих на безопасность и отказоустойчивость и активно используемых на железнодорожном и морском транспорте, в гражданской авиации, телекоммуникациях, медицине, космосе, на опасном химическом производстве и др. [3, 4].

По причине влияния CCF происходит большое количество катастроф [3, 5, 6]. Согласно стандарту IEC 61508, учет фактора CCF настоятельно рекомендуется [1]. Сегодня основным способом защиты от CCF является программный и аппаратный диверситет, для реализации которого существует ряд методов, к которым относятся N-версионное программирование, выбор различных компиляторов и используемого программного обеспечения и др. [7, 8]. Для оценки степени диверситета может быть использован BETA-метод и модель BETAplus [1]. Однако имеющиеся решения CCF имеют ряд недочетов [4, 9–12]. Их характерной особенностью является экспертный характер диверситетных методов, а это ограничивает их эффективность и глубину решения, поэтому необходима их формализация.

В качестве решения проблемы CCF рассматривается аксиоматико-базисный подход (АБП) [13], позволяющий выполнять разработку на основе диверситетных аксиоматических базисов [14]. Данное решение дает возможность формализованно сравнивать системы по степени диверситета, последовательно усиливать диверситет во время разработки и наделять АПК целевыми формализованными свойствами. В статье исследуется практическое применение данного подхода на примере типовой задачи для систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ), относящейся к критическим системам информационной инфраструктуры. Рассматриваются разработка АПК без диверситета и с диверситетом согласно подходу, испытания на отказоустойчивость обеих решений и сравнение результатов, а также особенности применения подхода и построения диверситетных систем.

1 Описание типовой задачи

Рассмотрим систему, выполняющую счет осей подвижного состава [15–17]. Данная система представляет собой микроэлектронное устройство, которое получает информацию с двух датчиков о присутствии колесной пары на железнодорожном полотне (рис. 1). Необходимо подсчитать количество колесных пар,

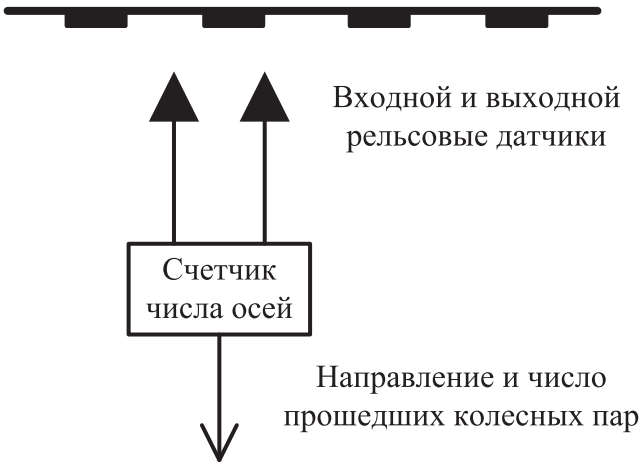

Рис. 1. Счетчик числа осей

которые прошли в прямом или обратном направлении, при этом результат подсчета передается на внешнее устройство. Другими словами, система представляет собой счетный пункт [15], а ее применение с постовым устройством [17] или счетным устройством [15] позволяет решать такие задачи СЖАТ, как контроль свободности участков пути и определение ординаты подвижного состава.

Датчики могут передавать на микропроцессорное устройство информацию о возникновении одного или двух событий, о наличии или отсутствии колесной пары в зоне расположения датчика. Соответственно при прохождении колесной пары слева направо значения датчиков изменяются в последовательности 00→10→11→01→00 и счетчик инкрементируется. При движении в обратном направлении – 00→01→11→10→00 и счетчик декрементируется. Результат подсчета (число) передается на индикатор или другое внешнее устройство.

В качестве устройства, осуществляющего данную функцию, выбран микропроцессор PIC16F877A [18]. Входные значения датчиков передаются напрямую на входные линии, а выходные значения для индикации отправляются в виде числа в двоичном коде на внешние порты.

В программное обеспечение (ПО) рассматриваемых систем добавляется функция самопроверки, которая заключается в контроле корректности переходов между состояниями. Некорректными считаются попытки перехода между 00 и 11 или между 01 и 10; в случае обнаружения такой ситуации система должна подать сигнал о том, что корректность ее работы нарушена. В то же время считается, что быстродействие датчиков намного выше скорости перемещения колесной пары и при нормальной работе такие переходы не должны возникать.

2 Описание эксперимента

Для решения задачи построения безопасной системы счета осей разработаны два варианта ПО, первый из которых выполнен без диверситета, а второй

представляет собой диверситетное двухканальное ПО, работающее на одном микроконтроллере. Второй вариант был получен из первого последовательным выполнением шагов согласно АБП на основе диверситетных аксиоматических базисов по алгоритму [14]. В ходе преобразования система приобрела отказоустойчивость относительно рассматриваемых отказов, повышен диверситет согласно АБП. Эксперимент заключается в проведении имитационных испытаний первого и второго вариантов ПО и сравнении результатов, что позволяет определить эффективность и особенности применения подхода на основе диверситетных аксиоматических базисов.

При использовании АБП на основе диверситетных аксиоматических базисов ставится задача усиления диверситета базисов [14], которые должны иметь наименьший общий базис (так происходит усиление диверситета согласно АБП). Далее, согласно АБП, отказы, не затрагивающие общий базис, будут проявляться в диверситетных каналах по-разному. С одной стороны, для таких отказов решается проблема CCF (отсутствие среди них опасных, так как в случае их проявления выходные сигналы будут различными). С другой стороны, только для общего базиса необходима проверка сторонними средствами, при этом данная проверка формализована в рамках АБП (предоставляется определенный набор утверждений, который требуется проверить, например, с помощью самотестирования или самопроверки).

Таким образом, отказы вне общего базиса при работе второго варианта ПО не должны быть опасными (они могут быть защитными или маскируемыми), это проверяется в ходе имитационных испытаний. Кроме того, процедуры самопроверки и самотестирования общего базиса должны свести количество опасных отказов к нулю, что также проверяется на имитационных испытаниях.

Множество учитываемых при разработке и испытаниях имитационных отказов выбирается на основании требований стандарта ГОСТ Р МЭК 61508 [19]. Соответственно все элементы памяти должны быть защищены от одиночных отказов константного нуля и единицы (stack-at-faults, SA), а также от коротких замыканий между линиями связи (bridging-faults, B). С учетом этого осуществляется проектирование (защита от указанных отказов согласно АБП) и последующее имитационное моделирование.

Входы и выходы двух вариантов исполнения показаны на рис. 2.

Для обеспечения строгости диверситета второго варианта ПО были проведены дополнительные мероприятия. Во-первых, разделены входные (IN1/IN2) и выходные (COUNTER1/COUNTER2, ERROR1/ERROR2) цепи диверситетных программ. Во-вторых, ПО в конечном итоге было построено таким образом, что каждый из каналов в любом случае и при любых рассматриваемых отказах передавал управление другому каналу, что было выполнено посредством гарантии завершения алгоритмом технологического цикла за конечное время. В-третьих, добавлена проверка программного счетчика на отказоустойчивость, внешне выражающаяся в сигнале SAFE_PCL, который находится в переменном

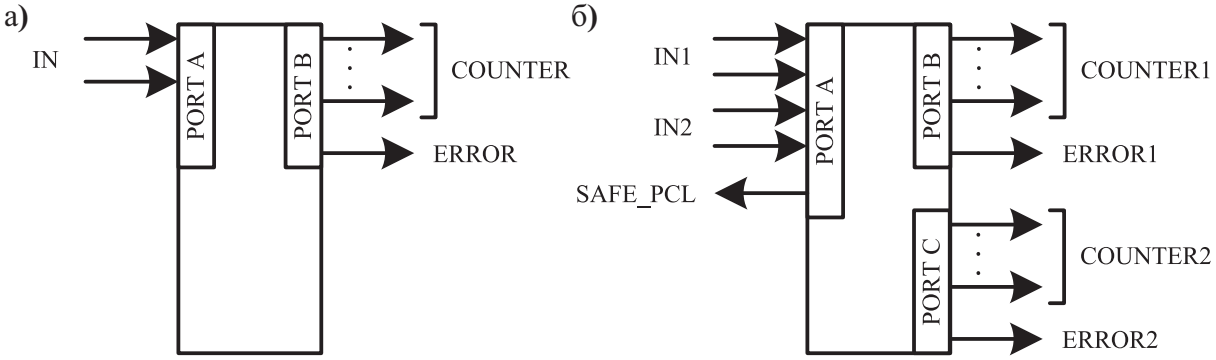

Рис. 2. Микроконтроллеры первого варианта исполнения (*а*) и диверситетного варианта (*б*):
IN – входные сигналы с датчиков; COUNTER – результат подсчета осей; ERROR – индикация обнаружения ошибки; SAFE_PCL – индикация обнаружения отказа программного счетчика

или постоянном состоянии, первое из которых говорит об отсутствии отказов программного счетчика. Считается, что в случае появления второго сигнала вся система будет переведена в безопасное состояние внешними средствами, например типовым импульсным декодером [20]. Данная проверка представляет собой периодическое самотестирование общего базиса [21].

Таким образом, в результате описанных дополнений можно диагностировать эффективность и строгость выполненного диверситета.

3 Усиление диверситета

С целью усиления диверситета рассматриваются две версии ПО (изначально это могут быть две идентичные программы). Для этих версий устанавливаются те аксиоматические базисы (например, A и B), на которых основывается функциональность ПО. Как правило, при рассмотрении новых неучтенных базисов обе версии зависят как от A, так и от B. В дальнейшем ПО одной из версий изменяется таким образом, что в ней исключается зависимость от одного из базисов (например, версия 1 перестает быть зависимой от базиса A). В свою очередь, для версии 2 исключается зависимость от базиса B. Описанные действия показаны на рис. 3. Очевидно, что конечная пара версий ПО обладает бóльшим диверситетом относительно базисов A и B, чем изначальные версии [14]. Конечным итогом эксперимента является то, что версия 1 реализует свою функциональность на основе базиса B, а версия 2 – на основе базиса A.

Во время решения типовой задачи согласно данному подходу диверситет усилен поэтапно, последовательно были осуществлены следующие шаги диверсификации:

– разделение по ячейкам оперативной памяти;
– разделение по адресам;

– разделение на множества команд;

– разделение по регистрам.

Описанный подход позволил на каждом из шагов сфокусироваться на соответствующих аспектах, изменить соответствующим образом ПО и добиться получения необходимых свойств.

Разделение по ячейкам оперативной памяти основано на использовании общих ячеек для двух программ. Выбор адресов производился с помощью кода Хэмминга с расстоянием 3.

Разделение множества команд и регистров было произведено так, как показано на рис. 4. В базис A попали команды, работающие с аккумулятором W и флагом Z (movlw, andlw, decfsz, …). В базис B попали команды, непосредственно работающие с памятью (bcf, clrf, btfss, …).

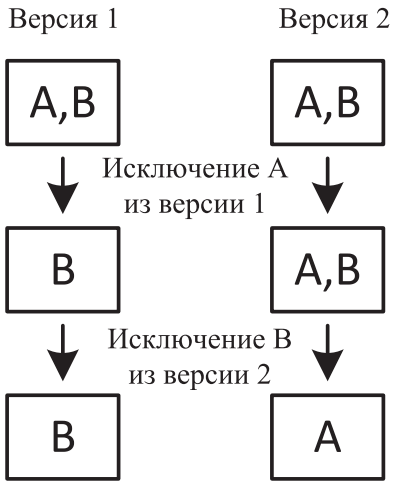

Рис. 3. Исключение базисов и усиление диверситета

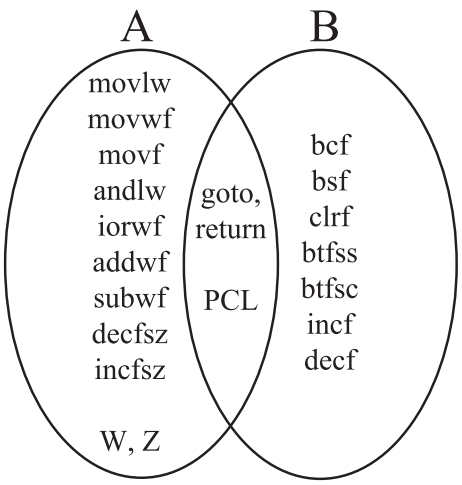

Рис. 4. Разделение команд и регистров

Разделение по регистрам было произведено таким образом, что первый канал использовал только регистр W и флаг Z, а для второго было достаточно оперативной памяти. Такие команды, как goto и return, а также регистр PCL остались в общем базисе. Их отказоустойчивость проверялась и диагностировалась сигналом SAFE_PCL [21].

Таким образом, диверситетными базисами являлись утверждения об отсутствии одиночных отказов в рассматриваемых ячейках памяти и регистрах при дешифровании команд и в адресной шине данных.

4 Испытания

Оценка эффективности метода должна проверяться на практике и в настоящее время для этого применяется имитационное моделирование. Такой способ

позволяет провести в лабораторных условиях полный цикл разработки и верификации с минимальными затратами.

В качестве инструмента моделирования выбран программный комплекс КИИБ [22], который предназначен для имитационных испытаний на функциональную безопасность в соответствии с IEC 61508, EN 50126, ОСТ 32.146 микропроцессорных систем управления ответственными технологическими процессами. С помощью КИИБ возможно внесение различного вида отказов технических средств, а также анализ последующего поведения рассматриваемой системы.

Анализ имитационного моделирования позволяет понять, в какое состояние переходит система в результате внесения отказа, и соответственно диагностировать тип отказа, который может быть опасным, защитным или маскируемым (табл. 1).

Таблица 1. Диагностика отказов

Корректность подсчета осей	Сигнал на переход в безопасное состояние	
	+	–
+	Защитный отказ	Маскируемый отказ
–	Защитный отказ	Опасный отказ

Если сигнал на переход в безопасное состояние появлялся во все время испытаний, он считался активным. Функцию подсчета осей система должна была выполнять корректно в каждый момент времени с учетом быстродействия микроконтроллера.

В программу испытаний были включены одиночные отказы SA и B [19]. Данные отказы вносились для всех используемых регистров и ячеек оперативной памяти. Для первого варианта ПО проводились испытания при внесении следующих отказов:

– SA0(W, PCL), SA1(W, PCL) – константные значения аккумулятора и программного счетчика – 32 отказа;

– B(W, PCL) – короткие замыкания между линиями связи аккумулятора и программного счетчика – 28 отказов;

– SA0(Z) и SA1(Z) – 2 отказа;

– B(Z) – короткие замыкания между линиями связи для регистра STATUS, затрагивающего флаг Z, – 4 отказа;

– SA0 и SA1 трех используемых ячеек памяти – 48 отказов;

– B-отказы трех используемых ячеек памяти – 42 отказа.

Для второго варианта ПО проводились испытания при внесении следующих отказов:

– A0(W, PCL) и SA1(W, PCL) – 32 отказа;

– B(W, PCL) – 28 отказов;

– SA0(Z) и SA1(Z) – 2 отказа;

– B(Z) – 4 отказа;
– SA0 и SA1 пяти используемых ячеек памяти – 80 отказов;
– B-отказы пяти используемых ячеек памяти – 70 отказов.

Поскольку каждый цикл ПО имел конечное время выполнения, была рассчитана максимальная длительность одного тела цикла [23] и для испытаний скорость прохождения сигналов была установлена такой, что цикл обязательно должен был завершиться в указанное время. Время испытания было задано так, что его было достаточно для прохождения такого количества осей, при котором происходило переполнение внутреннего счетчика.

Каждый из отказов проверялся четыре раза: при подсчете осей в обоих направлениях, в начале работы программы (влияющие на инициализацию), и во время работы микроконтроллера (в данном случае после 1000 тактов его работы).

Таким образом, для первого и второго варианта ПО было проведено 624 и 864 испытания соответственно.

КИИБ позволяет во время испытаний протоколировать все входные и выходные данные. Во время работы микроконтроллера изменяются его состояние и поведение, судя по внешним сигналам, и, как следствие, он должен выдавать соответствующие выходные данные. На их основании можно диагностировать корректность его работы и факт обнаружения отказа теми или иными средствами.

Например, в случае отказа SA1 младшего бита программного счетчика микроконтроллер перестает вести подсчет и выполнять самопроверку и выходные сигналы становятся постоянными. В ходе их анализа по завершении испытания определяется факт нарушения функциональности (подсчет прекратился), а также обнаруживается или нет отказ средствами самопроверки (сигнал ERROR), определяется работоспособность программного счетчика (постоянное значение SAFE_PCL в случае отказа и переменное, если PCL в рабочем состоянии).

5 Результаты испытаний

Результаты испытаний первого варианта ПО показаны в табл. 2.

Таблица 2. Испытания первого варианта исполнения

№	E	F	Отказ	Количество	%
1	0	0	Опасный	402	64,4
2	0	1	Маскируемый	150	24,0
3	1	0	Защитный	72	11,5
4	1	1			

Примечания. E – наличие сигнала перехода в безопасное состояние (результат самопроверки, ERROR); F – корректность функционирования во время испытания.

Результаты испытания второго варианта ПО с учетом диверситета, но без учета самотестирования показаны в табл. 3.

Таблица 3. Испытания второго варианта выполнения ПО без самотестирования

№	E1	E2	F1	F2	Отказ	Количество	%
1	0	0	0	0	Опасный	54	6,25
2	0	0	0	1	Защитный	211	24,4
3	0	0	1	0		144	16,7
4	0	0	1	1	Маскируемый	244	28,2
5	0	1	0	0	Защитный	22	2,55
6	0	1	1	0		32	3,7
7	1	0	0	0		22	2,55
8	1	0	0	1		113	13,1
9	1	1	0	0		22	2,55

Примечания. E1, E2 – наличие сигнала самопроверки (ERROR1 и ERROR2) для первого и второго канала соответственно; F1, F2 – корректность функционирования во время испытания для каждого из каналов. Для непоказанных комбинаций E1, E2, F1, F2 случаи отказа не зафиксированы.

Самопроверка обнаружила 24,4 % отказа на 211 испытаниях. В табл. 3 это № 5–9 – те отказы, во время которых один из сигналов, E1 или E2, имел состояние 1 (соответствующим каналом отмечена некорректность работы).

Сравнение результатов выполнения двух диверситетных программ позволило обнаружить 57,9 % отказов на 500 испытаниях. В табл. 3 это № 2, 3, 6, 8 – те отказы, для которых значения F1 и F2 различны. Опасные отказы имели место только для программного счетчика, который входит в общий базис, т. е. АБП решил задачу обнаружения одиночных отказов диверситетных базисов.

Значительный процент маскируемых отказов объясняется тем, что при испытаниях ячейки памяти проверялись полностью, несмотря на то что в них могли использоваться только некоторые биты. В таких случаях в большинстве своем отказы не влияют на работу системы. Однако, в некоторых случаях, когда команда микроконтроллера для выполнения операций задействует все слово, но функционально имеют смысл только несколько битов, отказы могут проявляться (например, операция вида AND 0x01 для выделения младшего бита выполняется со всей ячейкой памяти, и отказ SA1 старшего бита проявится в случае последующего прямого сравнения с единицей).

Обнаружение маскируемых отказов при АБП выполняется посредством взаимного тестирования аксиоматических базисов [13, 14, 21], его применение в данной работе не рассматривается.

Результаты испытания второго варианта выполнения ПО с учетом диверситета и самотестирования показаны в табл. 4.

Таблица 4. Испытания второго варианта выполнения ПО с самотестированием

№	E1	E2	F1	F2	SAFE_PCL	Отказ	Количество	%
1	0	0	0	0	~	Опасный	0	0
2	0	0	0	1	~	Защитный	211	24,4
3	0	0	1	0	~		144	16,7
4	0	0	1	1	~	Маскируемый	244	28,2
5	0	1	1	0	~	Защитный	32	3,7
6	1	0	0	1	~		113	13,1
7	0	0	0	0	–		54	6,25
8	0	1	0	0	–		22	2,55
9	1	0	0	0	–		22	2,55
10	1	1	0	0	–		22	2,55

Примечание. SAFE_PCL – состояние сигнала самотестирования программного счетчика: переменное (~), означающее что отказов не зафиксировано, и постоянное (–) – что зафиксирован отказ PCL.

Применение диверситета согласно АБП и самопроверка общего базиса позволили свести количество опасных отказов к нулю. Это было достигнуто в два этапа. Изначально диверсификация базисов позволила разделить факторы, ведущие к CCF, и тем самым дать возможность обнаружить 57,9 % отказов (результаты см. в табл. 3). В то же время разделение базисов позволило формализованно и целенаправленно, с помощью самотестирования подготовить средства (второй этап), которые успешно обнаруживают все оставшиеся 6,25 % опасных отказов, которые могли проявиться только в общем базисе (результаты см. в табл. 4).

6 Анализ результатов

Изначально теоретически было доказано, что отказы в независимых базисах будут проявляться независимо и это должно улучшить показатели безопасности и отказоустойчивости. Теперь данный тезис экспериментально подтвержден: с помощью диверситета были упразднены все опасные отказы, не влияющие на общий базис. Они либо обнаруживаются (один канал работает корректно, а второй с нарушениями), либо маскируются (во время функционирования системы никак не проявляются).

Вторым результатом является подтверждение утверждения о том, что диверситет позволяет обнаружить все одиночные отказы независимых базисов, но время их обнаружения не регламентируется. По́здне обнаружение может быть в случае, если имеется некий ресурс, который задействуется редко, из-за этого отказ будет проявляться также редко. В связи с этим для полноты решения

задач безопасности и отказоустойчивости необходима периодическая проверка базисов с помощью самотестирования.

Метод диверситетных базисов позволяет формализованно выделять общий базис, который подлежит отдельному рассмотрению. Это дает возможность выделить факторы, ведущие к CCF, и обратить на них особое внимание. Вместе с тем метод диверситетных базисов позволяет формализованно отнести факторы, ведущие к CCF, к разным базисам и тем самым целенаправленно решать проблему CCF.

Экспериментально показано, что общий базис (например, работоспособность общих ресурсов), нарушение которого ведет к CCF, необходимо обязательно контролировать, так как отказы, влияющие на его истинность, с большой вероятностью могут перевести систему в опасное состояние и диверситетное ПО не сможет решить данную проблему. Следует также отметить, что важной задачей является уменьшение общего базиса, что ведет к более эффективному обнаружению отказов средствами диверситета и облегчает задачу проверки общего базиса.

На примере показано, что диверситет и самотестирование полностью решили задачу обнаружения опасных отказов и тем самым отпадает необходимость самопроверки. При отказе возможен произвольный переход из допустимого состояния в другое допустимое (исходя из условий самопроверки), и такой переход не обнаруживается.

Усиление диверситета в данном эксперименте производилось без привлечения независимых разработчиков. Результаты испытаний показывают, что при усилении диверситета согласно АБП характеристики системы улучшаются.

Разделение регистров и независимое множество команд (во время выполнения шагов диверсификации) форсировало применение различных алгоритмов для решения одних и тех же задач. Например, обработка переходов между состояниями для трех версий была реализована по-разному, что показано на рис. 5 и 6.

Следует отметить, что диверситет может выполняться на разных уровнях: функциональных спецификаций, технологических алгоритмов, аппаратных средств и др. В нашем случае АБП предназначен для защиты от определенного множества отказов, что позволяет решать проблему CCF аппаратных средств на необходимом и достаточном уровне. Вместе с тем было замечено, что выполненные в ходе эксперимента действия способствовали повышению диверситета технологических алгоритмов и программы. Но для обоснования достаточности предлагаемого подхода требуется дополнительная экспертиза.

В ходе проектирования и разработки диверситетного ПО появилась возможность создания более высокоуровневых операций на каждом из базисов. Например, для операций копирования, передачи данных в порт, инкремента, декремента и других можно рассмотреть соответствующие им реализации на базисах (примеры показаны в табл. 5).

1	2	3

; Изменилось состояние?
movf STATE, 0
xorwf MEM_IN, 0
btfss STATUS, Z
goto end_body
; Корректно изменение?
movfw STATE
xorlw 3
xorwf MEM_IN, 0
btfsc STATUS, Z
goto to_safe
 	
; Исходное 00?
clrw
xorwf STATE, 0
btfsc STATUS, Z
goto s00
…
	; Вычисление индекса
	; для таблицы переходов
	movf IN_1,0
	andlw 0x03
	iorwf STATE_1,0
	; Переход в графе
	addwf PCL,1
	goto s0000
	goto s0001
	goto s0010
	goto s0011
	…
	; 00->00
	s0000:
	goto mout_1
	; 00->01
	s0001:
	movlw 0x04
	movwf STATE_1
	goto mminus_1
	…
		; Входные биты
		bsf MEM_IN_2, 0
		btfss IN1_2
		bcf MEM_IN_2, 0
		bsf MEM_IN_2, 1
		btfss IN2_2
		bcf MEM_IN_2, 1
		; Бинарный поиск
		; действия
		m: btfsc f0
		goto m1
		m0: btfsc f1
		goto m01
		m00: btfsc t0
		goto m001
		m000: btfsc t1
		goto mplus_2
		…

Рис. 5. Программа обработки состояний

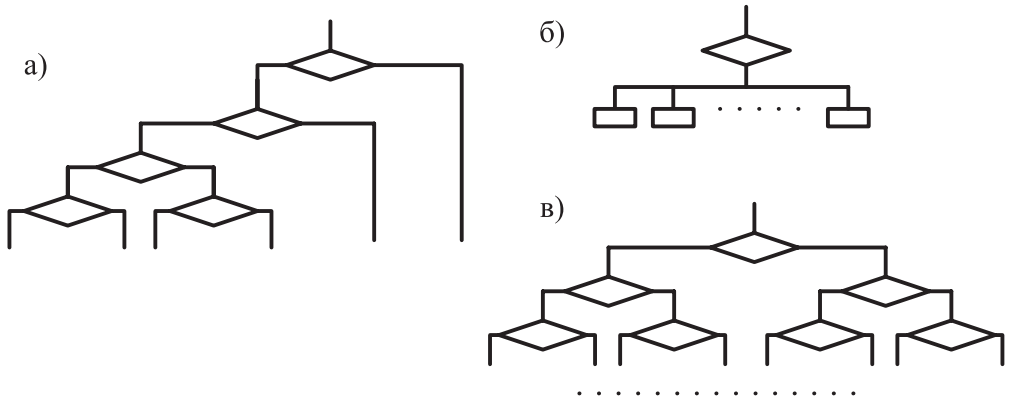

Рис. 6. Алгоритмы первого (*а*) и диверситетного (*б*, *в*) вариантов программы

Если на более высоком уровне реализуются одинаковые абстракции, то диверситетность разработки на разных базисах ограничивается рассматриваемым уровнем абстракции (рис. 7). Другими словами, если будут реализованы все необходимые высокоуровневые операции, то на их уровне абстракции проектирование ПО уже не будет зависеть от диверситетности базисов. Как результат, имеется возможность выбирать уровень абстракции диверситетных базисов.

Таблица 5. Высокоуровневые операции на разных базисах

Операция	Базис А	Базис В
Инкремент ячейки памяти	`movlw 1` `addwf MEM, 1`	`incf MEM`

Передача в порт	`movfw MEM`
	`movwf PORT`
		`; 8 раз, для каждого бита`
		`btfsc MEM, 1`
		`bsf PORT, 1`
		`btfss MEM, 1`
		`bcf PORT, 1`
		…

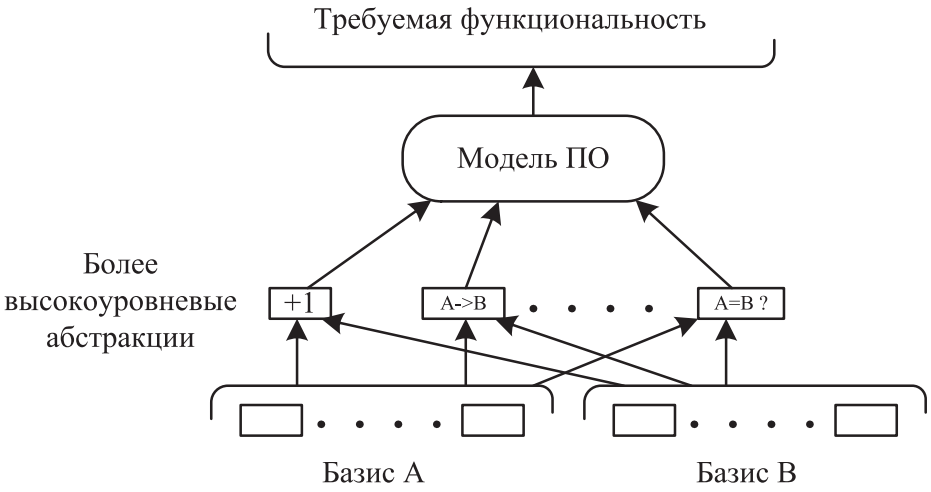

Рис. 7. Реализация высокоуровневых абстракций на различных базисах

Заключение

В статье, при использовании экспериментальных данных имитационных испытаний относительно применения АБП на основе диверситетных аксиоматических базисов, показано, что:

– возможно формализованное построение и доказательство безопасности безопасных и отказоустойчивых систем;

– используемый подход позволяет целенаправленно усиливать и обосновывать диверситет без привлечения сторонних разработчиков;

– применение данного подхода понуждает разработчиков к усилению диверситета;

– используемый подход позволяет формализованно определять факторы, ведущие к CCF, и в дальнейшем организовать целенаправленную защиту от их влияния;

– общий базис необходимо контролировать (например, с помощью самотестирования), так как влияющие на него отказы могут привести систему в опасное состояние, а диверситетное ПО не может решить эту проблему;

– для построения безопасной системы необходимо применение как диверситетных методов, так и самотестирования;

– диверсификация базисов может быть осуществлена на новом уровне абстракции, что позволяет создавать диверситетное относительно базисов ПО в рамках одной высокоуровневой модели.

Результаты имитационного моделирования подтверждают, что АБП на основе диверситетных аксиоматических базисов позволяет разрабатывать отказоустойчивые и безопасные системы с необходимыми свойствами. Показано, что возможно целенаправленное усиление диверситета базисов и уменьшение общего базиса, – это улучшает его способность обнаруживать опасные отказы и способствует повышению уровня безопасности и отказоустойчивости.

Таким образом, экспериментально подтверждена эффективность применения АБП на основе диверситетных аксиоматических базисов и положено начало его практическому применению.

Библиографический список

1. Smith D. J. Safety Critical Systems Handbook. A Straightforward Guide to Functional Safety, IEC 61508 and Related Standards, Including Process IEC 61511 and Machinery IEC 62061 and ISO 13849 / D. J. Smith, Kenneth G. L. Simpson // Oxford, UK, Elsevier Ltd, 2010. – 270 p.
2. Parry G. W. Common Cause Failure Analysis: A Critique and Some Suggestions / G. W. Parry. – Gaithersburg, Maryland, USA, Reliability Engineering and System Safety, 1991. – Vol. 34. – Issue 3. – Pp. 309–326.
3. Neumann P. G. Computer-Related Risks / P. G. Neumann. – N.Y., USA, Addison-Wesley Professional, 1995. – 384 p.
4. Leveson N. Safeware: System Safety and Computers / N. Leveson. – N.Y., USA, Addison-Wesley, 1995. – 680 p.
5. Weil V. Professional Responsibility for Harmful Actions / V. Weil, B. Ferry. – Kendall Hunt, Dubuque, Iowa, 1984. – Pp. 402–411.
6. Sagan S. D. The Limits of Safety: Organizations, Accidents, and Nuclear Weapons / S. D. Sagan. – Princeton University Press, Princeton, N. J., 1993. – 302 p.
7. Бочков К. А. Микропроцессорные системы автоматики на железнодорожном транспорте : учеб. пособие / К. А. Бочков, А. Н. Коврига, С. Н. Харлап. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 254 с.
8. Chen L. N-Version Programming: A Fault-Tolerance Approach to Reliability of Software Operation / L. Chen, A. Avizienis // FTCS-8: Proceedings of the Eighth Annual International Conference on Fault Tolerant Computing. – Toulouse, France, 1978. – Pp. 3–9.
9. Knight J. C. An Experimental Evaluation of the Assumption of Independence in Multiversion Programming / J. C. Knight, N. G. Leveson // IEEE Transactions on Software Engineering. – USA, N.J., 1986. – Vol. 12. – Issue 1. – Pp. 96–109.

10. Brilliant S. Analysis of Faults in an N-Version Software Experiment // IEEE Transactions on Software Engineering / S. Brilliant, J. C. Knight, N. G. Leveson. – Virginia Univ., Charlottesville, VA, USA, 1990. – Vol. 16. – Issue 2. – Pp. 238–247.
11. Brilliant S. The Consistent Comparison Problem in N-Version Programming / S. Brilliant, J. C. Knight, N. G. Leveson// IEEE Transactions on Software Engineering. – Virginia Commonwealth Univ., Richmond, VA, USA, 1989. – Vol. 15. – Issue 11. – Pp. 1481–1485.
12. Шубинский И. Б. Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа / И. Б. Шубинский. – Ульяновск : Изд-во журнала «Надежность», 2012. – 216 с.
13. Сивко Б. В. Аксиоматико-базисный подход для разработки безопасных и отказоустойчивых систем / Б. В. Сивко // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. – № 4. – С. 381–399.
14. Сивко Б. В. Диверситетные аксиоматические базисы для разработки безопасных и отказоустойчивых систем / Б. В. Сивко // Вестник БелГУТа : Наука и транспорт. – 2014. – № 1 (28). – С. 19–23.
15. Кириленко А. Г. Счетчики осей в системах железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. пособие / А. Г. Кириленко, А. В. Груша. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2003. – 75 с.
16. Сапожников Вал. В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов, Д. В. Гавзов. – М. : Транспорт, 1995. – 272 с.
17. Тильк И. Г. Новые устройства автоматики и телемеханики железнодорожного транспорта / И. Г. Тильк. – Екатеринбург : УрГУПС, 2010. – 168 с.
18. Martin B. PIC Microcontrollers An Introduction to Microelectronics / B. Martin. – Meppel, The Netherlands, Elsevier, 2nd edition, 2004. – 372 p.
19. ГОСТ Р МЭК 61508-2–2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Ч. 2 : ввод в действие с 2013-08-01. – М., 2012.
20. РТМ 32 ЦШ 1115842.01–94. Руководящий технический материал. Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Методы и принципы обеспечения безопасности микроэлектронных СЖАТ. – СПб., 1994. – 119 с.
21. Харлап С. Н. Разработка высоконадежных систем на основе метода взаимной проверки аксиоматических базисов / С. Н. Харлап, Б. В. Сивко // Надежность. – 2016. – № 1.
22. Бочков К. А. Методы и средства доказательства функциональной безопасности микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / К. А. Бочков, С. Н. Харлап, Д. Н. Шевченко // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – Днепропетровск : ДНУЗТ, 2011. – № 2. – С. 73–81.
23. Бочков К. А. Оценка временных параметров функционирования микропроцессорных устройств связи с объектами систем железнодорожной автоматики и телемеханики / К. А. Бочков, С. Н. Харлап, Б. В. Сивко // Вестник БелГУТа. Наука и транспорт. – 2012. – № 2 (25). – С. 12–15.

Bochkov Konstantin A.,
Kharlap Sergey N.,
Sivko Boris V.

Research laboratory
«Safety and electromagnetic compatibility of technical facilities»,
Belarusian State University of Transport, Gomel

Design of axiomatic based fault-tolerant systems

The article covers the solution of the problem of building a fault-tolerant and trustworthy microprocessor systems of railway automation and remote control using diversity axiomatic bases. As a system under the study the microprocessor device, performing the calculation of rolling stock axes, are used. Based on the simulation tests the qualitative comparison of fault tolerance and trustworthy of such systems with and without considered diversity are carried out. The article presents an example of sequential increasing of diversity, according axiomatic-based approach. The considered steps are: separation of memory and registers, separation of addresses, separation of sets of commands of the microprocessor and the protection of the software counter. It is also presents the formalization of conditions of diversity and the general cause failure protection, based on this. The example shows that diversity of axiomatic bases and self-testing of a common base solved the problem of dangerous failure detection. In this case the diversity solves the problem of detection of dangerous failures of diversity bases, and self-testing detects a maskable failures. It is also experimentally determined, that breakdown of a common base results in a general cause failures, and thus its mandatory control is justified. It was found, that application of this approach accelerates the development for rising the software diversity. It was revealed, that during the design and development of diversity, it is possible to create diversity high-level abstractions, that allows to select the level of diversity abstraction. The article covers the particularities of widespread application of this approach for development and verification of trustworthy and fault-tolerant systems.

fault tolerance; safety proof; diversity; formal methods; critical systems of data infrastructure; failure detection

References

1. Smith D. J., Kenneth G. L. Simpson. Safety Critical Systems Handbook. A Straightforward Guide to Functional Safety, IEC 61508 and Related Standards, Including Process IEC 61511 and Machinery IEC 62061 and ISO 13849. Oxford, UK, Elsevier Ltd, 2010, 270 p.
2. Parry G. W. Common Cause Failure Analysis: A Critique and Some Suggestions. Gaithersburg, Maryland, USA, Reliability Engineering and System Safety, 1991, vol. 34, issue 3, pp. 309–326.
3. Neumann P. G. Computer-Related Risks. NY, USA, Addison-Wesley Professional, 1995, 384 p.

4. Leveson N. Safeware: System Safety and Computers. NY, USA, Addison-Wesley, 1995, 680 p.
5. Weil V., Ferry B. Professional Responsibility for Harmful Actions. Kendall Hunt, Dubuque, Iowa, 1984, pp. 402–411.
6. Sagan S. D. The Limits of Safety: Organizations, Accidents, and Nuclear Weapons. Princeton University Press, Princeton, N. J., 1993, 302 p.
7. Bochkov K. A., Kovriga A. N., Kharlap S. N. Railway transport microprocessor automation systems: textbook. Gomel, BelGUT, 2013, 254 p.
8. Chen L., Avizienis A. N-Version Programming: A Fault-Tolerance Approach to Reliability of Software Operation. FTCS-8: Proceedings of the Eighth Annual International Conference on Fault Tolerant Computing, Toulouse, France, 1978, pp. 3–9.
9. Knight J. C., Leveson N. G. An Experimental Evaluation of the Assumption of Independence in Multiversion Programming. IEEE Transactions on Software Engineering, USA, N.J., 1986, vol. 12, issue 1, pp. 96–109.
10. Brilliant S., Knight J. C., Leveson N. G. Analysis of Faults in an N-Version Software Experiment. IEEE Transactions on Software Engineering, Virginia Univ., Charlottesville, VA, USA, 1990, vol. 16, issue 2, pp. 238–247.
11. Brilliant S., Knight J. C., Leveson N. G. The Consistent Comparison Problem in N-Version Programming. IEEE Transactions on Software Engineering, Virginia Commonwealth Univ., Richmond, VA, USA, 1989, vol. 15, issue 11, pp. 1481–1485.
12. Shubinsky I. B. Functional reliability of data systems. Methods of analysis. Ul'yanovsk, Publishing house «Nadezhnost'», 2012, 216 p.
13. Sivko B. V. Axiomatic-based approach for development of trustworthy and fault-tolerant systems. Automation on Transport (Avtomatika na transporte), 2015, vol. 1, issue 4, pp. 381–399.
14. Sivko B. V. Diversity axiomatic bases for development of trustworthy and fault-tolerant systems. Bulletin of BelGUT, Science and transport (Nauka i transport), 2014, issue 1 (28), pp. 19–23.
15. Kirilenko A. G., Grusha A. V. Axis couter in railway automation and remote control systems: textbook, Khabarovsk, Publishing house DVGUPS, 2003, 75 p.
16. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Khristov Kh. A., Gavzov D. V. Methods for bulding up safe microelectronic systems of railway automation. Moscow, Transport, 1995, 272 p.
17. Til'k I. G. New railway automation and remote control devices. Ekaterinburg, UrGUPS, 2010, 168 p.
18. Martin B. PIC Microcontrollers An Introduction to Microelectronics. Meppel, The Netherlands, Elsevier, 2nd edition, 2004, 372 p.
19. GOST R IEC 61508-2–2012. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. Part 2. Publication date 2013-08-01.
20. RTM 32 CSh 1115842.01–94. Technical guides. Safety of railway automation and remote control. Methods and principles for microelectronic SzhaT safety. St. Petersburg, 1994, 119 p.
21. Khaclap S. N., Sivko B. V. Development of high-reliable systems based on the method of cross-check of axiomatic bases. Nadejnost', 2016, No 1.

22. Bochkov K. A., Kharlap S. N., Shevchenko D. N. Methods and tools in the proof of functional safety of railway automation systems. Electromagnetic compability and safety in railway transport. Dnepropetrovsk, DIIT, 2011, № 2, pp. 73–81.
23. Bochkov K. A., Kharlap S. N., Sivko B. V. Time parameters assessment of microprocessor-based devices for communication with components of railway automation and remote control systems. Bulletin of BelGUT, Science and transport (Nauka i transport), 2012, № 2 (25), pp. 12–15.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Д. С. Марковым
Поступила в редакцию 06.08.2015, принята к публикации 16.10.2015

БОЧКОВ Константин Афанасьевич – проректор по научной работе, доктор технических наук, профессор, руководитель научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и ЭМС технических средств» Белорусского государственного университета транспорта.
e-mail: bochkov1999@mail.ru

ХАРЛАП Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент Белорусского государственного университета транспорта.
e-mail: hsn2007@belsut.gomel.by

СИВКО Борис Витальевич – инженер-программист, магистр технических наук, сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и ЭМС технических средств» Белорусского государственного университета транспорта.
e-mail: bsivko@gmail.com

© Бочков К. А., Харлап С. Н., Сивко Б. В., 2016

Техническая диагностика и прогнозирование

УДК 658.5.012.7

А. А. Иванов,
А. К. Легоньков
ООО «Компьютерные информационные технологии»

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

ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ С УСТРОЙСТВ ОБОРУДОВАНИЯ ПЕРЕЕЗДА АППАРАТУРОЙ АПК-ДК ПРИ ОТСУТСТВИИ ФИЗИЧЕСКОЙ ЛИНИИ И КРУГЛОСУТОЧНОГО ДЕЖУРСТВА

В статье, с целью повышения уровня безопасности движения транспортных средств на переездах при полуавтоматической блокировке, рассматриваются принципы построения систем диагностирования и аппаратура для организации передачи данных в центр мониторинга. Информация о работе автоматической переездной сигнализации, собираемая автоматом диагностики сигнальной установки, передается на концентратор информации центрального поста диагностирования и мониторинга дистанций сигнализации, централизации и блокировки дорог по GSM-каналу. В релейном шкафу переезда устанавливается GSM-модем, подключаемый к устройствам съема данных с помощью интерфейса RS-485, а в помещении центрального поста – GSM-роутер, взаимодействующий с концентратором по интерфейсу Ethernet.

На примере релейной автоматической светофорной сигнализации показано, что при отсутствии физической линии и круглосуточного дежурства работников службы движения на переезде при проследовании поездов по переезду в реальном масштабе времени регистрируются дискретные сигналы реле и аналоговые сигналы с действующих устройств сигнализации, централизации и блокировки. Принципиальные схемы передачи информации могут являться исходными данными для формирования нормативно-справочной информации при адаптации программного обеспечения аппаратно-программного комплекса диспетчерского контроля.

интерфейс; роутер; шлагбаум; мониторинг; контроллер; манипулирующая последовательность; среднеквадратичное значение; фазоманипулированная посылка; светодиодные головки; концентратор информации; тональные рельсовые цепи; автомат диагностики

Введение

Безопасность движения поездов и автотранспорта на железнодорожных переездах во многом зависит от работы устройств автоматической переездной сигнализации. Эти устройства при приближении поезда подают команду на прекращение движения автотранспорта через переезд. В зависимости от интенсивности движения поездов и автотранспорта и ряда других условий они оснащаются автоматическими шлагбаумами, а также устройствами заграждения переездов [1].

По способу управления движением переезды могут быть регулируемыми и нерегулируемыми. К регулируемым относятся переезды, оборудованные устройствами автоматической переездной сигнализации, извещающей водителей транспортных средств о подходе поезда, охраняемые или неохраняемые дежурными работниками, которым поручено регулировать движение поездов и транспортных средств на переезде. К нерегулируемым относятся переезды, не оборудованные устройствами переездной сигнализацией и не обслуживаемые дежурными по переездам.

На переездах, обслуживаемых дежурным работником, применяется автоматическая светофорная сигнализация со шлагбаумами, при которой перевод брусьев шлагбаумов в закрытое (горизонтальное) положение осуществляется автоматически через расчетное время после вступления поезда на участок приближения и включения звуковой и светофорной сигнализации [2]. При оборудовании переезда автоматической светофорной сигнализацией по обе стороны переезда устанавливаются переездные светофоры с правой стороны автомобильной дороги. Переездные светофоры имеют светофорные головки с двумя попеременно мигающими красными огнями, дополняемые акустическими сигналами, включаемыми автоматически при приближении поезда на обеспечивающее заблаговременное освобождение переезда транспортными средствами расстояние и выключаемыми после проследования поезда.

Переездные светофоры могут дополняться бело-лунным огнем, сигнализирующим об исправной работе устройств переездной сигнализации [3]. При мигающих бело-лунных и выключенных красных огнях переезд открыт для автотранспорта. Попеременно мигающие красные огни запрещают автотранспорту проезд переезда. В случае погасших бело-лунных и красных сигналов движение автотранспорта разрешается только при отсутствии в пределах видимости приближающегося к переезду поезда. При отключении переездной сигнализации или ее неисправности об этом извещаются дежурный ближайшей станции, инженер по мониторингу дистанции и технологи дорожного центра.

Четкая работа железнодорожных переездов – источников повышенной опасности для поездов и транспортных средств, обслуживающего персонала особенно важна:

– на малодеятельных участках, например с полуавтоматической блокировкой (ПАБ);

– при недостаточно полной информации о функционировании устройств на переезде (отказах).

Анализ дорожно-транспортных происшествий на железнодорожных переездах показывает, что в подавляющем большинстве случаев они происходят по вине водителей автотранспортных средств [1, 4].

Совершенствование обслуживания устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) с одновременным контролем выполнения регламентных и ремонтных работ на переезде немыслимо без постоянного контроля и мониторинга аппаратуры переезда.

В последние годы на железных дорогах России для контроля поездов на перегонах и диагностирования устройств сигнальных установок и переездов, отображения и архивации поездного положения на участках и станциях, регистрации отказов и сбоев в работе устройств СЦБ, выявления отказов элементов аппаратуры применяется система АПК-ДК [5–8]. Автономность контроля объектов автоматизации, территориальное рассредоточение переездов, отсутствие, как правило, в системе ПАБ каналов передачи данных с переезда на станцию не позволяет своевременно (в масштабе реального времени) передавать и получать в автоматизированном режиме данные прогноза о состоянии и измерении параметров устройств СЦБ.

1 Функции автомата диагностики сигнальной установки

В АПК-ДК для оценки правильности функционирования устройств автоматической переездной сигнализации (АПС) применяются автоматы диагностики сигнальных установок (АДСУ-24/16). Их использование обеспечивает съем, измерение параметров, кодирование информации о текущем состоянии устройств АПС для последующей передачи в концентратор линейного пункта и далее в центральный пункт диагностирования и мониторинга (ЦПДМ) АПК-ДК [9, 10].

Конструкция АДСУ-24/16 построена по модульному принципу и состоит из основного объединяющего устройства – контроллера АДСУ-24/16 и восьми автономных модулей измерителей тока диспетчерского контроля (ИТДК). Питание АДСУ-24/16 и модулей ИТДК осуществляется постоянным напряжением от 10 до 19 В или переменным напряжением от 8 до 13,5 В, частотой 50±0,5 Гц.

Автомат диагностики сигнальных установок АДСУ-24/16 обеспечивает:

– регистрацию информации с «сухих» одиночных контактов шестнадцати реле релейного шкафа АПС;

– измерение величины постоянного или действующего значения переменного напряжения синусоидальной формы в шестнадцати контрольных точках в системах АПС;

– измерение временных параметров элементов цикла манипулирующей последовательности при обнаружении импульсов переменного или постоянного напряжения;

– опрос автономных устройств измерения среднеквадратичного значения постоянного, переменного или импульсов переменного тока в собственной сети, организованной на последовательном интерфейсе RS-485;

– формирование информационной посылки в виде циклического последовательного кода.

Прибор АДСУ-24/16 формирует синусоидальный сигнал, фазоманипулируемый посылками последовательного циклического кода в соответствии с текущим состоянием контактных и измерительных входов, и состоит:

– из шестнадцати гальванически развязанных каналов измерения среднеквадратичного значения напряжения постоянного или переменного тока;

– шестнадцати каналов контроля целостности цепи типа «сухой контакт реле» (далее – контактные датчики);

– восьми автономных модулей измерения среднеквадратичного значения тока;

– гальванически развязанного интерфейса стандарта RS-485 для организации сети автономных устройств измерения;

– гальванически развязанного интерфейса согласования с линией передачи данных (линией двойного снижения напряжения (ДСН)).

2 Функциональная схема передачи данных по GSM-каналу

Передача данных с переезда на центральный пункт диагностирования АПК-ДК (СТДМ) организуется с использованием GSM-канала (рис. 1). На переезде предусматриваются: GSM-модем, прибор АДСУ-24/16 и модули измерителей тока ИТДК, а на центральном пункте диагностирования – GSM-роутер [11].

Состояние устройств АПС переезда при полуавтоматической блокировке регистрируется контроллером АДСУ-24/16 совместно с модулями ИТДК, которые устанавливаются в релейном шкафу. Для организации передачи данных на ЦПДМ АПК-ДК также в шкафу размещается промышленный GSM-модем типа MOXA OnCeLL G3251, подключаемый к устройствам съема информации АДСУ-24/16 и ИТДК с помощью последовательного интерфейса RS-485. Для передачи информации по GSM-модему предусматривается антенна с жестким креплением на релейном шкафу аппаратуры переездной сигнализации, а в помещении ЦПДМ – GSM-роутер с антенной. Антенна с магнитным креплением устанавливается на верхней крышке шкафа ЦПДМ. GSM-роутер через интерфейс Ethernet подключается к концентратору информации АПК-ДК для передачи данных на центральный пост ЦПДМ.

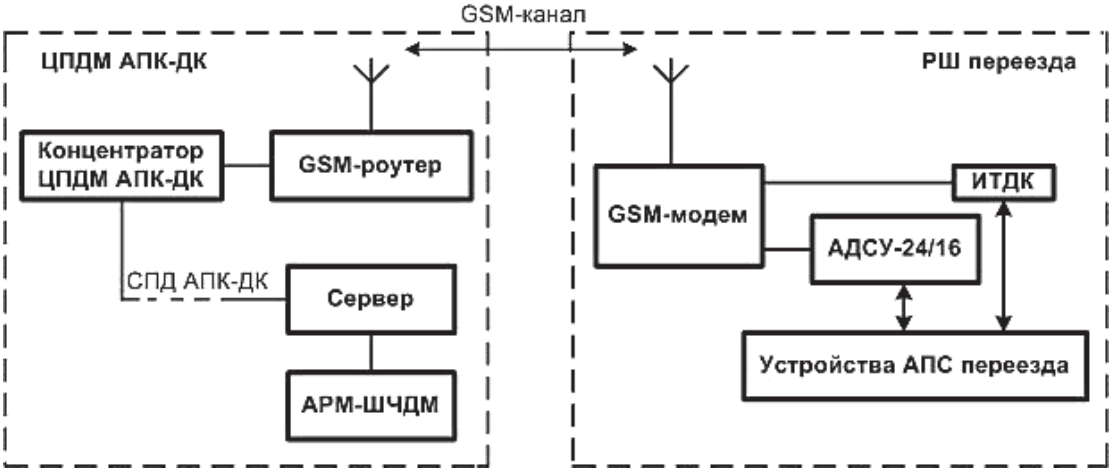

Рис. 1. Функциональная схема с организацией GSM-канала

Информация, собираемая АДСУ-24/16 и ИТДК, передается в концентратор по GSM-каналу и становится доступной пользователям автоматизированного рабочего места инженера по мониторингу (АРМ-ШЧДМ). Для связи с GSM-роутером концентратор дополнительно комплектуется сетевой картой.

Промышленный GSM-модем типа MOXA OnCeLL G3251 работает в полосе частот 850/900/1800/1900 МГц (GSM/GPRS) [12], имеет два интерфейса RS-232/422/485 и интерфейс Ethernet, работает в диапазоне температур –30…+ 55º С. Применяется GSM-роутер типа Huawei b260, работающий в полосе частот 900/1800 МГц (EDGE/GPRS/GSM), 900/2100 МГц (HSUPA/HSPDA/UMTS).

Канал связи, предоставляемый оператором сотовой связи, должен обеспечивать статические IP-адреса GSM-оборудования и возможность установления tcp-соединений между модемами.

В качестве концентратора информации ЦПДМ используется PC-совместимая ПЭВМ промышленного исполнения [5].

Устройства переездной автоматики, ЦПДМ и аппаратуры передачи данных по GSM-каналам должны увязываться на физическом и программном уровнях.

3 Схема электрических соединений GSM-модема с устройствами автоматики переезда

Информация с контроллеров релейного шкафа переезда собирается во время мониторинга концентратором ЦПДМ при установлении tcp-соединения с GSM-модемом (рис. 2).

Для соединения GSM-модема MOXA OnCell G325 с АДСУ-24/16 и ИТДК на физическом уровне используется интерфейс RS-485. Число соединений

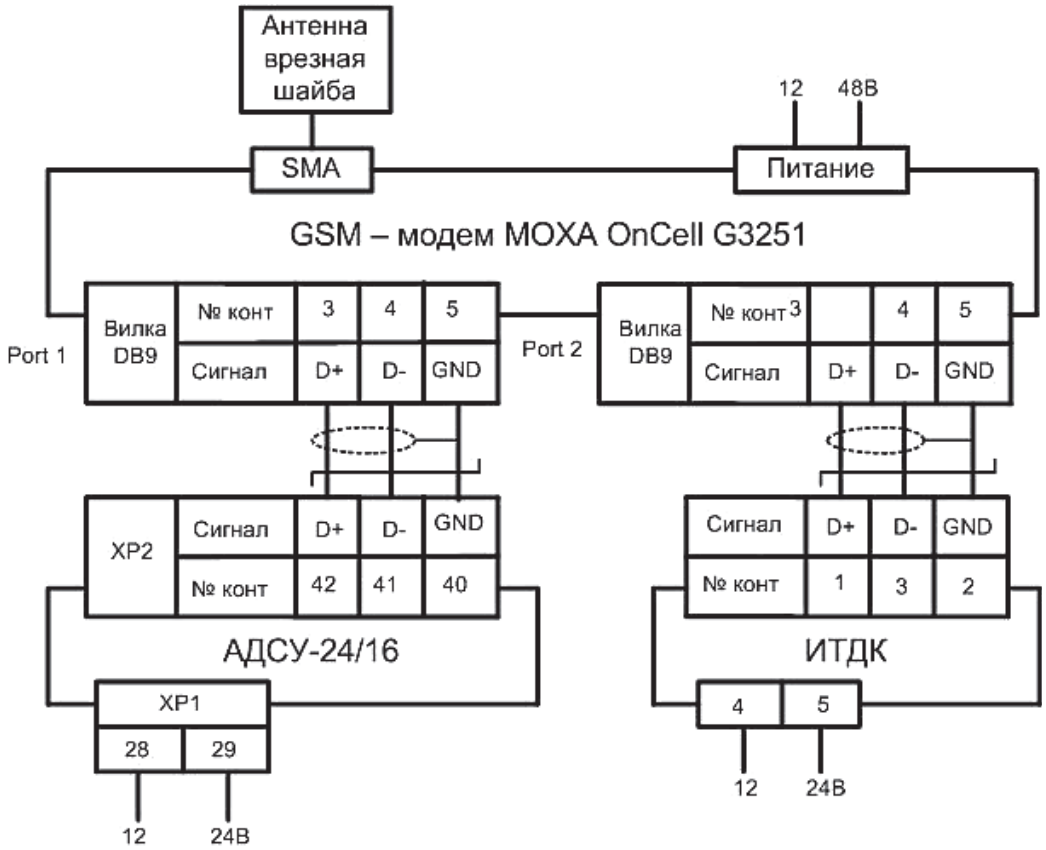

Рис. 2. Схема электрических соединений GSM-модема с АДСУ-24/16 и ИТДК

зависит от количества последовательных портов, используемых на GSM-модеме. После установки tcp-соединений запросы и ответы контроллеров по интерфейсам RS-485 передаются через IP-сеть. Период опроса контроллеров выбирается с учетом скорости канала передачи данных и типа контроллеров.

Для исключения потери информации при опросе контроллеров используются технологии повторного запроса (tcp-протокола и драйверов контроллеров). При отсутствии связи в течение заданного времени происходит перезапуск модуля GSM-связи. Схема приема сообщений с переезда на ЦПДМ АПК-ДК с подключением GSM-роутера показана на рис. 3.

4 Устройства АПС в увязке с передачей данных с переезда в систему АПК-ДК

Ограждающие устройства АПС с точки зрения безопасности движения поездов и транспортных средств должны иметь высокий уровень автоматизации устройств железнодорожной автоматики, который достигается путем их совершенствования. Информация о контроле поездного положения на участке и технического диагностирования устройств позволяет улучшить процесс управления.

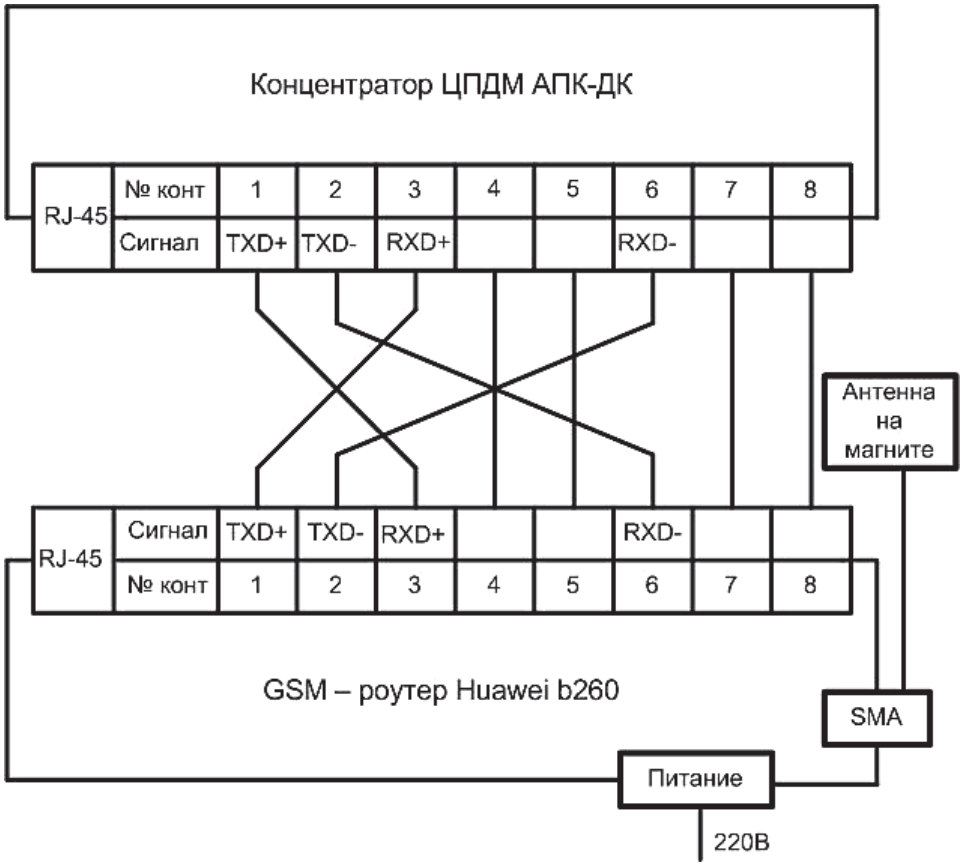

Рис. 3. Схема соединений GSM-роутера и концентратора информации ЦПДМ АПК-ДК

Для примера рассматриваются схемы управления переездом на участке однопутного движения поездов с системой организации их следования через переезд при полуавтоматической блокировке. Переезд оборудован устройствами переездной сигнализацией с применением тональных рельсовых цепей (ТРЦ). Схемы устройств управления выполняют следующие функции:

– обнаружения приближающегося к переезду поезда и контроль его прослеживания через переезд;

– управления автоматической переездной сигнализацией;

– информирования водителей транспортных средств о режиме передвижения по переезду;

– передачи информации о поездной ситуации в районе переезда для работников заинтересованных служб дороги;

– регистрации данных и мониторинга исправного состояния устройств [13].

С применением ТРЦ упраздняются изолирующие стыки на переезде и исключаются случаи отказов системы при коротком замыкании этих стыков и подаче извещения о приближении поезда к переезду [14].

На переезде предусматриваются четыре участка ТРЦ (1У, 2У, 3У, 4У): два с рельсовыми цепями 1П, 2П, примыкающие к переезду, длиной не более 250 м и не менее 150 м и два с рельсовыми цепями длиной до 1000 м для огра-

ничения участков приближения. Используются ТРЦ с несущими частотами 480, 580, 780 Гц и частотами модуляции 8 или 12 Гц без изолирующих стыков (рис. 4).

Путевые устройства ТРЦ включают приемную и передающую аппаратуру. Передающая аппаратура рельсовых цепей содержит генераторы ГП3 и фильтры ФПМ, выполненные в виде функциональных блоков. На приемных концах рельсовых цепей размещаются блоки путевых приемников ПП с основными и дополнительными реле: БПО, БПД; 2ПО, 2ПД; 1ПО, 1ПД; АПО, АПД, АП1О, АП1Д. В состав участка приближения 1У входят две тональные рельсовые цепи – АП1 и АП2. На рис. 4 приведены схемы аппаратуры передающих (генераторных) и приемных (релейных) концов тональных рельсовых цепей.

В схемах управления переездной сигнализацией движение поездов в четном и нечетном направлениях регистрируется с помощью реле ЧН, НН. Коммутация участков приближения к переезду 1У, 2У, 3У, 4У осуществляется в зависимости от направления движения поезда. При отсутствии поезда на участке приближения включающее реле В и его повторители ПВ, ПВ1, ПВ2, а также реле ВБА и ВББ включены. На сигналах светофоров А и Б формируется мигающий режим (0,75 и 0,75 с) горения бело-лунного огня. Мигающая сигнализация переездных огней светофоров обеспечивается микроэлектронным датчиком импульсов ДИМ-1 и реле МБО, КМ при горении бело-лунных и красных огней.

Горение огней светофорных светодиодных головок (ГСС) переездных светофоров контролируется огневыми реле АБО, АО1, АО2, ББО, БО1, БО2 светофоров А и Б (рис. 5). Контактами реле ПО проверяется состояние всех огневых реле и аварийного реле А2 резервного питания от аккумуляторной батареи и контроля питания рельсовых цепей переезда (реле КРБ).

При горении мигающего бело-лунного огня контролируются:

– исправность работы комплектов реле, обеспечивающих мигающий режим горения сигнальных огней (красных и бело-лунных);

– исправное состояние любой лампы красного огня на переездных светофорах;

– свободное состояние рельсовых цепей участков приближения;

– светодиодные головки ГСС платы питания и светодиодов.

Плата светодиодов содержит световой блок, состоящий из 60 параллельных цепочек, в каждую из которых последовательно включается по четыре светодиода. Световой блок посредством платы питания согласуется с типовым устройством контроля целостности нитей ламп переездного светофора на базе реле АОШ2-180/0,45 [15].

Со вступлением поезда на участок приближения 1У выключаются реле ПВ1 и ПВ2 и через контакты ВБА и ВББ – лампы бело-лунных огней переездных светофоров, а также реле М1 и М2. Срабатывает реле КМК, включаются лампы красных огней переездных светофоров, которые передают приказ остановки перед переездом транспортных средств. На переезде, поочередно мигая, включаются и выключаются красные огни светофорной сигнализации.

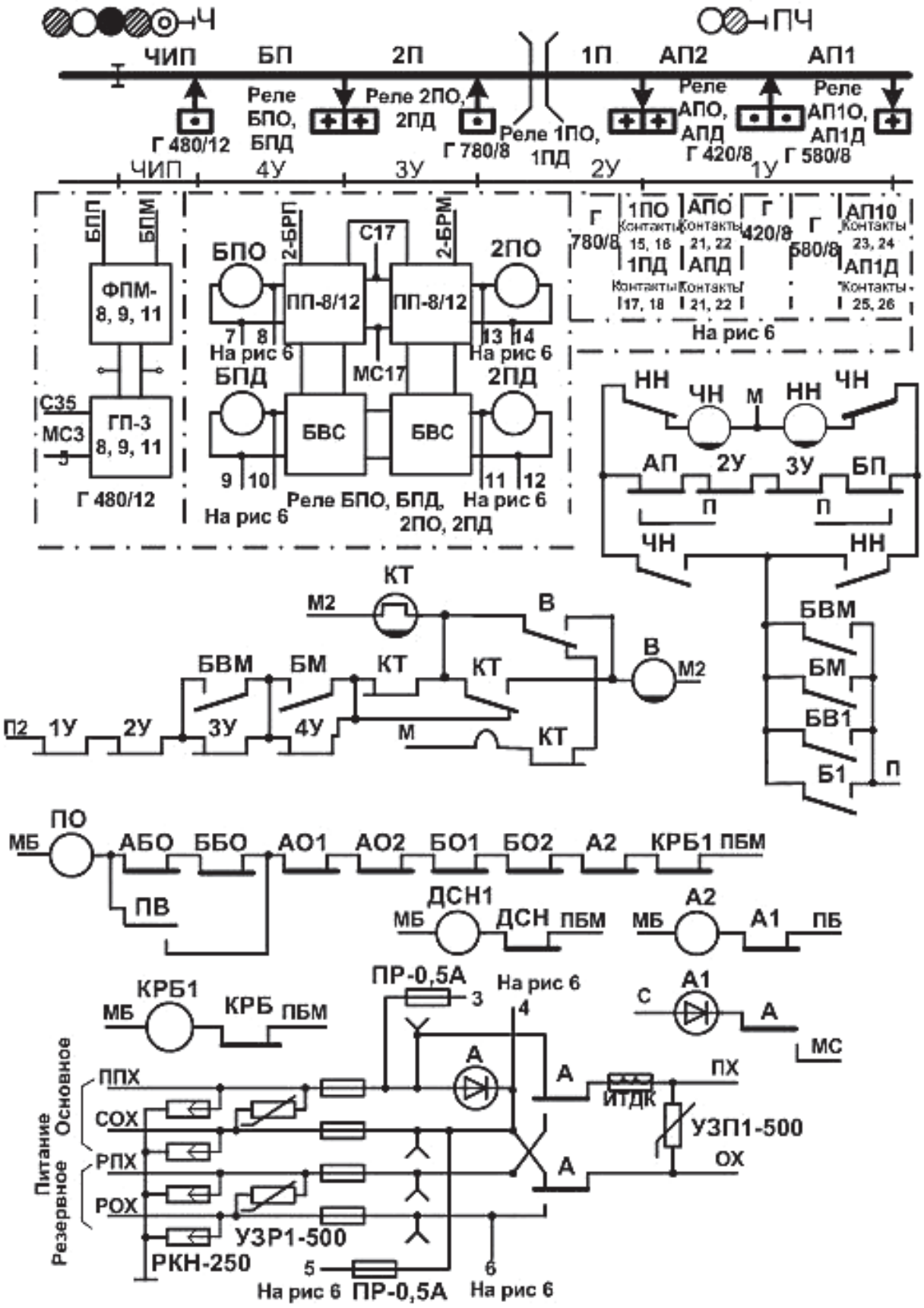

Рис. 4. Схемы управления релейной переездной сигнализацией

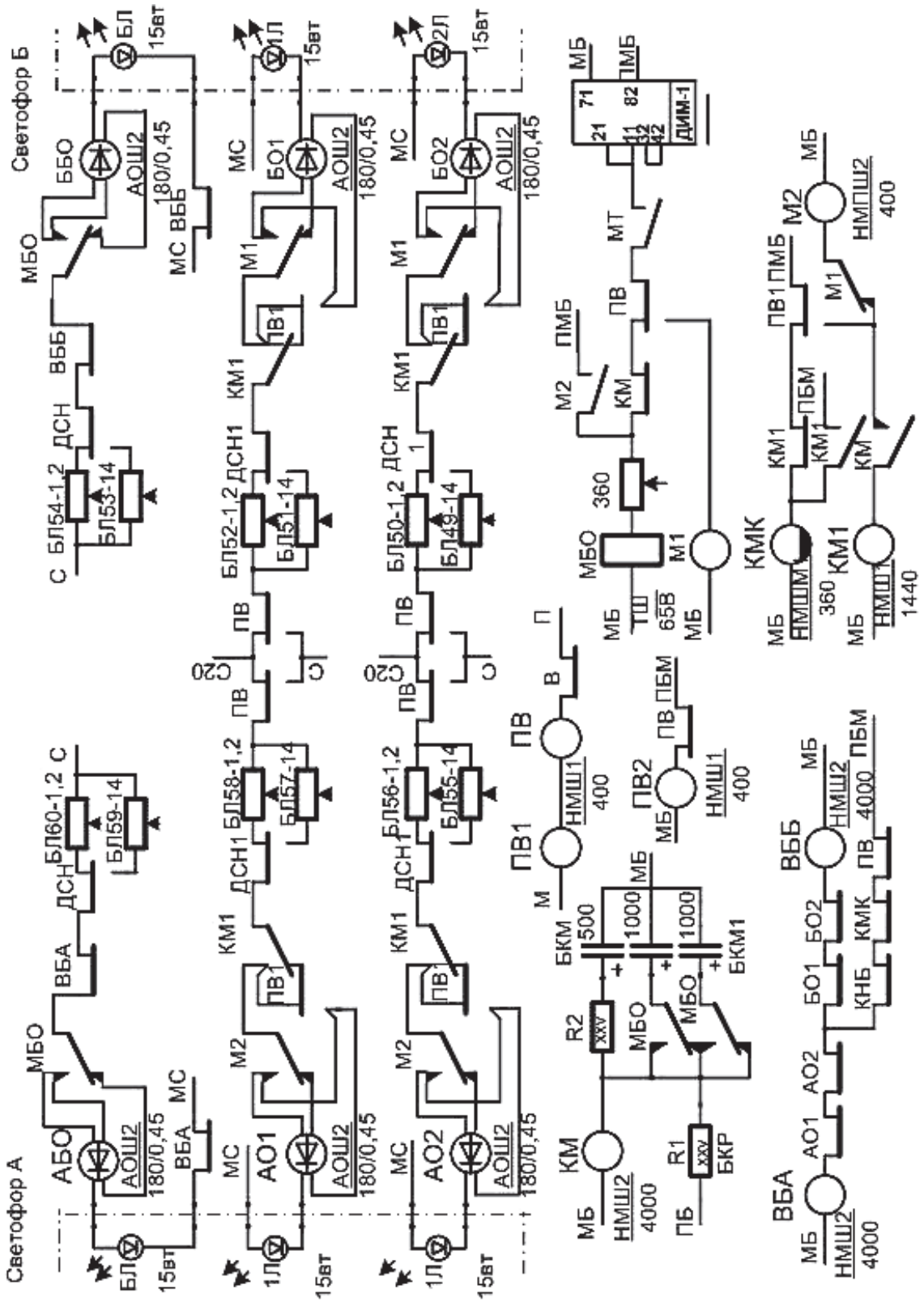

Рис. 5. Схемы включения переездных светофоров

Когда поезд освободит участок приближения и переезд, реле ПВ1 и ПВ2 выключают лампы красных огней переездных светофоров.

При аварии и пропадании основного питания автоматической светофорной сигнализации (контрольное реле А) в системе предусматривается резерв от аккумуляторной батареи (реле А2).

Подключение автомата диагностики АДСУ-24/16 к устройствам автоматической переездной сигнализации показано на рис. 6. Схема АДСУ-24/16 состоит из двух модулей измерения напряжений, восьми модулей измерения токов, модуля цифровой обработки и автономного модуля измерения тока ИТДК.

На переезде выполняется контроль дискретных сигналов состояния реле: наличия основного и резервного питания (А, А2); установленного направления движения поездов (НН, ЧН); включения режима ДСН; исправности комплекта мигания (КМ) и аккумуляторной батареи (КРБ); целостности нитей огней переездной сигнализации (ПО); освобождения поездом участка приближения и переезда (ПВ2); целостности ламп бело-лунных головок светофоров (АБО, ББО); основных и дополнительных реле тональных рельсовых цепей (БПО, БПД; 2ПО, 2ПД;1ПО, 1ПД; АПО, АПД, АП1О, АП1Д).

В контрольных точках аппаратуры переезда регистрируются соответственно напряжения основного и резервного питания (3–4; 5–6) и значения напряжений на обмотках основных и дополнительных реле тональных рельсовых цепей – БПО, БПД; 2ПД, 2ПО; 1ПО, 1ПД; АПД, АПО; АП1О, АП1Д (7–8; 9–10; 11–12; 13–14; 15–16; 17–18; 19–20; 21–22; 23–24; 25–26). На основе этих данных формируется в реальном времени информация о рабочем состоянии автоматической светофорной сигнализации для передачи в центр мониторинга.

Заключение

Преимущества GSM-канала, используемого при передаче данных о функционировании и диагностировании устройств переездной сигнализации в ЦПДМ:

– мгновенная передача;

– постоянный контроль связи;

– диагностирование технических средств объектов переезда.

Выполняется постоянный мониторинг контроля параметров и состояния рельсовых цепей участков приближения поезда к переезду, светофорной сигнализации и анализ горения ламп разрешающих и запрещающих огней для автотранспортных средств.

Информация о случаях отключения сигнализации или ее неисправности на необслуживаемых переездах передается работниками службы движения поездов при использовании систем полуавтоматической блокировки в реальном времени ответственным службам дороги.

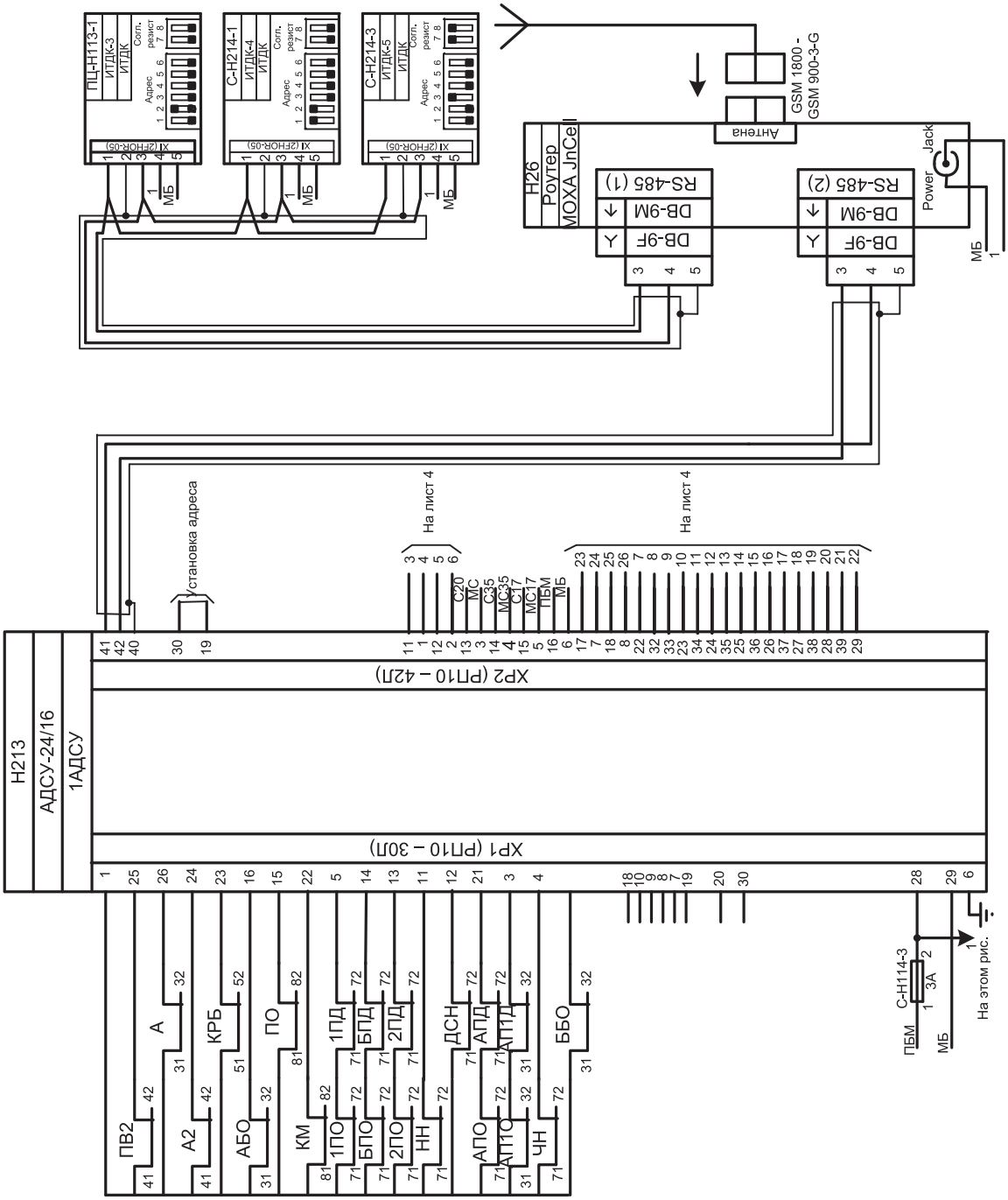

Рис. 6. Схема подключения устройств АПК-ДК и аппаратуры передачи данных в центр мониторинга

Данные о случаях аварийной обстановки на переезде, полученные с устройств переезда и архивированные в центре мониторинга дистанции СЦБ, могут использоваться при расследовании причины дорожно-транспортного происшествия для последующего анализа и выводов.

Устройства АПК-ДК для передачи данных в ЦПДМ по GSM-каналу о работе автоматической светофорной сигнализации, при отсутствии физической линии и круглосуточного дежурства работников службы движения, внедрены на Октябрьской железной дороге.

Библиографический список

1. Сапожников Вл. В. Эксплуатационные основы автоматики и телемеханики : учебник для вузов ж.-д. транспорта / Вл. В. Сапожников, И. М. Кокурин, В. А. Кононов, А. А. Лыков, А. Б. Никитин ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : Маршрут, 2006. – 247 с.
2. Технические решения 419311-СЦБ.ТР. Схемы переездной сигнализации для переездов, расположенных на перегонах, при любых средствах сигнализации и связи. АПС-93 : утв. МПС 14.03.1995, ЦШТЕХ-11/2. Альбом 1. Переездная сигнализация на перегонах с автоблокировкой. – СПб. : Гипротранссигналсвязь, 1996. – 82 с.
3. Нормы технологического проектирования устройств автоматики и телемеханики на федеральном железнодорожном транспорте (НТП СЦБ). – СПб. : ГУП «Гипротранссигналсвязь», 1999. – 76 с.
4. Сеньковский О. А. Берегись автомобиля / О. А. Сеньковский // Автоматика, связь, информатика. – 2004. – № 4. – С. 24–27.
5. Молодцов В. П. Системы диспетчерского контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. пособие / В. П. Молодцов, А. А. Иванов. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2010. – 140 с.
6. 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.
7. Ефанов Д. В. Обеспечение безопасности движения за счет технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Ефанов, П. А. Плеханов // Транспорт Урала. – 2011. – № 3. – С. 44–48.
8. Ефанов Д. В. Основы построения и принципы функционирования систем технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. пособие / Д. В. Ефанов, А. А. Лыков. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2012. – 59 с.
9. Иванов А. А. Новые приборы регистрации параметров устройств железнодорожной автоматики в системе АПК-ДК (СТДМ) / А. А. Иванов, А. К. Легоньков, В. П. Молодцов // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. – № 3. – С. 282–297.
10. ТМП-1139499777. Аппаратно-программный комплекс диспетчерского контроля. Система технического диагностирования и мониторинга АПК-ДК (СТДМ). – СПб. : ООО «Компьютерные информационные технологии», 2011. – 180 с.

11. Технические решения 39499777-15-ТР-03. Передача данных между устройствами АПК (СТДМ) по каналам связи GSM-сетей : утв. Управлением автоматики и телемеханики ЦДИ филиала ОАО «РЖД» 10.08.2015. – СПб., 2015. – 13 с.
12. Бойник А. Б. Системы интервального регулирования движения поездов на перегонах : учеб. пособие / А. Б. Бойник, С. В. Кошевой, С. В. Панченко, В. А. Сотник. – Харьков : УкрГАЖТ, 2005. – 25 с.
13. Сапожников Вал. В. Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте : учеб. пособие / Вал. В. Сапожников, Л. И. Борисенко, А. А. Лыков, В. П. Молодцов ; под ред. В. В. Сапожникова. – М. : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011. – 288 с.
14. Виноградова В. Ю. Перегонные системы автоматики : учебник для техникумов и колледжей ж.-д. транспорта / В. Ю. Виноградова, В. А. Воронин, Е. А. Казаков, Д. В. Швалов, Е. Е. Шухина ; под ред. В. Ю. Виноградовой. – М. : Маршрут, 2005. – 292 с.
15. Есюнин В. И. Светодиодные светофоры / В. И. Есюнин, А. Е. Ефрюшин // Автоматика, связь, информатика. – 1999. – № 12. – С. 25.

Ivanov Alexander A.,
Legon'kov Andrey K.
Limited liability company «Komp'uternye informatsionnye tekhnologii»

Molodtsov Vitaly P.
Petersburg State Transport University
«Automation and Remote Control on Railways» department

Data transmission from APK-DK devices of rail crossing under the absence of physical link and clock duty

Authors describe principles of formation and equipment for transmission of data to monitoring center for transport traffic on rail crossings on semi-automatic line block safety improvement. Data about automatic level crossing operation collected by signal point diagnostic machine (ADSU-24/16) is transmitted to the data hub of diagnostic and monitoring central office (CPDM) using GSM-channel. Rail crossing relay cabinet contains GSM-modem connected to information collecting devices by RS-485 interface; CPDM room contains GSM-router, interacting with the hub by Ethernet.

It is shown on the example of relay automatic signaling that under the absence of physical link and clock duty of traffic control service personnel on the rail crossing digital signals from relays and analog signals from operating devices are being collected automatically. Principal schematics of information transmission could be the initial data for NSI formation within APK-DK software adaptation.

interface; router; barrier; monitoring; controller; manipulating sequence; RMS; phase-manipulated package; LED signal; data hub; audio frequency track circuit; diagnostic machine

References

1. Sapozhnikov Vl. V., Kokurin I. M., Kononov V. A., Lykov A. A., Nkitin A. B. Operating base of automation and remote control. Textbook for railway transport high schools. Eds. Vl. V. Sapozhnikov. Moscow, Marshrut, 2006, 247 p.

2. Technical solutions 419311-SCB.TR. Railway crossing signaling circuits for crossings located on open lines with any means of signaling and communication. APS-93. App. by MoR 14.03.1995. TsShTECh-11/2. Album 1. Railway crossing signaling on open lines with auto line block.St. Petersburg, Giprotranssignalsvyaz, 1996, 82 p.

3. Norms of technological design of railway automation and remote control devices on federal railway transport (NTP SCB). St. Petersburg, Giprotranssignalsvyaz, 1999, 76 p.

4. Senkovsky O. A. Beware of the car. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2004, issue 4, pp. 24–27.

5. Molodtsov V. P., Ivanov A. A. Dispatching control and railway automation and remote control monitoring systems: manual. St. Petersburg, PSTU, 2010, 140 p.

6. Lykov A. A., Efanov D. V., Vlasenko S. V. Technical diagnostics and monitoring of railway automation and remote control devices state. Transport of the Russian Federation, 2012, issue 5, pp. 67–72.

7. Efanov D. V., Plekhanov P. A. Increase of railway traffic reliability and safety at the expense of technical diagnosing systems and monitoring of railway signaling and interlocking devices. Transport of the Urals, 2011, issue 3, pp. 44–48.

8. Efanov D. V., Lykov A. A. Base of formation and principles of functioning of technical diagnostic and monitoring systems of railway automation and remote control devices: textbook. St. Petersburg, Petersburg State Transport University, 2012, 59 p.

9. Ivanov A. A., Legon'kov A. K., Molodtsov V. P. New devices for registration of parameters of railway automation hardware within APK-DK (STDM) system. Automation on Transport, 2015, vol. 1, issue 3, pp. 282–297.

10. TMP-1139499777 Hardware-software complex of supervisory control. System of technical diagnostics and monitoring APK-DK (STDM). St. Petersburg, JSC «Kompjuternie informatsionnie technologii», 2011, 180 p.

11. Technical solutions 39499777-15-TR-03. Data transmission between APK-DK (STDM) devices by GSM channels. App. by Office of automation and remote control CDI branch JSC «RZD» 10.08.2015. St. Petersburg, 13 p.

12. Bojnik A. B., Koshevoj S. V., Panchenko S. V., Sotnik V. A. Systems of interval regulation of train traffic on open lines. Textbook. Kharkov, USURT, 2005, 25 p.

13. Sapozhnikov Val. V., Borisenko L. I., Lykov A. A., Molodtsov V. P. Automation and remote control for railway transport: manual, under the editorship Val. V. Sapozhnikov. MOSCOW, FGBOU «Training center for railway transport education», 2011, 288 p.

14. Vinorgadova V. Yu., Voronin V. A., Kazakov E. A., Shvalov D. V., Shukhina E. E. Open line automation systems: Textbook for railway transport colleges, eds. V. Yu. Vinogradova. Moscow, Marshrut, 2005, 292 p.

15. Esyunin V. I., Efryushin A. E. LED signals. Avtomatika, svyaz`, informatica, 1999, issue 12, p. 25.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Д. В. Ефановым
Поступила в редакцию 20.10.2015, принята к публикации 02.11.2015

ИВАНОВ Александр Алексеевич – главный инженер ООО «Компьютерные информационные технологии».
e-mail: sdum@inbox.ru

ЛЕГОНЬКОВ Андрей Кириллович – начальник технического отдела ООО «Компьютерные информационные технологии».
e-mail: sdum@inbox.ru

МОЛОДЦОВ Виталий Прокопьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: moviemlu@rambler.ru

© Иванов А. А., Легоньков А. К., Молодцов В. П., 2016

Электронное моделирование

УДК 625.25

П. Е. Булавский, д-р техн. наук,
Д. С. Марков, канд. техн. наук
Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»,
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Предложена методика получения альтернативной модели в виде аналитического выражения для оценки временных характеристик технологических цепочек электронного документооборота технической документации в хозяйстве автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте. Методика реализована в виде алгоритма последовательного перехода от формализованной схемы технологических цепочек к альтернативной модели. Алгоритм представляет собой последовательность операций синтеза: формализованных схем, графов технологических цепочек, матриц смежности, матриц вероятности, аналитических выражений для надежности и риска путей процессов электронного документооборота, аналитических выражений для оценки времени выполнения технологических цепочек. Показан синтез динамического вероятностного технологического процесса на основе формализованной схемы и аппарата динамических вероятностных нагруженных графов для технологических цепочек согласования и утверждения части проектно-сметной документации, а также возможность выполнения процедур верификации и валидации имитационной модели электронного документооборота с использованием альтернативной модели на основе диагностического вероятностного технологического процесса.

электронный документооборот технической документации; формализованная схема; альтернативная модель; имитационная модель; верификация; валидация; динамические вероятностные нагруженные графы

Введение

В соответствии с предложенной в [1] концептуальной моделью методология описания электронного документооборота технической документации (ЭДТД) в хозяйстве автоматики и телемеханики основывается на выделении следующих составляющих: уровней управления, технологических цепочек по выделенным уровням иерархии и алгоритмов выполнения технологических процессов (ТП) исследуемого ЭДТД [2].

Формализованная схема ЭДТД синтезируется на основе обобщенной формализованной схемы (ОФС) сложных систем массового обслуживания, предложенной авторами в [3]. Содержательное наполнение концептуальной модели (модель-описание) формируется в соответствии с выделенными составляющими по результатам обследования реальных процессов ЭДТД. Это позволяет перейти от модели-описания к формализованной схеме [4], которая служит основой для разработки автоматизированной технологии и имитационной модели (ИМ) ЭДТД, предназначенной для оценки эффективности принимаемых системотехнических решений. Важнейшим вопросом синтеза и применения ИМ ЭДТД является обеспечение и доказательство адекватности ИМ. С этой целью используются процедуры верификации (verification, VE) выполнения исходных требований и валидации (validation, VA) конкретных приложений. В [5] предложено для целей верификации и валидации использовать альтернативную модель (АМ) ЭДТД. В качестве математического аппарата для синтеза АМ выбран аппарат динамических вероятностных нагруженных графов (ДВНГ), на основе которого разработаны основные положения и метод представления технологических процессов ЭДТД в виде динамических вероятностных технологических процессов (ДВТП) [5]. Полученная таким образом АМ должна использоваться в процессе разработки автоматизированной технологии как для экспресс-оценки времени выполнения ТП, так и для доказательства адекватности ИМ ЭДТД. Для решения последней задачи необходимо разработать методику получения аналитических выражений времени реализации всех технологических цепочек по всем уровням иерархии представления процессов ЭДТД на основе ДВТП. Целями данной работы является разработка такой методики и иллюстрация ее применения для одной из технологических цепочек ЭДТД.

1 Методика оценки времени выполнения динамического вероятностного технологического процесса

Процедуры верификации ИМ и валидации с использованием АМ выполняются на основе следующих принципов:

– использование для ИМ ЭДТД и АМ одной и той же формализованной схемы, т. е. одной и той же информации;

– моделирование процесса ЭДТД с требуемой для процедур VA детализацией;

– моделирование процессов с учетом вероятностно-временных характеристик операций-вершин и вероятностей существования взаимодействующих дуг графа; последнее особенно существенно для учета качества технической документации и его изменения в процессе ЭДТД;

– использование ДВНГ-модели как самостоятельного средства для экспресс-оценок показателей эффективности ЭДТД и корректности программной реализации ИМ.

Реализация указанных принципов и предложенное в [5] формализованное описание ТП в виде ДВТП позволили разработать методику синтеза АМ, представленную в данной работе в виде алгоритма (рис. 1).

Первый блок. На основе анализа нормативных документов и натурного обследования в соответствии с ОФС осуществляется построение формализованной схемы (ФС) рассматриваемой системы ЭДТД.

Второй блок. На основе анализа полученной на предыдущем этапе ФС выполняется синтез графов технологических цепочек для всех элементов иерархической структуры представления процессов ЭДТД.

Третий блок. Синтез ДВТП для всех графов технологических цепочек иерархической структуры ФС.

Синтез таких ДВТП обеспечивает информационное единство описания АМ и ИМ ЭДТД. Следует отметить, что АМ описывает только основные свойства, необходимые для оценки времени выполнения процессов ЭДТД с учетом качества технической документации.

Четвертый блок. Построение на основе ДВТП технологических цепочек с учетом их вероятностно-временных характеристик, полученных в результате натурного обследования матриц смежности.

Пятый блок. Построение на основе данных используемых в блоке 4 матриц вероятностей ДВТП.

Шестой и седьмой блоки. Формализованный расчет надежности и риска путей реализации процессов ЭДТД, представленных в виде ДВТП.

Восьмой блок. Формирование математических выражений для расчета временных параметров процессов ЭДТД с учетом средних значений качества технической документации.

Реализация данного алгоритма обеспечивает упрощение процедур проверки адекватности ИМ ЭДТД с использованием АМ. Для осуществления процедур VE и VA выполняются блоки 6 и 7 алгоритма с конкретными исходными данными, а затем в блоке 8 рассчитываются временные параметры процессов ЭДТД с теми же данными, что позволяет дать предварительную оценку времени выполнения технологических цепочек для последующего сравнения с результатами оценки тех же временных характеристик, полученных с использованием ИМ ЭДТД.

2 Синтез альтернативной модели технологической цепочки согласования и утверждения части проектно-сметной документации

2.1 Формализованная схема

Первый блок алгоритма реализуется посредством синтеза ФС технологической цепочки согласования и утверждения части проектно-сметной документации

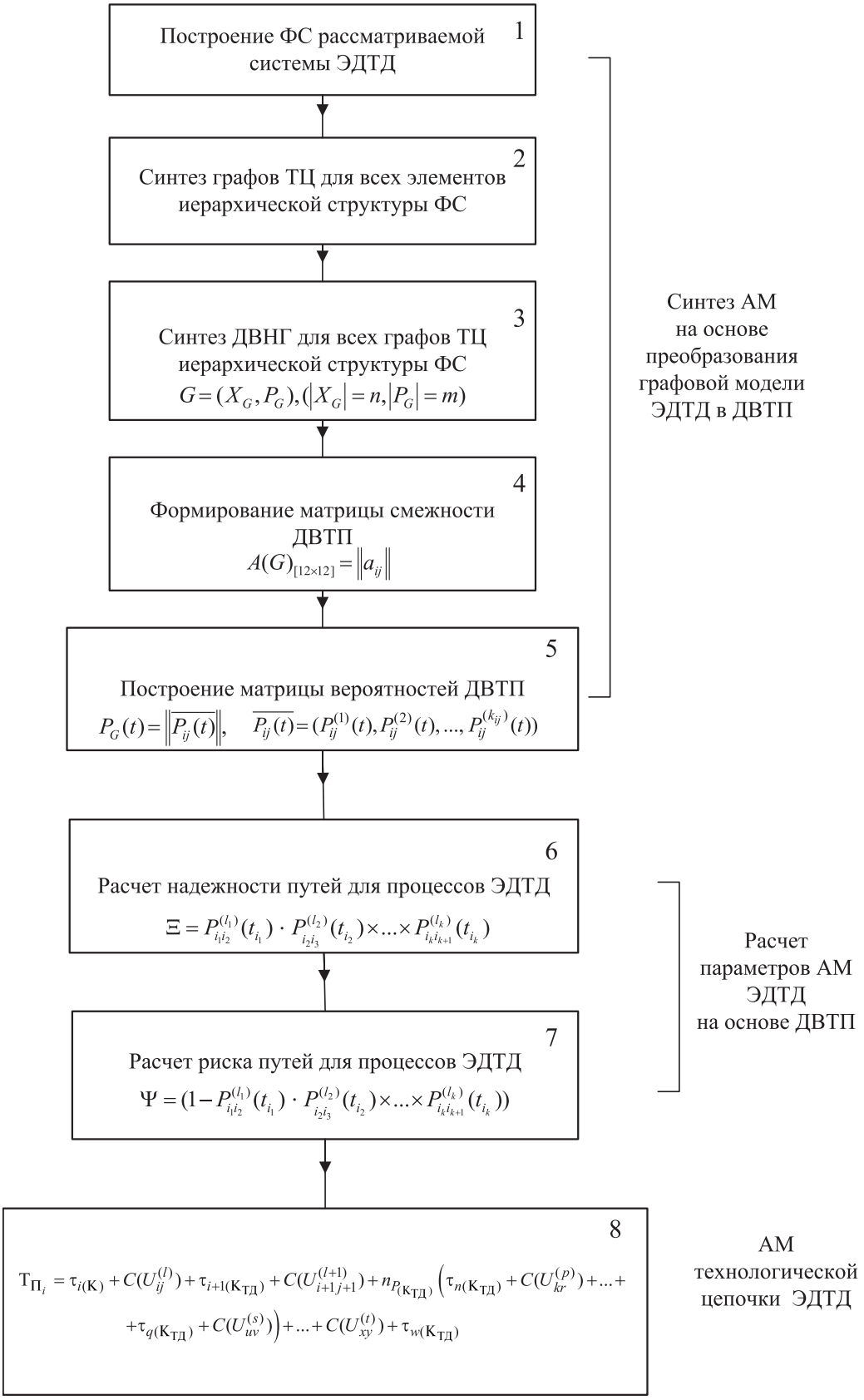

Рис. 1. Алгоритм синтеза аналитической модели временных параметров технологических цепочек

(ПСД) второго уровня ЭДТД. Для этого выделяются элементарные для данного уровня представления операции, являющиеся алгоритмами для следующего иерархического уровня. Выделяются участники процесса реализации ТП, определяется последовательность реализации технологической цепочки (ТЦ).

Второй блок алгоритма реализуется с помощью синтеза графа (рис. 2) ТЦ согласования и утверждения части ПСД. Ниже представлен список алгоритмов, входящих в ОФС второго уровня иерархии процессов ЭДТД:

А111 – регистрация схематического плана станции в аппарате главного инженера;

А114 – утверждение схематического плана станции начальником дороги;

А15 – передача схематического плана станции причастным службам;

А112 – передача схематического плана станции проектной организации;

А115 – передача утвержденного схематического плана станции функциональному заказчику (службе автоматики и телемеханики);

А11 – проектирование схематического плана станции;

А12 – проектирование таблицы взаимозависимостей стрелок и сигналов;

А14 – передача схематического плана станции функциональному заказчику (служба автоматики и телемеханики);

А113 – корректировка схематического плана станции;

А19 – рассмотрение схематического плана станции функциональным заказчиком;

А110 – передача схематического плана станции в аппарат главного инженера;

А116 – выдача утвержденного схематического плана станции проектной организации.

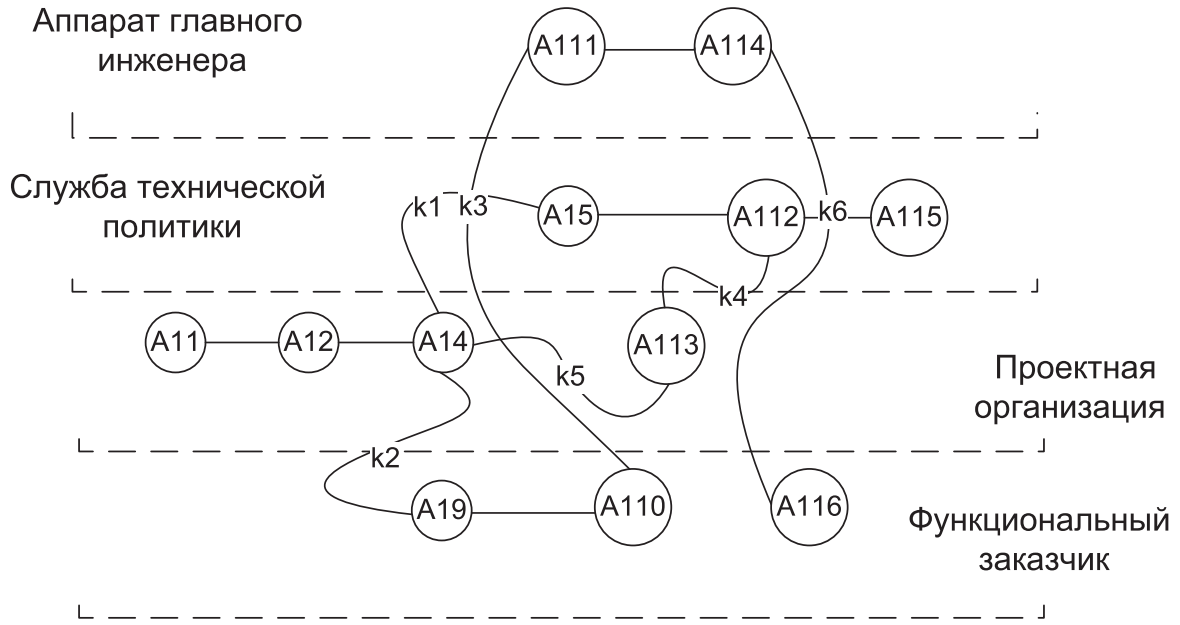

Рис. 2. Граф технологической цепочки согласования и утверждения части ПСД

2.2 Формализация оценки временных параметров ДВТП

Динамическим вероятностным нагруженным графом [6] называется ориентированный граф $G=(X_G,P_G),(|X_G|=n,|P_G|=m)$, у которого в любой момент времени $t\in T$ для любых вершин x_i,x_j из X_G l-я дуга $U_{ij}^{(l)}\in P_G$ существует с вероятностью $P_{ij}^{(l)}(t)$. Если в данный момент времени t дуга $U_{ij}^{(l)}$ существует, то она характеризуется априорно известной величиной $C_t(U_{ij}^{(l)})$ – нагрузкой дуги в момент времени t.

В [5] дано определение ДВТП. Это динамический вероятностный нагруженный граф технологической цепочки, соответствующей описанию процесса обработки комплекта технических документов ЭДТД логически взаимосвязанной функционально полной последовательностью операций.

Матрицей смежности ДВТП $A(G)_{[12\times12]}=\|a_{ij}\|$ называется квадратная матрица с размерностью $[n\times n]$, $n=|X_G|$, каждый элемент a_{ij} которой равен количеству возможных дуг (петель при $i=j$) из вершины $x_i\in X_G$ в вершину $x_j\in X_G$.

Матрицей вероятностей ДВТП $G=(X_G,P_G)$ называется матрица $P_G(t)=\|\overline{P_{ij}(t)}\|$ с размерностью $[n\times n]$, $n=|X_G|$, каждый элемент $\overline{P_{ij}(t)}=(P_{ij}^{(1)}(t),P_{ij}^{(2)}(t),...,P_{ij}^{(k_{ij})}(t))$ которой есть вектор вероятностей существования соответствующей дуги из вершины $x_i\in X_G$ в вершину $x_j\in X_G$ в момент времени t.

Примем, что упорядоченная последовательность дуг $(U_{i_1i_2}^{(l_1)},U_{i_2i_3}^{(l_2)},...,U_{i_ki_{k+1}}^{(l_k)})$ образует возможный путь $\mu_{(i_1,i_2,...,i_{k+1})}^{(l_1,l_2,...,l_k)}$ из вершины $X_{i_1}\in X_G$ в вершину $X_{i_{k+1}}\in X_G$, если существует упорядоченная по возрастанию последовательность согласованных временных срезов $(t_{i_1},t_{i_2},...,t_{i_k})$ – такая, что соответствующая ей упорядоченная последовательность вероятностей $(P_{i_1i_2}^{(l_1)}(t_{i_1}),P_{i_2i_3}^{(l_2)}(t_{i_2}),...,P_{i_ki_{k+1}}^{(l_k)}(t_{i_k}))$ не содержит нулевых элементов.

В [5] сформулированы определения надежности и риска пути для ЭДТД с учетом качества технической документации.

Надежностью пути $\mu_{(i_1,i_2,...,i_{k+1})}^{(l_1,l_2,...,l_k)}$, соответствующего времени начала ЭДТД t_{i_1}, называется величина $\Xi=P_{i_1i_2}^{(l_1)}(t_{i_1})\cdot P_{i_2i_3}^{(l_2)}(t_{i_2})\times...\times P_{i_ki_{k+1}}^{(l_k)}(t_{i_k})$.

Риском пути $\mu_{(i_1,i_2,...,i_{k+1})}^{(l_1,l_2,...,l_k)}$, соответствующего времени начала ЭДТД t_{i_1}, называется величина $\Psi=(1-P_{i_1i_2}^{(l_1)}(t_{i_1})\cdot P_{i_2i_3}^{(l_2)}(t_{i_2})\times...\times P_{i_ki_{k+1}}^{(l_k)}(t_{i_k}))$.

Надежность и риск каждого возможного пути являются функциями времени начала ЭДТД t_{i_1}.

В [7] изложены принципы оценки качества технических документов. Реализация третьего блока алгоритма синтеза АМ предполагает формулировку задачи синтеза АМ как задачи оценки времени выполнения процессов (см. с. 83)

в зависимости от достигнутого качества технической документации и времени начала процессов ЭДТД.

Рассмотрим процесс $П_C$ (рис. 3).

Введем следующие обозначения:

X_1 – проектирование схематического плана станции;

X_2 – проектирование таблицы взаимозависимостей стрелок и сигналов;

X_3 – передача схематического плана станции функциональному заказчику (служба автоматики и телемеханики);

X_4 – корректировка схематического плана станции;

X_5 – передача схематического плана станции причастным службам;

X_6 – рассмотрение схематического плана станции функциональным заказчиком;

X_7 – передача схематического плана станции в аппарат главного инженера;

X_8 – регистрация схематического плана станции в аппарате главного инженера;

X_9 – утверждение схематического плана станции начальником дороги;

X_{10} – передача схематического плана станции проектной организации;

X_{11} – передача утвержденного схематического плана станции функциональному заказчику (службе автоматики и телемеханики);

X_{12} – выдача утвержденного схематического плана станции проектной организации.

Таким образом, на рис. 3 $X_1 \div X_{12}$ – операции процесса $П_i$;

$\tau_1 \div \tau_{12}$ – время выполнения операции X_i процесса $П_i$;

U_{ij}^k – дуга из вершины X_i в X_j;

$C_{(U_{ij}^n)}$ – нагрузка дуги из вершины X_i в X_j;

$P_{ij(К_{ТД})}$ – вероятность условного перехода в зависимости от качества технической документации, участвующей в операции X_i процесса $П_i$.

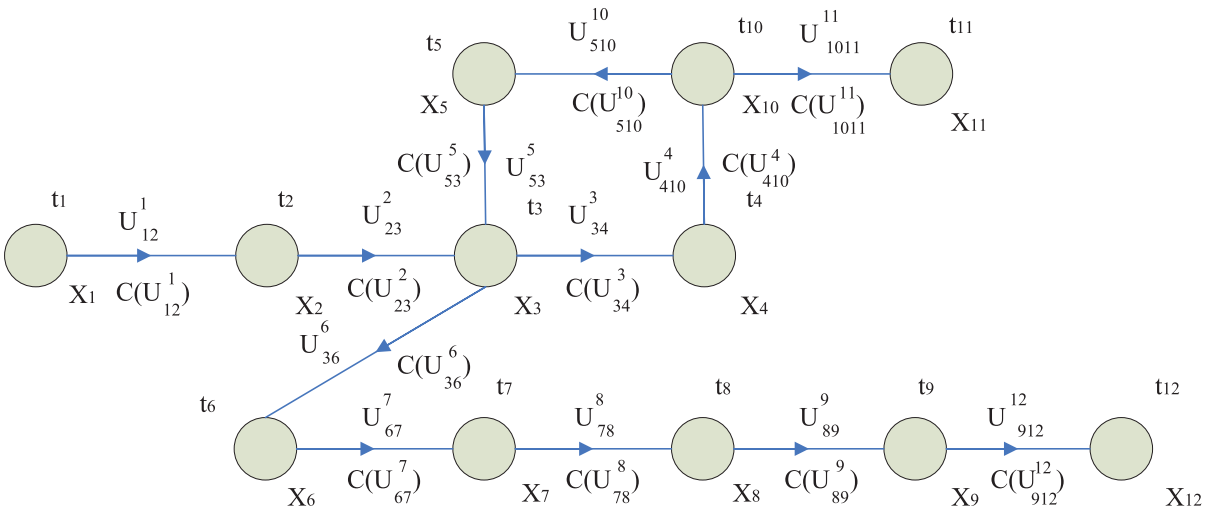

Рис. 3. Динамический вероятностный технологический процесс

Реализация блока 4 (см. рис. 1) позволяет построить матрицу смежности на основе полученной ДВТП. Матрица смежности [6] для графа (см. рис. 3) имеет вид:

$$A(G)_{[12\times12]} = \begin{Vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix}.$$

Пятый блок алгоритма реализуется путем построения матрицы вероятностей [6]. Матрица вероятностей для описанного процесса представлена на рис. 4.

Введем три типа операций и вероятностные логические условия: операции, порождающие качество технической документации с заданной вероятностью X_1; операции, длительность которых зависит от качества технической документации X_2, X_3, X_4; операции, повышающие качество технической документации X_2, X_3; логические условия, вероятность перехода в которых зависит от качества технической документации $P_{ij(\text{К}_{\text{ТД}})}$.

Учитывая, что $\tau_i = f(K_i)$ для $i = 2 \div 10$; $n = f(K_i)$; $m = f(K_i)$; обозначим:

τ_i – время выполнения элементарной операции X_i процесса Π_i;

$P_{(\text{К}_{\text{ТД}})}$ – вероятность условного перехода как функция, зависящая от качества технической документации;

$\tau_{i(\text{К}_{\text{ТД}})}$ – время выполнения элементарной операции как функция, зависящая от качества технической документации.

Блоки 6 и 7 алгоритма синтеза альтернативной модели выполняются путем расчета по формулам:

– надежности пути рассматриваемого процесса ЭДТД:

$$\Xi = P_{i_1 i_2}^{(l_1)}(t_{i_1}) \cdot P_{i_2 i_3}^{(l_2)}(t_{i_2}) \times \ldots \times P_{i_k i_{k+1}}^{(l_k)}(t_{i_k});$$

$$P_{G(\text{К}_{\text{тд}})[12\times12]} = \begin{Vmatrix} 0 & P_{12(\text{К}_{\text{тд}})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{23\,(\text{К}_{\text{тд}})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{34(\text{К}_{\text{тд}})} & 0 & P_{36(\text{К}_{\text{тд}})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{410(\text{К}_{\text{тд}})} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{53\,(\text{К}_{\text{тд}})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{67(\text{К}_{\text{тд}})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{78(\text{К}_{\text{тд}})} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{89(\text{К}_{\text{тд}})} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{912(\text{К}_{\text{тд}})} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{1011(\text{К}_{\text{тд}})} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix}.$$

Рис. 4. Матрица вероятностей описываемого процесса

– риска пути рассматриваемого процесса ЭДТД:

$$\Psi = 1 - P_{i_1 i_2}^{(l_1)}(t_{i_1}) \cdot P_{i_2 i_3}^{(l_2)}(t_{i_2}) \times \ldots \times P_{i_k i_{k+1}}^{(l_k)}(t_{i_k}).$$

Реализация блока 8 алгоритма (см. рис. 1) осуществляется посредством синтеза формулы расчета времени выполнения процессов Π_i иерархической структуры ФС с помощью матрицы вероятностей и матрицы смежности рассматриваемого процесса [5]. Индексы дуг графа при определении нагрузок и индексы времени выполнения операций соответствуют элементам матриц смежности и матриц вероятности.

Построим математическое выражение для оценки времени выполнения процесса Π_C (см. рис. 3):

$$\begin{aligned}
\mathrm{T}_{\Pi_C} &= \tau_1 + C(U_{12}^1) + \tau_{2(\mathrm{K_{ТД}})} + C(U_{23}^2) + n_{P_{(\mathrm{K_{ТД}})}}(\tau_{3(\mathrm{K_{ТД}})} + C(U_{34}^3) + \tau_{4(\mathrm{K_{ТД}})} + \\
&+ C(U_{410}^4) + \tau_{10(\mathrm{K_{ТД}})} + C(U_{510}^{10}) + \tau_{5(\mathrm{K_{ТД}})} + C(U_{53}^5)) + C(U_{36}^6) + \tau_{6(\mathrm{K_{ТД}})} + \\
&+ C(U_{67}^7) + \tau_{7(\mathrm{K_{ТД}})} + C(U_{76}^8) + \tau_{8(\mathrm{K_{ТД}})} + C(U_{89}^9) + \tau_{9(\mathrm{K_{ТД}})} + C(U_{912}^{12}) + \tau_{12} + \\
&+ C(U_{1011}^{11}) + \tau_{11},
\end{aligned}$$

где

$$\tau_i = f(P_{(X_i)}) \cdot P_{(\mathrm{K_{ТД}})};\ C_{(U_{ij}^n)} = f(t) \cdot P_{(\mathrm{K_{ТД}})},$$

где $P_{(X_i)}$ – вероятность порождения уровня качества технической документации при выполнении операции X_i.

Общая продолжительность процесса ЭДТД включает совокупность элементарных для данного уровня представления операций, выполняемых на разных стадиях ЭДТД и нагрузок дуг в соответствии со структурной схемой взаимодействия процессов и вероятностью выполнения условных переходов в данный момент времени.

Предложенная ДВТП-модель позволяет более точно определять продолжительность реализации элементарных операций и переходов на данном иерархическом уровне представления при натурных обследованиях, подготовке исходных данных для синтеза и валидации ИМ ЭДТД.

Заключение

Развитие ЭДТД в хозяйстве автоматики и телемеханики – актуальная задача, решение которой позволяет совершенствовать технологию работы всех звеньев железнодорожного комплекса [8–12].

В данной работе:

– сформулирована задача верификации и валидации ИМ ЭДТД с использованием альтернативной модели;

– для реализации альтернативной модели предложено использование аппарата ДВНГ, позволяющего обеспечить информационное единство АМ и ИМ ЭДТД;

– предложена методика получения АМ в виде математического выражения для оценки временных характеристик ТЦ ЭДТД;

– предложенная методика реализована в виде алгоритма синтеза альтернативной модели ЭДТД;

– предложен подход к обеспечению верификации и валидации ИМ ЭДТД и контролю адекватности ИМ на основе преобразования формализованной схемы ЭДТД в ДВТП;

– выполнена разработка альтернативной модели на основе ФС второго уровня ЭДТД технологической цепочки согласования и утверждения части ПСД.

В дальнейшем предполагаются разработки:

– алгоритмов формирования матрицы смежности (блок 4 алгоритма, см. рис. 1);

– алгоритмов формирования матрицы вероятностей (блок 5 алгоритма, см. рис. 1);

– алгоритмов формирования выражений для расчета надежности и риска пути рассматриваемых ТЦ ЭДТД;

– алгоритмов формирования математических выражений для оценки временных характеристик ТЦ ЭДТД;

– программ автоматизированного расчета временных параметров АМ,

а также выполнение расчетов АМ с использованием разработанных программ для всего множества ТЦ, включенных в ФС ЭДТД.

Библиографический список

1. Булавский П. Е. Концептуальная модель электронного документооборота технической документации / П. Е. Булавский // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 1. – С. 60–63.
2. Василенко М. Н. Интегрированная система автоматизации проектирования, ведения и проверки технической документации / М. Н. Василенко // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 9. – С. 28–29.
3. Марков Д. С. Матричный метод формализации имитационных моделей сложных систем массового обслуживания / Д. С. Марков, П. Е. Булавский // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – № 4. – С. 186–196.
4. Булавский П. Е. Синтез формализованной схемы электронного документооборота систем железнодорожной автоматики и телемеханики / П. Е. Булавский, Д. С. Марков // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2013. – № 2. – С. 108–115.

5. Булавский П. Е. Метод оценки времени выполнения процессов и адекватности имитационной модели электронного документооборота технической документации / П. Е. Булавский, Д. С. Марков // Бюллетень результатов научных исследований. – 2014. – № 2. – С. 45–57.
6. Орлов Г. С. Динамические вероятностные нагруженные графы. Определения, свойства, области применения / Г. С. Орлов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2010. – № 1 (31). – С. 48–57.
7. Булавский П. Е. Оценка качества технической документации на системы ЖАТ / П. Е. Булавский // Автоматика, связь, информатика. – 2011. – № 8. – С. 37–39.
8. Василенко М. Н. Организация электронного документооборота на полигоне Октябрьской ж. д. при реконструкции и модернизации систем автоматики и телемеханики / М. Н. Василенко, Б. П. Денисов, П. Е. Булавский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2008. – № 4. – С. 67–72.
9. Василенко М. Н. Электронный документооборот в хозяйстве СЦБ / М. Н. Василенко, В. Г. Трохов, Д. В. Зуев // Автоматика связь, информатика. – 2014. – № 8. – С. 2–3.
10. 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.
11. Василенко М. Н. Единое информационное пространство технической документации ЖАТ / М. Н. Василенко, А. Ф. Ершов // Автоматика связь, информатика. – 2012. – № 5. – С. 15–16.
12. Василенко М. Н. Применение теории и методов экспертизы схемных решений ЖАТ для повышения качества ведения технической документации / М. Н. Василенко, А. М. Горбачев // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 6. – С. 40–42.

Bulavsky Petr E.,
Markov Dmitry S.
«Automation and Remote Control on Railways» department,
Petersburg State Transport University

The method of estimation of time characteristics of electronic technical document management processes

In this paper authors offer the method of obtaining the alternative model (AM) as an analytic expression for the estimation of time charateristics of technological chains (TC) of electronic technical document management (ETDM) in railway automation and remote control. The method is realized as the algorythm of consistent transition from TC formalized scheme to AM. Algorythm is a sequence of synthesis operations: formalized schemes,

TC graphs, adjacency matrices, probability matrices, analytic expressions for reliability and risk of ETDM process paths, analytic expressions of TC performance time estimation. The analysis of dynamic probabilitic technological process (DPTP) based on formalized scheme and apparatus of dymanic probabilitic loaded graphs for the TC of confirmation of approvable part of project documentation is adduced. The possibility of performance of ETDM simulation models verification and validation procedures with use of AM based on DPTP is shown.

electronic technical document management; formalized scheme; alternative model; simulation model; verification; validation; dymanic probabilitic loaded graphs

References

1. Bulavsky P. E. Concept model of electronic technical documentation management. Transport of the Russian Federation, 2011, issue 1, pp. 60–63.

2. Vasilenko M. N. Integrated system of automation of design, management and test of technical documentation. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2009, issue 9, pp. 28–29.

3. Markov D. S., Bulavsky P. E. Matrix method of formalization of simulation models of complex mass service systems. Proceedings of Petersburg Transport University, 2010, issue 4, pp. 186–196.

4. Bulavsky P. E., Markov D. S. Synthesis of formalized scheme of railway automation and remote control electronic document management. Proceedings of Petersburg Transport University, 2013, issue 2, pp. 108–115.

5. Bulavsky P. E., Markov D. S. Method of evaluation of process lead time and simulation model adequacy for electronic technical document management. Scientific research result bulletin, 2014, issue 2, pp. 45–57.

6. Orlov G. S. Dynamic probabilistic loaded graphs. Definitions, properties, application areas. Ryazan state radio technique university messenger, 2010, issue 1 (31), pp. 48–57.

7. Bulavsky P. E. Evaluation of quality of railway automation and remote control systems technical documentation. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2011, issue 8, pp. 37–39.

8. Vasilenko M. N., Denisov B. P., Bulavsky P. E. Organization of electronic documentation management on October Railway under reconstruction and modernization of railway automation and remote control systems. Proceedings of Rostov State Transport University, 2008, issue 4, pp. 67–72.

9. Vasilenko M. N., Trokhov V. G., Zuev D. V. Electronic document management in SCB. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2014, issue 8, pp. 2–3.

10. Vasilenko M. N., Trokhov V. G., Zuev D. V., Sedykh D. V. Development of electronic document management in automation and remote control. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2015, issue 1, pp. 14–16.

11. Vasilenko M. N., Ershov A. F. Unified data space for railway automation and remote control technical documentation. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2012, issue 5, pp. 15–16.

12. Vasilenko M. N., Gorbachov A. M. Use of theory and methods of railway automation and remote control technical solution expertise for increase of technical documentation management quality. Transport of the Russian Federation, 2012, issue 6, pp. 40–42.

Статья представлена к публикации членом редколлегии М. Н. Василенко
Поступила в редакцию 26.11.2015, принята к публикации 23.12.2015

БУЛАВСКИЙ Петр Евгеньевич – доктор технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: pbulavsky@gmail.com

МАРКОВ Дмитрий Спиридонович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: mds1945@yandex.ru

© Булавский П. Е., Марков Д. С., 2016

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,
В. В. Дмитриев,
М. Р. Черепанова

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

СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ КОДА С СУММИРОВАНИЕМ С УЛУЧШЕННЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОШИБОК В ИНФОРМАЦИОННЫХ ВЕКТОРАХ

Описывается способ построения кода с суммированием с минимальным общим количеством необнаруживаемых ошибок, основанный на идее модификации кода с суммированием взвешенных переходов между разрядами, занимающими соседние позиции в информационном векторе. Предлагаемый код с суммированием можно отнести к классу модульных кодов с суммированием взвешенных переходов. Он имеет такое же количество контрольных разрядов, как и классический код Бергера, однако в нем улучшены показатели обнаружения ошибок в информационных векторах, прежде всего, в области малой кратности ошибок. Установлены свойства нового кода с суммированием; важно, что при длинах информационных векторов $m \neq 2^t$ ($t = 1, 2, \ldots$) может быть построен оптимальный код. При $m = 2^t$ ($t = 1, 2, \ldots$), однако, коды близки к оптимальным. В статье объясняется такая особенность модульного кода со взвешенными переходами. Кроме того, в эксперименте с контрольными комбинационными схемами LGSynth`89 показано, что модульный код со взвешенными переходами позволяет организовывать системы функционального контроля с улучшенными показателями обнаружения ошибок в сравнении со структурами, полученными по кодам Бергера. В некоторых случаях достигается решение задачи 100%-го обнаружения ошибок на выходах контролируемых комбинационных схем. Все это делает представленный код перспективным для решения задач технической диагностики.

техническая диагностика; система функционального контроля; код с суммированием; код Бергера; взвешенный переход; код с суммированием взвешенных переходов; необнаруживаемая ошибка в информационном векторе; свойства обнаружения ошибок; оптимальный код

Введение

Принципы помехоустойчивого кодирования часто используются при построении надежных систем управления ответственными технологическими процессами, к которым относится и перевозочный процесс на железнодорожном транспорте. Например, для работы системы сигнализации на железнодорожном транспорте используется кодирование рельсовых цепей – передача импульсов и пауз неравномерной длины, совокупность которых соответствует трем смысловым посылкам: кодам «З», «Ж» и «КЖ» [1–3]. Для расширения функциональных возможностей систем управления движением поездов применяют и более сложные устройства, передающие более широкий спектр информации. В таких устройствах для защиты информации применяются коды Хэмминга и Бауэра [4, 5]. Распространенным является и сменно-качественное кодирование, где используются комбинации недвоичного кода: работа частотной диспетчерской централизации, работа тональных рельсовых цепей, работа автоматов контроля сигнальных точек в системах диспетчерского контроля и т. д. [6–8]. Часто кодирование применяется при построении самих логических устройств управления и контроля – для обеспечения свойства их самопроверяемости [9–11].

Использование помехоустойчивого кодирования позволяет на этапе проектирования логического устройства обеспечить защиту от возникающих в процессе эксплуатации дефектов путем внесения избыточных элементов для выполнения необходимых функций [9]. Часто для этих целей применяют коды с повторением (например, для организации структур дублирования), а также коды с суммированием: коды Бергера, Боуза – Лина, модифицированные коды Бергера и другие (для организации самопроверяемых структур с уменьшенной структурной избыточностью по сравнению с дублированием) [12–24].

При построении надежных логических устройств управления распространенной является организация функционального контроля внутренних блоков. Например, применяется функциональный контроль арифметико-логических устройств, входящих в любые современные системы автоматического управления [25–29]. При таком виде диагностирования техническое состояние контролируемого устройства определяется без отключения его от объектов управления [30].

Рассмотрим, как осуществляется организация систем функционального контроля с использованием кодов с суммированием.

1 Коды с суммированием в системах функционального контроля

Структура системы функционального контроля изображена на рис. 1. В ней исходное арифметико-логическое устройство $F(x)$, реализующее систему рабочих булевых функций $f_1(x), f_2(x), \ldots, f_m(x)$, снабжается специальным контрольным оборудованием. В состав контрольного оборудования входит блок контрольной

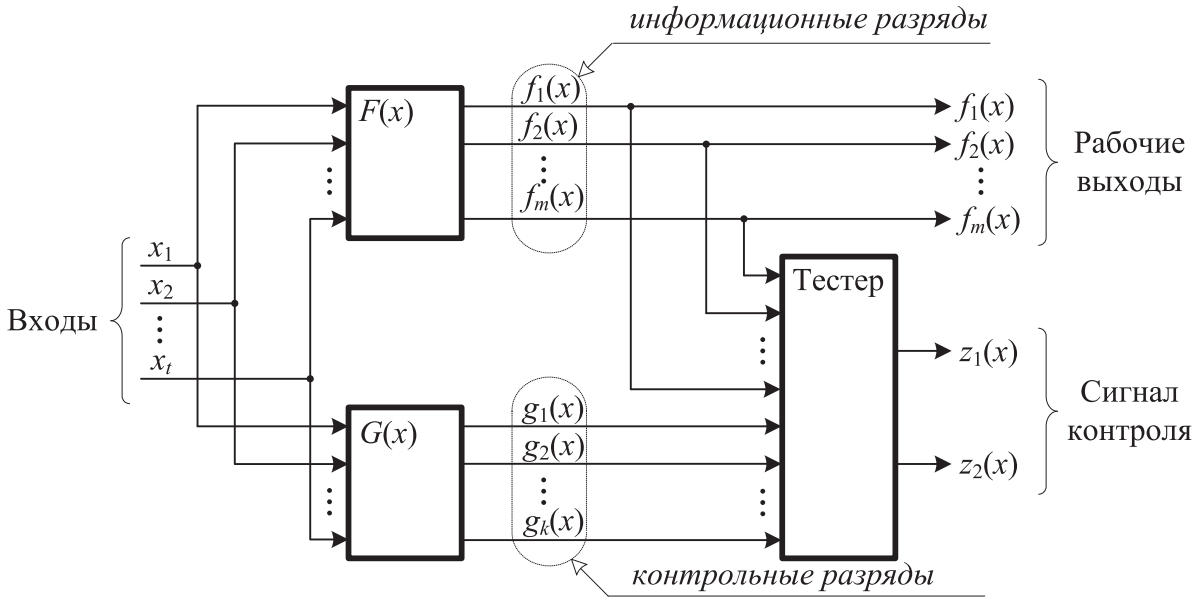

Рис. 1. Структура системы функционального контроля

логики $G(x)$, вычисляющий значения контрольных функций $g_1(x)$, $g_2(x)$, …, $g_k(x)$, и самопроверяемый тестер, в процессе эксплуатации системы диагностирования фиксирующий соответствие между значениями рабочих и контрольных функций. Данное соответствие устанавливается на этапе проектирования системы функционального контроля и обычно определяется по правилам построения заранее выбранного кода с суммированием. Так, выходы блока $F(x)$ отождествляются с информационным вектором длины m, а выходы блока $G(x)$ – с контрольным вектором длины k. От правил построения кода в существенной мере зависят такие важные параметры системы функционального контроля, как обнаруживающая способность и аппаратурная избыточность, – последняя, в свою очередь, влияет на энергопотребление, быстродействие, тестопригодность и другие характеристики построенной дискретной системы [9, 10].

Структура, приведенная на рис. 1, на практике строится с условием 100 %-го обнаружения одиночных неисправностей [30]. Ввиду раздельной реализации блоков $F(x)$, $G(x)$ и тестера в произвольный момент времени возможно возникновение неисправности только в одном из компонентов системы функционального контроля. Неисправности блока контрольной логики искажают значения контрольных функций, что фиксируется тестером. Тестер, как «последний сторож» в системе функционального контроля, должен быть самопроверяемым и обнаруживать собственные неисправности хотя бы на одном входном наборе [10]. Задача функционального контроля состоит в обнаружении одиночных неисправностей в блоке $F(x)$, внутренняя конфигурация связей между логическими элементами которого может привести к возникновениям искажений различных кратностей в значениях разрядов выходного вектора. Таким образом, можно рассматривать свойства кода с суммированием по обнаружению ошибок

в информационных векторах, изучая тем самым особенности самой системы функционального контроля.

Различные коды с суммированием обладают различными свойствами обнаружения ошибок в информационных векторах и позволяют строить системы с различными техническими характеристиками.

2 Анализ свойств обнаружения ошибок кодами Бергера и кодами с суммированием взвешенных переходов

Классический код с суммированием, или код Бергера [31], строится по следующему правилу: определяется вес информационного вектора r (сумма единичных информационных разрядов), а затем полученное число представляется в двоичном виде и записывается в разряды контрольного вектора. Число контрольных разрядов в коде Бергера вычисляется по формуле: $k = \lceil \log_2(m+1) \rceil$ (запись $\lceil ... \rceil$ обозначает целое сверху от вычисляемого значения). Далее будем обозначать код Бергера как $S(m, k)$-код.

В $S(m, k)$-коде один и тот же контрольный вектор соответствует всем информационным векторам с одинаковым весом. Для данного значения r это C_m^r информационных векторов. С увеличением r число информационных векторов, соответствующих одному и тому же контрольному вектору, увеличивается, достигая своего максимума при $\frac{m}{2}$ для четного m и при $\frac{m-1}{2}$ для нечетного m, а затем уменьшается. Такое распределение информационных векторов между контрольными векторами приводит к тому, что $S(m, k)$-кодом не обнаруживается достаточно большое количество ошибок в информационных векторах. Например, $S(5,3)$-код не обнаруживает 220 ошибок в информационных векторах, что составляет 22,18 % от всех возможных ошибок в информационных векторах (другими словами, данным кодом не обнаруживается чуть менее четверти ошибок в информационных векторах). При низком значении обнаруживающей способности все $S(m, k)$-коды имеют также и низкую эффективность обнаружения ошибок малых кратностей – ими не обнаруживается 50 % двукратных, 37,5 % четырехкратных, 31,25 % шестикратных ошибок и т. д. [32, 33].

Возникает задача повышения обнаруживающей способности, в том числе в области малой кратности ошибок, при сохранении числа контрольных разрядов в коде. С практической точки зрения, например в системах функционального контроля, решение этой задачи позволит, не увеличивая аппаратурной избыточности, обнаруживать большее количество одиночных неисправностей контролируемого логического устройства.

В [34] введено понятие *оптимального разделимого кода по критерию минимума количества необнаруживаемых ошибок для заданных значений m и k.*

Оптимальный код имеет равномерное распределение всех 2^m информационных векторов между 2^k контрольными векторами и не обнаруживает

$$N_{m,k}^{\min} = 2^m(2^{m-k} - 1) \quad (1)$$

ошибок в информационных векторах. К примеру, оптимальный код с параметрами $m = 5$ и $k = 3$ имеет $N_{5,3}^{\min} = 2^5(2^{5-3} - 1) = 32 \cdot 3 = 96$ необнаруживаемых ошибок, т. е. в 2,29 раз меньше, чем $S(5,3)$-код. В том же источнике предложен способ улучшения характеристик $S(m, k)$-кодов по обнаружению ошибок в информационных векторах с сохранением числа контрольных разрядов. Данный способ основан на преобразовании каждого слова кода Бергера в контрольной его части при помощи специального алгоритма. Он подразумевает определение веса вектора по модулю $M = 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}$ и использование поправочного коэффициента, равного сумме по модулю два значений установленных разрядов информационного вектора. Модифицированные коды Бергера в среднем обнаруживают вдвое больше ошибок в информационных векторах, чем классические $S(m, k)$-коды, однако они не являются оптимальными кодами. В [35–37] предложено семейство модифицированных кодов Бергера, получаемых установкой модуля определения веса информационного вектора из множества $M \in \{2; 4; ...; 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 2}\}$. Данные коды имеют уменьшенное количество контрольных разрядов в сравнении с кодами Бергера. При своих параметрах m и k модульно модифицированные коды Бергера также не являются оптимальными (за исключением кода с $M = 2$, имеющего 2 контрольных разряда).

Оптимальный код с суммированием может быть получен на основе применения кода с суммированием взвешенных информационных разрядов. Впервые такой способ построения кода с суммированием описан в [31], а применение его для построения систем функционального контроля – в [38, 39]. Взвешивания информационных разрядов, однако, недостаточно для построения оптимального кода с теоретическим минимумом общего количества необнаруживаемых ошибок [40]. В [41–43] предложено несколько способов построения оптимальных кодов на основе модификации кодов с суммированием взвешенных информационных разрядов.

Оптимальный код с суммированием может быть получен и при модификации другого кода – кода с суммированием взвешенных переходов. Данный код предложен в [44], а некоторые его частные свойства обнаружения ошибок в системах функционального контроля показаны в [45–49]. Код с суммированием взвешенных переходов строится следующим образом.

Алгоритм 1. *Получение контрольных векторов кода с суммированием взвешенных переходов*:

1. Рассматриваются разряды информационного вектора, занимающие соседние позиции.

2. Каждому переходу от разряда к разряду присваивается весовой коэффициент из натурального ряда (1, 2, …, m – 1), начиная с младшего разряда.

3. Подсчитывается сумма так называемых активных переходов (переход между разрядами называется активным, если сумма по модулю два значений соседних разрядов равна единице).

4. Полученное число представляется в двоичном виде и записывается в разряды контрольного вектора.

Код с суммированием взвешенных переходов обозначим как WT (m, k)-код.

WT(m, k)-код обнаруживает большее количество ошибок в информационных векторах, чем S(m, k)-код, имея при этом, однако, увеличенное количество контрольных разрядов. Их число $k = \left\lceil \log_2 \frac{m(m-1)}{2} \right\rceil$. Увеличенное количество контрольных разрядов в WT(m, k)-коде в сравнении с S(m, k)-кодом приводит к увеличению сложности контрольного оборудования в системе функционального контроля (см. рис. 1). Кроме того, контрольные разряды WT(m, k)-кодом используются неэффективно – WT(m, k)-коды не являются оптимальными [49]. Оптимальный код получается при использовании следующего алгоритма его построения [50, 51].

Алгоритм 2. *Получение контрольных векторов модифицированного кода с суммированием взвешенных переходов*:

1. Устанавливается значение модуля $M = 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil}$ (это модуль кода Бергера).

2. Подсчитывается сумма V так называемых активных переходов.

3. Определяется наименьший неотрицательный вычет числа V по установленному модулю: $W = V(\bmod M)$.

4. Число W представляется в двоичном виде и записывается в контрольный вектор.

Продемонстрируем работу алгоритма построения модифицированного кода с суммированием взвешенных переходов, или WTM(m, k)-кода, на примере построения WT8(5,3)-кода. В табл. 1 записаны весовые коэффициенты каждого перехода между разрядами информационного вектора, а в табл. 2 показаны все кодовые слова WT8(5,3)-кода. К примеру, в информационном векторе <00101> активными являются переходы между разрядами f_1 и f_2, f_2 и f_3, f_3 и f_4. Для получения числа V необходимо сложить значения весовых коэффициентов этих переходов: $V = w_{1,2} + w_{2,3} + w_{3,4} = 1 + 2 + 3 = 6$. Наименьший неотрицательный вычет числа V : $W = 6$ (mod8) = 6, что в двоичном виде представляется как <110>.

Анализируя таблицу 2, нетрудно заметить, что числа V для информационных векторов, равноудаленных от середины таблицы (эти векторы имеют противоположные значения одноименных разрядов), равны между собой. При этом количество повторений чисел V неодинаково (табл. 3). Это и приводит к неравномерности распределения информационных векторов WT(m,k)-кода между контрольными векторами (в контрольные группы). Выполняя модификацию

Таблица 1. Весовые коэффициенты переходов в информационном векторе

$w_{4,5}$	$w_{3,4}$	$w_{2,3}$	$w_{1,2}$
4	3	2	1

Таблица 2. Кодовые слова *WT*8(5,3)-кода

№	Разряды информационного вектора					V	$W = V$ (mod8)	Разряды контрольного вектора		
	f_5	f_4	f_3	f_2	f_1			g_3	g_2	g_1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1
2	0	0	0	1	0	3	3	0	1	1
3	0	0	0	1	1	2	2	0	1	0
4	0	0	1	0	0	5	5	1	0	1
5	0	0	1	0	1	6	6	1	1	0
6	0	0	1	1	0	4	4	1	0	0
7	0	0	1	1	1	3	3	0	1	1
8	0	1	0	0	0	7	7	1	1	1
9	0	1	0	0	1	8	0	0	0	0
10	0	1	0	1	0	10	2	0	1	0
11	0	1	0	1	1	9	1	0	0	1
12	0	1	1	0	0	6	6	1	1	0
13	0	1	1	0	1	7	7	1	1	1
14	0	1	1	1	0	5	5	1	0	1
15	0	1	1	1	1	4	4	1	0	0
16	1	0	0	0	0	4	4	1	0	0
17	1	0	0	0	1	5	5	1	0	1
18	1	0	0	1	0	7	7	1	1	1
19	1	0	0	1	1	6	6	1	1	0
20	1	0	1	0	0	9	1	0	0	1
21	1	0	1	0	1	10	2	0	1	0
22	1	0	1	1	0	8	0	0	0	0
23	1	0	1	1	1	7	7	1	1	1
24	1	1	0	0	0	3	3	0	1	1
25	1	1	0	0	1	4	4	1	0	0
26	1	1	0	1	0	6	6	1	1	0
27	1	1	0	1	1	5	5	1	0	1
28	1	1	1	0	0	2	2	0	1	0
29	1	1	1	0	1	3	3	0	1	1
30	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1
31	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0

Таблица 3. Распределение чисел *V* при построении *WT*8(5,3)-кода

Числа *V*										
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
			3	4	5	6	7			
			3	4	5	6	7			

WT (*m*,*k*)-кода по алгоритму 2, мы устраняем этот недостаток, так как счет осуществляется до значения $M - 1 = 7 : 8$ (mod8) = 0, 9 (mod8) = 1 и 10 (mod8) = 2.

В табл. 4 приводится распределение информационных векторов по контрольным группам для рассматриваемого *WT*8(5,3)-кода. В каждой контрольной группе присутствует по 4 информационных вектора, причем в силу равенства значений *V* для равноудаленных от середины табл. 2 информационных векторов в каждой контрольной группе обязательно присутствуют как минимум два информационных вектора, отличающихся друг от друга во всех разрядах. Это обусловливает наличие в *WT*8(5,3)-коде необнаруживаемых ошибок максимальной кратностью $d = m$. Необнаруживаемые ошибки меньших кратностей появляются в *WT*8(5,3)-кодах при искажениях, переводящих информационные векторы одной контрольной группы в информационные векторы, не равноудаленные от середины табл. 2. Такой характер распределения информационных векторов по контрольным группам сохраняется для всех *WTM*(*m*, *k*)-кодов. Единственным исключением являются *WTM*(*m*, *k*)-коды с числом информационных разрядов $m = 2^t$ (t = 1, 2, …). У них не заполняется последняя контрольная группа, так как количество информационных разрядов таково, что не образуется число $W = 2^k - 1$. В самом деле, при m = 4, например, максимальный вес информационного вектора $W = w_{1,2} + w_{2,3} + w_{3,4} = 1 + 2 + 3 = 6$.

Возвращаясь к *WTM*(*m*, *k*)-кодам с длинами информационных векторов $m \neq 2^t$ (t = 1, 2, …), отметим, что в каждой контрольной группе для них имеются

Таблица 4. Распределение информационных векторов *WT*8(5,3)-кода по контрольным группам

W = *V* (mod8)							
0	1	2	3	4	5	6	7
Контрольный вектор							
000	001	010	011	100	101	110	111
00000	00001	00011	00010	00110	00100	00101	01000
01001	01011	01010	00111	01111	01110	01100	01101
10110	10100	10101	11000	10000	10001	10011	10010
11111	11110	11000	11101	11001	11011	11010	10111

одинаковые по кратности переходы. Эти переходы и определяют количество искажений различной кратностью в каждой контрольной группе. На рис. 2, например, приводится граф всех возможных переходов в контрольной группе <101> *WT*8(5,3)-кода.

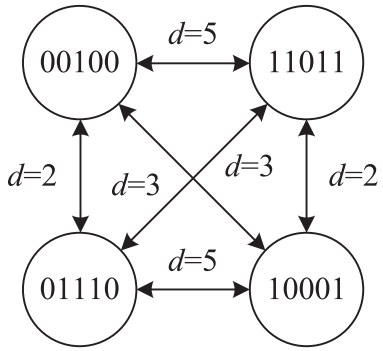

Рис. 2. Переходы в контрольной группе <111> *WT*8(5,3)-кода

Общее количество необнаруживаемых ошибок в *WTM*(*m*, *k*)-кодах определяется путем умножения количества ошибок в одной контрольной группе на величину *M*.

В табл. 5 приводятся распределения необнаруживаемых ошибок в информационных векторах *WTM*(*m*, *k*)-кодов при некоторых значениях *m*. Анализ подобной таблицы позволил установить особенности нового класса кодов с суммированием по обнаружению ошибок в информационных векторах:

– любой *WTM*(*m*, *k*)-код обнаруживает 100 % одиночных искажений (является помехоустойчивым);

Таблица 5. Распределения необнаруживаемых ошибок в информационных векторах некоторых *WTM*(*m*, *k*)-кодов

m	*k*	*M*	Распределения необнаруживаемых ошибок по кратностям, $N_{m,d}$												N_m
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2	2	4	0	4											4
3	2	4	0	0	8										8
4	3	8	0	8	0	16									24
5	3	8	0	32	32	0	32								96
6	3	8	0	192	0	192	0	64							448
7	3	8	0	448	448	448	448	0	128						1920
8	4	16	0	832	0	1936	0	832	0	256					3856
9	4	16	0	2304	1280	4096	4096	1280	2304	0	512				15872
10	4	16	0	7680	0	24064	0	24064	0	7680	0	1024			64512
11	4	16	0	17408	7424	58496	45696	45696	58496	7424	17408	0	2048		260096
12	4	16	0	44032	0	242688	0	466944	0	242688	0	44032	0	4096	1044480

– $WTM(m, k)$-коды с длинами информационных векторов $m \neq 2^t$ $(t = 1, 2, \ldots)$ являются оптимальными;

– $WTM(m, k)$-коды с длинами информационных векторов $m = 2^t$ $(t = 1, 2, \ldots)$ близки к оптимальным, но не являются таковыми;

– $WTM(m, k)$-коды с четными значениями m обнаруживают 100 % ошибок нечетных кратностей в информационных векторах (таким свойством обладают любые коды Бергера);

– $WTM(m, k)$-коды обнаруживают 100 % ошибок кратности $d = m - 1$ в информационных векторах;

– $WTM(m, k)$-кодами не обнаруживается 100 % ошибок максимальной кратностью $d = m$ в информационных векторах;

– количество необнаруживаемых ошибок каждой кратностью (а также общее число необнаруживаемых ошибок) кратно величине модуля M.

Свойства $WTM(m, k)$-кодов объясняются правилами их построения. Например, помехоустойчивость объясняется тем, что в качестве весовых коэффициентов используется последовательность натуральных чисел от 1 до $m - 1$, а модуль определения вычета всегда превосходит максимальное значение веса перехода в информационном векторе: $w_{m-1,\,m} = m - 1$, $M = 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil}$ и $M > m - 1$. Если бы модуль M был равен значению веса перехода между самыми старшими разрядами $w_{m-1,\,m}$, то вычет из данного числа был бы равен нулю: $w_{m-1,\,m}\ (\mathrm{mod} M) = M\ (\mathrm{mod} M) = 0$. Это означало бы, что даже при активизации перехода значение веса в общей сумме W было бы всегда равно нулю и разряд бы не контролировался.

На рис. 3 приводится сравнение $WTM(m, k)$-кодов с $S(m, k)$-кодами по способности к обнаружению двукратных ошибок в информационных векторах – изображена зависимость значения отношения количества двукратных необнаруживаемых ошибок в информационных векторах к общему количеству двукратных ошибок в информационных векторах (величина β_d) от длины информационного вектора. Из рис. 3 следует, что $WTM(m, k)$-коды более чем в два раза эффективнее обнаруживают двукратные ошибки, чем $S(m, k)$-коды. Это справедливо и для ошибок любых четных кратностей (табл. 6). На графиках, приведенных на рис. 4, показана зависимость величины η_m, равной отношению количества необнаруживаемых ошибок данной кратностью в кодах Бергера и в рассматриваемых взвешенных кодах, от длины информационного вектора m. Величина η_m показывает, во сколько раз уменьшается количество необнаруживаемых ошибок данной кратностью в $WTM(m, k)$-кодах в сравнении с $S(m, k)$-кодами при конкретном значении m.

При нечетных значениях m эффективность обнаружения $WTM(m, k)$-кодами ошибок четной кратностью в сравнении со значениями $m \pm 1$ возрастает, что происходит по причине наличия в классе необнаруживаемых ошибок у кодов с нечетными значениями m ошибок нечетных кратностей.

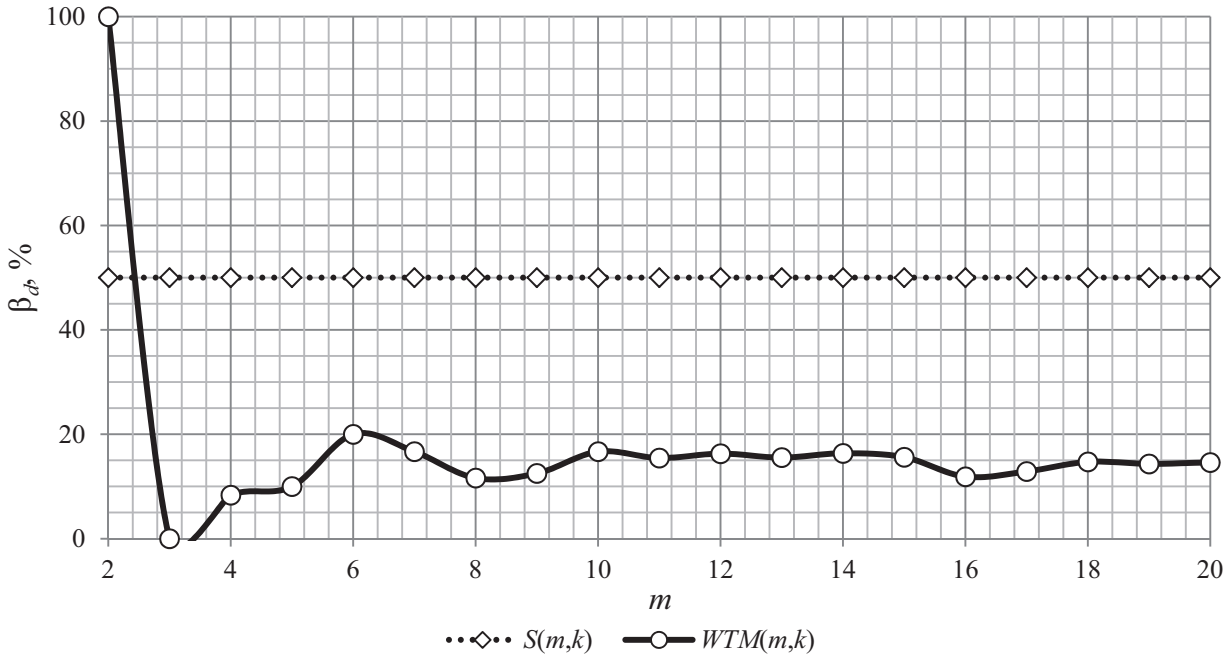

Рис. 3. Доля необнаруживаемых двукратных ошибок от общего числа двукратных ошибок в $S(m, k)$- и $WTM(m, k)$-кодах

3 Экспериментальные исследования кодов с суммированием

Для оценки эффективности вновь разрабатываемых способов построения надежных логических устройств часто используются известные базы контрольных логических схем [52]. Для сравнения свойств предложенного $WTM(m, k)$-кода со свойствами классических $S(m, k)$-кодов нами был выбран пакет контрольных комбинационных схем LGSynth`89 [53–55]. Контрольные комбинационные схемы LGSynth`89, в том числе, описаны в формате *.netblif, который является списочной формой задания схемы в виде net-листа – он содержит информацию о логических элементах структуры и задает конфигурацию связей между входами и выходами самой схемы и внутренними логическими элементами. Все контрольные комбинационные схемы записаны в базисе ИЛИ-НЕ (библиотека nor.genlib).

Целью экспериментов ставилось комплексное исследование параметров сложности технической реализации и возможностей обнаружения ошибок на выходах контролируемых устройств при организации систем их функционального контроля по $WTM(m, k)$-кодам, а также сравнение параметров систем функционального контроля со структурами, полученными по $S(m, k)$-кодам.

Показателем сложности технической реализации логического устройства является площадь (L). Площадь рассчитывается с применением известного интерпретатора SIS (Sequential Interactive Synthesis), разработанного в Университете Калифорнии (Berkeley) специально для решения задач технической диагностики [56].

Таблица 6. Значение β_d по каждой кратности для классического и взвешенного кодов с суммированием

m	Доля необнаруживаемых ошибок кратности d от общего количества ошибок данной кратности, %																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
WTM (*m*, *k*)-код																				
2	0	100																		
3	0	0	100																	
4	0	8,33	0	100																
5	0	10	10	0	100															
6	0	20	0	20	0	100														
7	0	16,67	10	10	16,67	0	100													
8	0	11,61	0	10,8	0	11,61	0	100												
9	0	12,5	2,98	6,35	6,35	2,98	12,5	0	100											
10	0	16,67	0	11,19	0	11,19	0	16,67	0	100										
11	0	15,45	2,2	8,66	4,83	4,83	8,66	2,2	15,45	0	100									
12	0	16,29	0	11,97	0	12,34	0	11,97	0	16,29	0	100								
13	0	15,54	2,05	8,89	4,75	6,54	6,54	4,75	8,89	2,05	15,54	0	100							
14	0	16,35	0	12,76	0	12,27	0	12,27	0	12,76	0	16,35	0	100						
15	0	15,6	3,1	9,23	4,26	7,32	5,79	5,79	7,32	4,26	9,23	3,1	15,6	0	100					
16	0	11,88	0	6,61	0	6,15	0	6,15	0	6,15	0	6,61	0	11,88	0	100				
17	0	12,87	0,81	5,65	1,7	4,09	2,49	3,27	3,27	2,49	4,09	1,7	5,65	0,81	12,87	0	100			
18	0	14,71	0	7,25	0	6,26	0	6,15	0	6,15	0	6,26	0	7,25	0	14,71	0	100		
19	0	14,33	0,68	6,47	1,46	4,5	2,2	3,61	2,9	2,9	3,61	2,2	4,5	1,46	6,47	0,68	14,33	0	100	
20	0	14,61	0	7,47	0	6,43	0	6,2	0	6,16	0	6,2	0	6,43	0	7,47	0	14,61	0	100
S (*m*, *k*)-код																				
2÷20	0	50	0	37,5	0	31,25	0	27,34	0	24,61	0	22,56	0	20,95	0	19,64	0	18,55	0	17,62

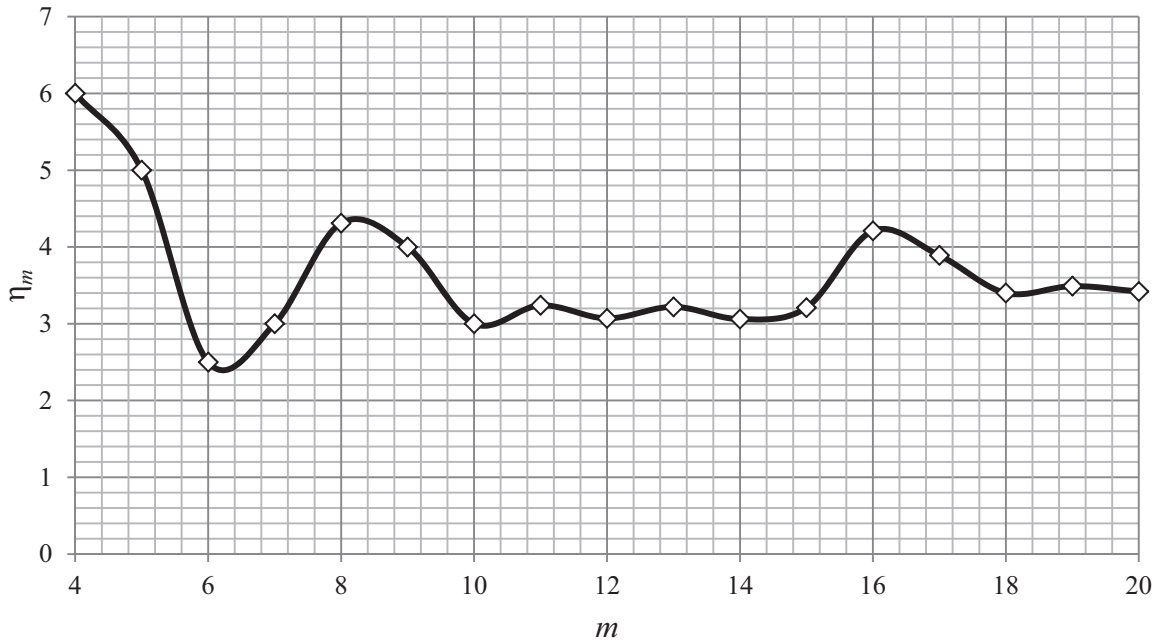

Рис. 4. Улучшение свойства обнаружения двукратных ошибок *WTM*(*m*,*k*)-кодами в сравнении с *S*(*m*,*k*)-кодами

С использованием разработанного программного обеспечения для 20 контрольных комбинационных схем были получены файлы, описывающие блоки системы функционального контроля, построенные по *S*(*m*,*k*)- и *WTM*(*m*,*k*)-кодам (см. рис. 1). Затем, с применением интерпретатора SIS, получены значения площадей полученных структур (табл. 7). Для подавляющего большинства контрольных комбинационных схем площадь системы функционального контроля, построенной по *WTM*(*m*,*k*)-коду, оказалась больше, чем площадь системы функционального контроля, построенной по *S*(*m*,*k*)-коду. Для оценки изменения сложности системы функционального контроля при использовании *WTM*(*m*,*k*)-кода взамен *S*(*m*,*k*)-кода введен коэффициент

$$\varepsilon = \frac{L_m^{S(m,k)}}{L_m^{WTM(m,k)}}, \qquad (2)$$

который показывает, во сколько раз уменьшилась площадь, занимаемая системой на кристалле. Если $\varepsilon > 1$, то эффективнее применение *WTM*(*m*,*k*)-кода, если $\varepsilon < 1$, то эффективнее использовать *S*(*m*,*k*)-код. Практически для всех контрольных комбинационных схем получен показатель $\varepsilon < 1$, за исключением alu2 и x2. Для 13 контрольных комбинационных схем значение ε принадлежит диапазону 0,5–1,0, что говорит о том, что значение площади для большинства контрольных примеров увеличивается, но не более чем в два раза. В среднем значение площади увеличивается примерно на 25 %. Таким образом, системы функционального контроля, построенные по классическим кодам с суммированием, являются более простыми, чем системы функционального контроля, построенные по взвешенным кодам с суммированием.

Таблица 7. Показатели сложности технической реализации систем функционального контроля

№	Контрольная схема	Число выходов, m	Площадь контрольной схемы	Площадь системы функционального контроля		ε
				$S(m,k)$	$WTM(m,k)$	
1	alu2	6	8856	22 112	12 548	1,762
2	alu4	8	17 288	177 472	261 960	0,677
3	b1	4	304	564	1912	0,295
4	c17	2	256	792	896	0,884
5	cm42a	10	640	10 432	15 312	0,681
6	cm82a	3	656	1768	1784	0,991
7	cm85a	3	992	2680	2752	0,974
8	cm138a	8	560	4704	8488	0,554
9	cm151a	2	760	896	1152	0,778
10	cm162a	5	1176	5872	6432	0,913
11	cm163a	5	1176	7376	8640	0,854
12	cmb	4	1248	2536	3896	0,651
13	cu	11	1464	25 592	30 864	0,829
14	decod	16	800	22 464	632 152	0,036
15	f51m	8	3360	15 752	21 696	0,726
16	pcle	9	1816	23 680	25 344	0,934
17	pm1	13	1280	19 120	77 856	0,246
18	tcon	16	1152	47 848	1200 312	0,04
19	x2	7	1304	5960	4880	1,221
20	z4ml	4	1600	4672	7288	0,641
Среднее значение						0,734

На рис. 5 для наглядности графически в виде точек изображены значения величины ε для различных контрольных примеров, а также жирной линией показано среднее значение ε = 0,734.

Для определения свойств обнаружения ошибок различными кодами с применением специально разработанного программного обеспечения проанализированы возникающие на выходах контрольных комбинационных схем ошибки. Для каждой контрольной схемы определено количество необнаруживаемых $S(m,k)$- и $WTM(m,k)$-кодами ошибок, а также рассчитаны следующие показатели обнаружения ошибок:

1) δ – доля необнаруживаемых данным кодом ошибок, %, на выходах контрольной схемы от общего количества ошибок, возникающих на выходах схемы:

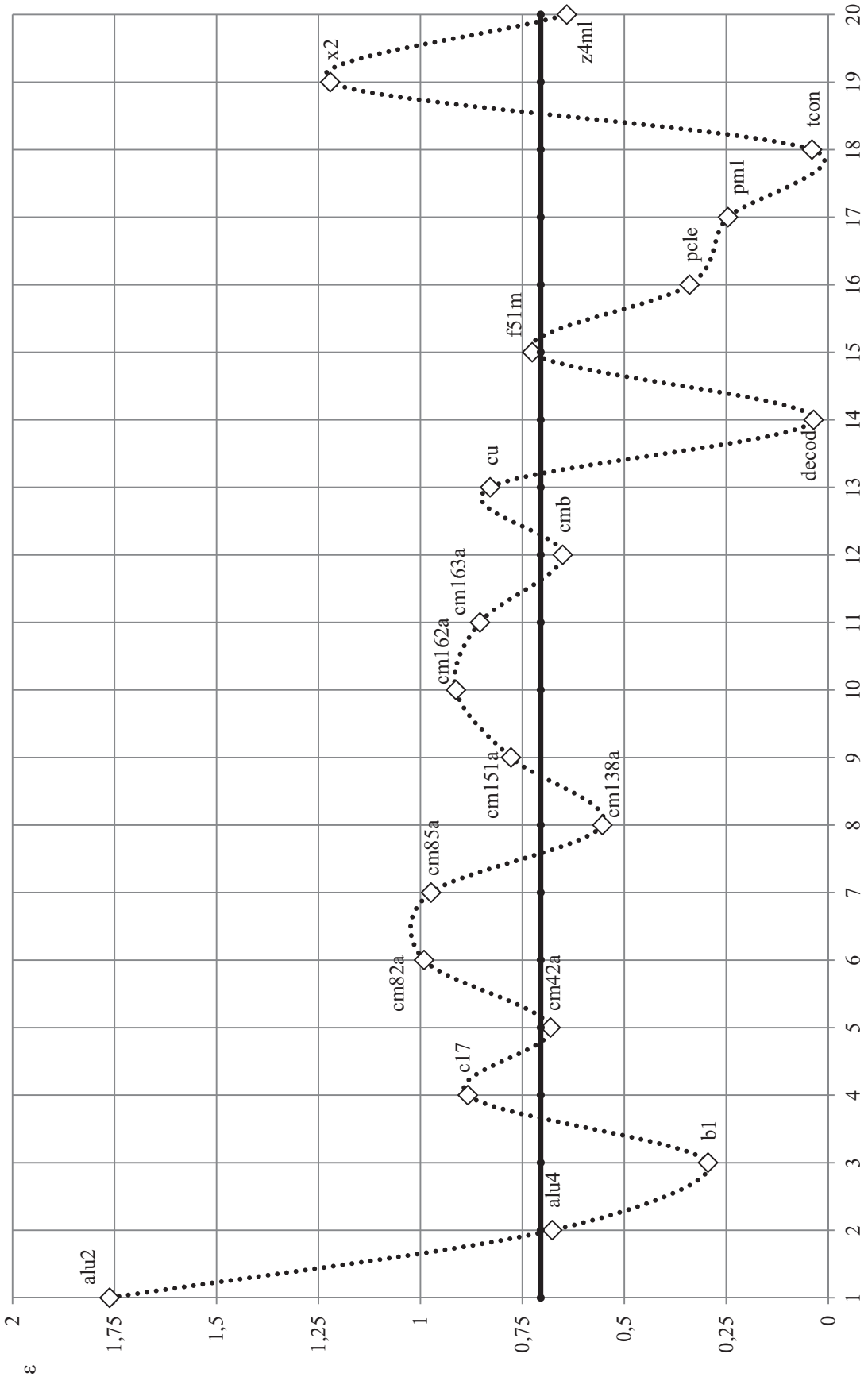

Рис. 5. Значения величины ε для различных контрольных комбинационных схем

$$\delta = 100 \cdot \frac{N_m}{N}; \quad (3)$$

2) α – отношение количества необнаруживаемых ошибок в $S(m,k)$-коде к количеству необнаруживаемых ошибок в $WTM(m,k)$-коде; коэффициент, показывающий, во сколько раз $WTM(m,k)$-код эффективнее обнаруживает ошибки на выходах контрольной схемы, чем $S(m,k)$-код:

$$\alpha = \frac{N_m^{S(m,k)}}{N_m^{WTM(m,k)}}; \quad (4)$$

3) α_d – отношение количества необнаруживаемых ошибок данной кратностью d в $S(m,k)$-коде к количеству необнаруживаемых таких ошибок в $WTM(m,k)$-коде; коэффициент, показывающий, во сколько раз $WTM(m,k)$-код эффективнее обнаруживает ошибки на выходах контрольной схемы, чем $S(m,k)$-код:

$$\alpha_d = \frac{N_{m,d}^{S(m,k)}}{N_{m,d}^{WTM(m,k)}}. \quad (5)$$

Данные экспериментальных исследований занесены в табл. 8 и 9. Таблица 8 содержит данные о свойствах кода по обнаружению ошибок в целом, а таблица 9 – по различным их кратностям.

Анализируя коэффициент α, можно сделать вывод о том, что $WTM(m,k)$-код достаточно эффективно обнаруживает ошибки в реальных логических устройствах: для 15 контрольных комбинационных схем модульный код с суммированием взвешенных переходов обнаруживает большее количество ошибок, чем классический код Бергера, при этом для 8 комбинационных схем достигнуто 100 %-е обнаружение одиночных ошибок на выходах контролируемых схем.

В табл. 9 приведены данные о распределениях необнаруживаемых ошибок на выходах 10 комбинационных схем по кратностям. Из табл. 9 следует, что для многих контрольных схем количество двукратных необнаруживаемых ошибок при использовании $WTM(m,k)$-кода уменьшилось в несколько раз в сравнении с контролем по $S(m,k)$-коду.

Заключение

Предложенный в статье способ построения кода с суммированием позволяет для всех длин информационных векторов, за исключением $m = 2^t$ (t = 1, 2, …), получать оптимальные коды с суммированием с таким же количеством контрольных разрядов, как у классического кода Бергера. При том, что для $WTM(m, k)$-кода достигнут минимум общего количества необнаруживаемых ошибок в информационных векторах, он более эффективно обнаруживает и ошибки малых

Таблица 8. Показатели обнаружения ошибок кодами с суммированием

№	Контрольная схема	Всего ошибок	Количество необнаруживаемых ошибок		δ, %		α
			$S(m,k)$	$WTM(m,k)$	$S(m,k)$	$WTM(m,k)$	
1	alu2	61 988	7672	2326	12,377	3,752	3,298
2	alu4	1966 881	186 142	21 473	9,464	1,092	8,669
3	b1	44	2	0	4,545	0	–
4	c17	234	2	46	0,855	19,658	0,043
5	cm42a	278	8	0	2,878	0	–
6	cm82a	648	68	4	10,494	0,617	17
7	cm85a	30 912	176	0	0,569	0	–
8	cm138a	680	0	0	0	0	–
9	cm151a	14 592	14 592	14 592	100	100	1
10	cm162a	317 331	1920	6585	0,605	2,075	0,292
11	cm163a	1221 312	10 368	21 632	0,849	1,771	0,479
12	cmb	288 218	6	0	0,002	0	–
13	cu	137 984	34 048	640	24,675	0,464	53,2
14	decod	224	0	0	0	0	–
15	f51m	13 008	91	156	0,7	1,199	0,583
16	pcle	17 472 087	188 416	97 113	1,078	0,556	1,94
17	pm1	189 440	6848	617	3,615	0,326	11,099
18	tcon	4849 664	0	0	0	0	–
19	x2	19 708	104	348	0,528	1,766	0,299
20	z4ml	4168	128	0	3,071	0	–
Средние значения					8,815	6,664	1,323

кратностей. Например, все $WTM(m,k)$-коды при длинах информационных векторов $m = 2 \div 20$ более чем в два раза обнаруживают больше двукратных ошибок, чем $S(m,k)$-коды. Такое свойство определяет преимущество $WTM(m,k)$-кодов перед $S(m,k)$-кодами при организации систем функционального контроля.

В качестве особенности предложенного оптимального кода следует отметить появление в классе необнаруживаемых ошибок с нечетными кратностями для четных значений длин информационных векторов и невозможность обнаружения ошибок с максимальными кратностями $d = m$. Последние, однако, в реальных схемах возникают крайне редко.

Результаты экспериментов с контрольными комбинационными схемами показали, что при незначительном увеличении показателя сложности технической реализации системы функционального контроля для большинства

Таблица 9. Распределения необнаруживаемых ошибок по кратностям в контрольных схемах

Контрольная схема	Необнаруживаемые ошибки по кратностям d, $N_{m,d}$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	N_m
alu2									
Всего	46 095	11 973	3589	287	44	0			61 988
$S(m, k)$	0/0 %	7644/63,84 %	0/0 %	28/9,76 %	0/0 %	0/0 %			7672/12,38 %
$WTM(m, k)$	0/0 %	2230/18,63 %	0/0 %	96/33,45 %	0/0 %	0/0 %			2326/3,75 %
α	–	3,43	–	0,29	–	–			3,3
alu4									
Всего	1426 687	299 561	151 604	68 823	20 002	204	0	0	1966 881
$S(m, k)$	0/0 %	181 963/60,74 %	0/0 %	4177/6,07 %	0/0 %	2/0,98 %	0/0 %	0/0 %	186 142/9,46 %
$WTM(m, k)$	0/0 %	14 034/4,68 %	0/0 %	7439/10,81 %	0/0 %	0/0 %	0/0 %	0/0 %	21 473/1,09 %
α	–	12,97	–	0,56	–	–	–	–	8,67
cm82a									
Всего	576	68	4						648
$S(m, k)$	0/0 %	68/100 %	0/0 %						68/10,49 %
$WTM(m, k)$	0/0 %	0/0 %	4/100 %						4/0,62 %
α	–	–	0						17
cm162a									
Всего	248 348	37 886	23 996	6877	224				317 331
$S(m, k)$	0/0 %	1920/5,07 %	0/0 %	0/0 %	0/0 %				1920/0,61 %
$WTM(m, k)$	0/0 %	6137/16,2 %	224/0,93 %	0/0 %	224/100 %				6585/2,08 %
α	–	0,31	0	–	0				0,29
cm163a									
Всего	987 648	132 096	79 680	21 824	64				1221 312
$S(m, k)$	0/0 %	10 368/7,85 %	0/0 %	0/0 %	0/0 %				10 368/0,85 %
$WTM(m, k)$	0/0 %	21 568/16,33 %	0/0 %	0/0 %	64/100 %				21 632/1,77 %
α	–	0,48	–	–	0				0,48

Окончание табл. 9

Контрольная схема	Необнаруживаемые ошибки по кратностям d, $N_{m,d}$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	N_m
f51m									
Всего	12 169	781	56	2	0	0	0	0	13 008
$S(m, k)$	0/0%	91/11,65%	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%	91/0,7%
$WTM(m, k)$	0/0%	156/19,97%	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%	156/1,2%
α	–	0,58	–	–	–	–	–	–	0,58
pcle									
Всего	15 696 664	493 980	448 104	390 486	271 656	129 756	37 080	4361	17 472 087
$S(m, k)$	0/0%	188 416/38,14%	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%	188 416/1,08%
$WTM(m, k)$	0/0%	31 222/6,32%	13 565/3,03%	25 134/6,44%	18 399/6,77%	4433/3,42%	4360/11,76%	0/0%	97 113/0,56%
α	–	6,03	0	0	0	0	0	–	1,94
pm1									
Всего	174 528	9408	3968	1536	0	0	0	0	189 440
$S(m, k)$	0/0%	6400/68,03%	0/0%	448/29,17%	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%	6848/3,61%
$WTM(m, k)$	0/0%	512/5,44%	0/0%	105/6,84%	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%	617/0,33%
α	–	12,5	–	4,27	–	–	–	–	11,1
x2									
Всего	16 624	2428	544	96	16	0	0		19 708
$S(m, k)$	0/0%	104/4,28%	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%		104/0,53%
$WTM(m, k)$	0/0%	288/11,86%	4/0,74%	48/50%	8/50%	0/0%	0/0%		348/1,77%
α	–	0,36	0	0	0	–	–		0,3
z4ml									
Всего	4008	128	32	0					4168
$S(m, k)$	0/0%	128/100%	0/0%	0/0%					128/3,07%
$WTM(m, k)$	0/0%	0/0%	0/0%	0/0%					0/0%
α	–	–	–	–					–

реальных схем достигается улучшение показателя обнаружения ошибок. В некоторых случаях достигается обнаружение 100 % одиночных неисправностей на выходах элементов внутренней структуры контрольных схем. В среднем *WTM*(*m*,*k*)-коды обнаруживают в 1,323 раза больше ошибок на выходах контрольных комбинационных схем, чем *S*(*m*,*k*)-коды. *WTM*(*m*,*k*)-коды в среднем не обнаруживают 6,664 % возможных ошибок на выходах контрольных схем, тогда как кодами Бергера не обнаруживается 8,815 % таких ошибок (см. табл. 8).

Использование информации о свойствах обнаружения ошибок на выходах реальных схем *WTM*(*m*,*k*)-кодом позволяет при преобразовании структуры самого контролируемого устройства обеспечить решение задачи 100 %-го обнаружения одиночных неисправностей на выходах внутренних логических элементов. При этом потребуется меньшее количество избыточных элементов, чем при выборе в качестве основы системы контроля классического кода Бергера и применении известных алгоритмов реконфигурации структур комбинационных схем в контролепригодные [57–59].

Библиографический список

1. Шаманов В. И. Процесс формирования асимметрии тягового тока в рельсовой линии / В. И. Шаманов // Электротехника. – 2014. – № 8. – С. 34–37.
2. Кравцов Ю. А. Задачи и возможности совершенствования рельсовых цепей тональной частоты / Ю. А. Кравцов, А. И. Каменев, Н. Н. Балуев, В. А. Клюзко // Автоматика, связь, информатика. – 2014. – № 3. – С. 10–14.
3. Кравцов Ю. А. Перспективные способы кодирования рельсовых цепей тональной частоты / Ю. А. Кравцов, Е. В. Архипов, М. Е. Бакин // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. – № 2. – С. 119–126.
4. 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. Шаманов В. И. Электромагнитная совместимость систем железнодорожной автоматики и телемеханики / В. И. Шаманов. – М. : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. – 244 с.
6. Сапожников Вал. В. Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики : учебник для вузов ж.-д. транспорта / Вал. В. Сапожников, Ю. А. Кравцов, Вл. В. Сапожников ; под ред. Вал. В. Сапожникова. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 394 с.
7. Молодцов В. П. Системы диспетчерского контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. пособие / В. П. Молодцов, А. А. Иванов. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2010. – 140 с.

8. Ефанов Д. В. Основы построения и принципы функционирования систем технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. пособие / Д. В. Ефанов, А. А. Лыков. – СПб. : Петербургский государственный университет путей сообщения, 2012. – 59 с.
9. Согомонян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян, Е. В. Слабаков. – М. : Радио и связь, 1989. – 208 с.
10. Сапожников Вал. В. Самопроверяемые дискретные устройства / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
11. 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.
12. Jha N. K. Design and Synthesis of Self-Checking VLSI Circuits / N. K. Jha, S. Wang // IEEE Trans. Computer-Aided Design. – 1993. – Vol. 12. – Issue 6. – Pp. 878–887.
13. Goessel M. Error Detection Circuits / M. Goessel, S. Graf. – London : McGraw-Hill, 1994. – 261 p.
14. Piestrak S. J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes / S. J. Piestrak. – Wrocław : Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. – 111 p.
15. Pradhan D. K. Fault-Tolerant Computer System Design / D. K. Pradhan. – N. Y. : Prentice Hall, 1996. – 560 p.
16. Gorshe S. S. A Self-Checking ALU Design with Efficient Codes / S. S. Gorshe, B. Bose // Proceedings of 14th VLSI Test Symposium, Princeton. – NJ, USA, 1996. – Pp. 157–161.
17. Guo Y.-Y. Fast and Area-Time Efficient Berger Code Checkers / Y.-Y. Guo, J.-C. Lo, C. Metra // Workshop on Defect and Fault-Tolerance in VLSI Systems. – 1997. – October 20–22. – Pp. 110–118.
18. 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.
19. Matrosova A. Survivable Self-Checking Sequential Circuits / A.Yu. Matrosova, I. Levin, S. A. Ostanin // Proc. of 2001 IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems (DFT 2001), Oct. 24–26. – San Francisco, CA, 2001. – Pp. 395–402.
20. Abdulhadi A. H. Self Checking Register File Using Berger Code / A. H. Abdulhadi, A. H. Maamar // 6th WSEAS International Conference on Circuits, systems, control & signal processing, 2007, Cairo, Egypt, December 29–31. – Pp. 62–68.
21. Wang L.-T. System-on-Chip Test Architectures : Nanometer Design for Testability / L.-T. Wang, C. E. Stroud, N. A. Touba. – Morgan Kaufmann Publishers, 2008. – 856 p.
22. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем / А. В. Дрозд, В. С. Харченко, С. Г. Антощук [и др.] ; под ред. А. В. Дрозда, В. С. Харченко. – Харьков : Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского (ХАИ), 2012. – 614 с.
23. Srihari P. Sum Codes : A Binary Channel Coding Scheme / P. Srihari // International Journal of Computer Science And Technology. – 2014. – Vol. 5. – Issue 1. – Pp. 60–64.

24. Никитин А. Б. Управление стрелочными электроприводами в компьютерных системах горочной централизации / А. Б. Никитин, А. Н. Ковкин // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 51–62.
25. Pierce D. Efficient Self-Checking Checkers for Berger Codes / D. Pierce, P. K. Lala // Proc. of 1st IEEE Int. On-Line Testing Workshop. – 1995. – Pp. 238–242.
26. Mitra S. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? / S. Mitra, E. J. McClaskey // Proceedings of International Test Conference, 2000, USA, Atlantic City, NJ, 3–5 October 2000. – Pp. 985–994.
27. Mitra S. Diversity Techniques for Concurrent Error Detection / S. Mitra, E. J. McClaskey // International Symposium on Quality Electronic Design, 2001, USA, San Jose, CA, 26–28 March. – Pp. 249–250.
28. Ghosh S. Synthesis of Low Power CED Circuits Based on Parity Codes / S. Ghosh, S. Basu, N. A. Touba // Proc. of 23rd IEEE VLSI Test Symposium (VTS'05). – 2005. – Pp. 315–320.
29. Ubar R. Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source). Information Science Reference, Hershey / R. Ubar, J. Raik, H.-T. Vierhaus. – N. Y., IGI Global, 2011. – 578 p.
30. Пархоменко П. П. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомонян. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 320 с.
31. Berger J. M. A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels / J. M. Berger // Information and Control. – 1961. – Vol. 4. – Issue 1. – Pp. 68–73.
32. 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.
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. 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.
38. Das D. Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multilevel Circuits / D. Das, N. A. Touba // Proc. 17th IEEE Test Symposium, USA, California, 1999. – Pp. 370–376.

39. Das D. Low Cost Concurrent Error Detection Based on Modulo Weight-Based Codes / D. Das, N.A. Touba, M. Seuring, M. Gossel // Proceedings of IEEE 6th International On-Line Testing Workshop (IOLTW), Spain, Palma de Mallorca, July 3–5, 2000. – Pp. 171–176.
40. Сапожников Вал. В. Взвешенные коды с суммированием для организации контроля логических устройств / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Электронное моделирование. – 2014. – Т. 36. – № 1. – С. 59–80.
41. О способах построения кодов с суммированием с минимальным общим числом необнаруживаемых искажений в информационных векторах / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, Д. А. Никитин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2014. – № 1. – С. 82–91.
42. 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.
43. 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.
44. Saposhnikov Val. New Code for Fault Detection in Logic Circuits / Val. Saposhnikov, Vl. Saposhnikov // Proc. 4th Int. Conf. on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems, St. Petersburg, Russia, June 21–24, 1999. – Pp. 693–696.
45. Мехов В. Б. Контроль комбинационных схем на основе кодов с суммированием взвешенных переходов / В. Б. Мехов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2006. – № 2. – С. 126–126.
46. Мехов В. Б. Построение тестов для взвешенных кодов / В. Б. Мехов // Автоматика и телемеханика железных дорог России. Новая техника и новые технологии : сб. науч. трудов ; ред. Вл. В. Сапожников. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2007. – С. 81–89.
47. Mehov V. Concurrent Error Detection Based on New Code with Modulo Weighted Transitions between Information Bits / V. Mehov, Val. Saposhnikov, Vl. Sapozhnikov, D. Urganskov // Proceedings of 7th IEEE East-West Design & Test Workshop (EWDTW`2007), Erevan, Armenia, September 25–30, 2007. – Pp. 21–26.
48. 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.
49. 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.
50. Дмитриев В. В. Применение кода с суммированием с взвешенными переходами для построения систем функционального контроля / В. В. Дмитриев, Д. В. Ефанов, М. Р. Черепанова // Интеллектуальные системы на транспорте : сб. материалов V МНПК «ИнтеллектТранс-2015» ; под ред. д-ра техн. наук, проф. А. А. Корниенко. – СПб. : ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. – С. 305–311.

51. 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.
52. Collection of Digital Design Benchmarks. – URL : http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks.
53. Yang S. Logic Synthesis and Optimization Benchmarks / S. Yang // Technical Report, MCNC, Dec. 1988, published at 1989 MCNC International Workshop on Logic Synthesis.
54. Benchmarks : LGSynth89. – URL : http://www.cbl.ncsu.edu:16080/benchmarks/LGSynth89/mlexamples/.
55. Yang S. Logic Synthesis and Optimization Benchmarks : User Guide : Version 3.0 / S. Yang. – Microelectronics Center of North Carolina (MCNC), 1991. – 88 p.
56. 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.
57. Гессель М. Построение самотестируемых и самопроверяемых комбинационных устройств со слабонезависимыми выходами / М. Гессель, Е. С. Согомонян // Автоматика и телемеханика. – 1992. – № 8. – С. 150–160.
58. 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.
59. 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.

Sapozhnikov Valery V.,
Sapozhnikov Vladimir V.,
Efanov Dmitry V.,
Dmitriev Vyacheslav V.,
Cherepanova Maria R.

«Automation and Remote Control on Railways» department,
Petersburg State Transport University

Method of formation of sum code with improved efficiency of error detection in data vectors

The article describes a method for sum code formation with a minimum total number of undetectable errors (optimum code), based on the idea of modification of the code with

weighted transition summation between the bits, adjacent in data vector. The proposed sum code can be assigned to the class of modular codes with weighted transitions summation. It has the same number of check bits as a classic Berger code, however, it also has the improved performance of error detection in data vectors, especially in a low multiplicity of errors. The article states the properties of a new sum code, particularly important is that when data vectors have $m \neq 2^t$ (t = 1, 2, …) length the optimum code can be built. When $m = 2^t$ (t = 1, 2, …), however, the codes are close to optimum. The article explains this feature of a modular code with weighted transitions. Moreover, the experiment with reference LGSynth`89 combinational circuits shows that modular code with weighted transitions allows to organize concurrent error detection (CED) systems with improved detection of errors in comparison with structures, based on Berger codes. In some cases, the problem of detection of 100 % of errors at the outputs of combinational circuits under control might be solved. All that makes the resulting code a promising for solving the problems of technical diagnostics.

technical diagnostics; concurrent error detection (CED) system; sum code; Berger code; weighted transition; code with summation of weighted transitions; undetectable error in data vector; error detection properties; optimum code

References

1. Shamanov V. I. Process of forming the asymmetry of track line traction current. Electrical engineering (Elektrotekhnika), 2014, issue 8, pp. 34–37.
2. Kravtsov Yu. A., Kamenev A. I., Baluev N. N., Klyuzko V. A. Problems and possibilities for improvement of audio-frequency track circuits. Automation, communication, information science (Avtomatika, svyaz', informatika), 2014, issue 3, pp. 10–14.
3. Kravtsov Yu. A., Arkhipov E. V., Bakin M. E. Advanced methods of audio-frequency track circuits coding. Avtomatika na transporte, 2015, vol. 1, issue 2, pp. 119–126.
4. Lisenkov V. M., Bestem'yanov P. F., Leushin V. B., Lisenkov A. V., Van'shin A. E. Control systems for block train traffic: textbook for railway transport universities : in 3 parts. Part 2; under the editorship of V. M. Lisenkov. Moscow, GOU «Training center for railway transport education», 2009, 324 p.
5. Shamanov V. I. Electromagnetic compatibility of railway automation and remote control systems. Moscow, FGBOU «Training center for railway transport education», 2013, 244 p.
6. Sapozhnikov Val. V., Kravtsov Yu. A., Sapozhnikov Vl. V. Theoretical basics of railway automation and remote control: textbook for railway transport universities; under the editorship of Val. V. Sapozhnikov. Moscow, GOU «Training center for railway transport education», 2008, 394 p.
7. Molodtsov V. P., Ivanov A. A. Dispatching control and railway automation and remote control monitoring systems: manual. St. Petersburg, Petersburg State Transport University, 2010, 140 p.
8. Efanov D. V., Lykov A. A. Fundamentals of architecture and principles of operations of technical diagnosis and monitoring systems for railway automation and remote control devices: manual. St.Petersburg, Petersburg State Transport University, 2012, 59 p.
9. Sogomonyan E. S., Slabakov E. V. Self-checking devices and fault-tolerant systems. Moscow, Radio and communication (Radio i svyaz'), 1989, 208 p.

10. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. Self-checking discrete devices. St. Petersburg, Energoatomizdat, 1992, 224 p.
11. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. Application of sum codes for synthesis of railway automation and remote control systems using programmable logic integrated circuits. Avtomatika na transporte, 2015, vol. 1, issue 1, pp. 84–107.
12. Jha N. K., Wang S. Design and Synthesis of Self-Checking VLSI Circuits. IEEE Trans. Computer-Aided Design, 1993, vol. 12, issue 6, pp. 878–887.
13. Goessel M., Graf S. Error Detection Circuits. London, McGraw-Hill, 1994, 261 p.
14. Piestrak S. J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995, 111 p.
15. Pradhan D. K. Fault-Tolerant Computer System Design. New-York, Prentice Hall, 1996, 560 p.
16. Gorshe S. S., Bose B. A. Self-Checking ALU Design with Efficient Codes. Proceedings of 14th VLSI Test Symposium, Princeton, NJ, USA, 1996, pp. 157–161.
17. Guo Y.-Y., Lo J.-C., Metra C. Fast and Area-Time Efficient Berger Code Checkers. Workshop on Defect and Fault-Tolerance in VLSI Systems, 1997, October 20–22, pp. 110–118.
18. Matrosova A. Yu., Levin I., Ostanin S. A. Self-Checking Synchronous FSM Network Design with Low Overhead. VLSI Design, 2000, vol. 11, issue 1, pp. 47–58.
19. Matrosova A., Levin I., Ostanin S. Survivable Self-Checking Sequential Circuits. Proc. of 2001 IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems (DFT 2001), Oct. 24–26, San Francisco, CA, 2001, pp. 395–402.
20. Abdulhadi A. H., Maamar A. H. Self Checking Register File Using Berger Code. 6th WSEAS International Conference on Circuits, systems, control & signal processing, 2007, Cairo, Egypt, December 29–31, pp. 62–68.
21. Wang L.-T., Stroud C. E., Touba N. A. System-on-Chip Test Architectures: Nanometer Design for Testability. Morgan Kaufmann Publishers, 2008. 856 p.
22. Drozd A. V., Kharchenko V. S., Antoshchuk S. G. [et al.]. Operational diagnosis of trusted information management system; under the editorship of A. V. Drozd and V. S. Kharchenko. Kharkov, National Aerospace University named after N. E. Zhukovsky (KhAI), 2012, 614 p.
23. Srihari P. Sum Codes: A Binary Channel Coding Scheme. International Journal of Computer Science And Technology, 2014, vol. 5, issue 1, pp. 60–64.
24. Nikitin A. B., Kovkin A. N. Electric point mechanism control in computer systems of automatic switching. Automation on Transport (Avtomatika na transporte), 2015, vol. 1, № 1, pp. 51–62.
25. Pierce D., Lala P. K. Efficient Self-Checking Checkers for Berger Codes. Proc. of 1st IEEE Int. On-Line Testing Workshop, 1995, pp. 238–242.
26. Mitra S., McClaskey E. J. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? Proceedings of International Test Conference, 2000, USA, Atlantic City, NJ, 3–5 October 2000, pp. 985–994.
27. Mitra S., McClaskey E. J. Diversity Techniques for Concurrent Error Detection. International Symposium on Quality Electronic Design, 2001, USA, San Jose, CA, 26–28 March, pp. 249–250.
28. Ghosh S., Basu S., Touba N. A. Synthesis of Low Power CED Circuits Based on Parity Codes. Proc. of 23rd IEEE VLSI Test Symposium (VTS'05), 2005, pp. 315–320.

29. Ubar R., Raik J., Vierhaus H.-T. Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source). Information Science Reference, Hershey – New York, IGI Global, 2011, 578 p.
30. Parkhomenko P.P., Sogomonyan E.S. Basics of technical diagnostics (optimization of diagnostic algorithms and equipment). Moscow, Energoatomizdat, 1981, 320 p.
31. Berger J.M. A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels. Information and Control, 1961, vol. 4, issue 1, pp. 68–73.
32. Efanov D.V., Sapozhnikov Val.V., Sapozhnikov Vl.V. On Sum Code Properties In Concurrent Error Detection Systems. Automation and remote control (Avtomatika i telemekhanika), 2010, № 6, pp. 155–162.
33. Blyudov A., Efanov D., Sapozhnikov Val., Sapozhnikov Vl. 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, 2012, pp.114–117.
34. Blyudov A.A., Efanov D.V., Sapozhnikov Val.V., Sapozhnikov Vl.V. Formation of modified Berger code with minimum number of undetectable errors of data bits. Electronic simulation (Elektronnoe modelirovanie), 2012, vol. 34, № 6, pp. 17–29.
35. Blyudov A.A., Efanov D.V., Sapozhnikov Val.V., Sapozhnikov Vl.V. Sum codes for organization of combinational circuits control. Automation and remote control (Avtomatika i telemekhanika), 2013, № 6, pp. 153–164.
36. Efanov D., Sapozhnikov Val., Sapozhnikov Vl., Blyudov A. 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, 2013, pp. 261–266.
37. Blyudov A.A., Efanov D.V., Sapozhnikov Val.V., Sapozhnikov Vl.V. On sum codes of unit bits in concurrent error detection systems. Automation and remote control (Avtomatika i telemekhanika), 2014, № 8, pp. 131–145.
38. Das D., Touba N.A. Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multilevel Circuits. Proc. 17th IEEE Test Symposium, USA, California, 1999, pp. 370–376.
39. Das D., Touba N.A., Seuring M., Gossel M. Low Cost Concurrent Error Detection Based on Modulo Weight-Based Codes. Proceedings of IEEE 6th International On-Line Testing Workshop (IOLTW), Spain, Palma de Mallorca, July 3–5, 2000, pp. 171–176.
40. Sapozhnikov Val.V., Sapozhnikov Vl.V., Efanov D.V. Weight-based sum codes for logic devices testing organization. Electronic Modeling (Elektronnoe modelirovanie), 2014, vol. 36, № 1, pp. 59–80.
41. Sapozhnikov Val.V., Sapozhnikov Vl.V., Efanov D.V., Nikitin D.A. On methods of sum code formation with minimum total number of undetectable distortions in data vectors. Proceedings of Petersburg Transport University, 2014, № 1, pp. 82–91.
42. 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, 2015, pp. 141–148.
43. Sapozhnikov Val.V., Sapozhnikov Vl.V., Efanov D.V., Nikitin D.A. Modulary weighted-based sum code for technical diagnostic systems. Informatics and control systems (Informatika i sistemy upravleniya), 2015, No 3, pp. 53–62.

44. Saposhnikov Val., Saposhnikov Vl. New Code for Fault Detection in Logic Circuits. Proc. 4th Int. Conf. on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems, St. Petersburg, Russia, June 21–24, 1999, pp. 693–696.
45. Mekhov V. B., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. Conbinational circuits control, based on sum codes with weighted transitions. Proceedings of Petersburg Transport University, 2006, № 2, pp. 126–126.
46. Mekhov V. B. Test generation for weighted-based codes. Automation and remote control of Russian railways. New equipment and new technologies: collection of research papers; under the editorship of Vl. V. Sapozhnikov. St. Petersburg, Petersburg Transport University, 2007, pp. 81–89.
47. Mehov V., Saposhnikov Val., Sapozhnikov Vl., Urganskov D. Concurrent Error Detection Based on New Code with Modulo Weighted Transitions between Information Bits. Proceedings of 7th IEEE East-West Design & Test Workshop (EWDTW`2007), Erevan, Armenia, September 25–30, 2007, pp. 21–26.
48. Mekhov V. B., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. Checking of combinational circuits, based on modified sum codes. Automation and remote control (Avtomatika i telemekhanika), 2008, № 8, pp. 153–165.
49. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V., Dmitriev V. V. Properties of sum codes with weighted transitions with direct sequence of weight ratios. Informatics and management systems (Informatika i sistemy upravleniya), 2014, № 4, pp. 77–88.
50. Dmitriev V. V., Efanov D. V., Cherepanova M. R. Application of sum code with weighted transitions for concurrent error detection (CED) systems. Transport intelligent systems. Proceedings of V MNPK «IntellektTrans-2015»; under the editorship of A. A. Kornienko, D. Eng., professor. St. Petersburg, PGUPS, 2015, pp. 305–311.
51. Sapozhnikov Val., Sapozhnikov Vl., Efanov D., Dmitriev V., Cherepanova M. Optimum Sum Codes, That Effectively Detect the Errors of Low Multiplicities. Radioelectronics & Informatics, 2015, № 1, pp. 17–22.
52. Collection of Digital Design Benchmarks. URL: http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks.
53. Yang S. Logic Synthesis and Optimization Benchmarks. Technical Report, MCNC, Dec. 1988, published at 1989 MCNC International Workshop on Logic Synthesis.
54. Benchmarks: LGSynth89. URL http://www.cbl.ncsu.edu:16080/benchmarks/LGSynth89/mlexamples.
55. Yang S. Logic Synthesis and Optimization Benchmarks: User Guide: Version 3.0. Microelectronics Center of North Carolina (MCNC), 1991, 88 p.
56. Sentovich E. M., Singh K. J., Lavagno L., Moon C., Murgai R., Saldanha A., Savoj H., Stephan P. R., Brayton R. K., Sangiovanni-Vincentelli A. SIS: A System for Sequential Circuit Synthesis. Electronics Research Laboratory, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Berkeley, 4 May 1992, 45 p.
57. Goessel M., Sogomonyan E. S. Design of self-testing and self-checking combinational devices with weakly independent outputs. Automation and remote control (Avtomatika i telemekhanika), 1992, № 8, pp. 150–160.
58. Goessel M., Morozov A. A., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. Srudy of combinational self-checking devices with independent and monotonic independent outputs. Automation and remote control (Avtomatika i telemekhanika), 1997, № 2, pp. 180–193.

59. Morosow A., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Goessel M. Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs. VLSI Design, 1998, vol. 5, issue 4, pp. 333–345.

Статья представлена к публикации членом редколлегии М. Н. Василенко
Поступила в редакцию 15.07.2015, принята к публикации 11.09.2015

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

ДМИТРИЕВ Вячеслав Владимирович – ассистент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: webus@pisem.net

ЧЕРЕПАНОВА Мария Родионовна – студентка факультета «Автоматизация и интеллектуальные технологии» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: bugsbunny.k38@gmail.com

© Сапожников Вал. В., Сапожников Вл. В., 2016
© Ефанов Д. В., Дмитриев В. В., Черепанова М. Р., 2016

Из истории автоматики

УДК 681.518.5+656.25

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

СТАНОВЛЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ И МОНИТОРИНГА УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

Системы функционального контроля и мониторинга позволяют повысить надежность и безопасность устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. Они прошли путь совершенствования от систем диспетчерского контроля с ограниченным количеством контролируемых дискретных параметров до аппаратно-программных комплексов с функциями автоматизированного анализа диагностической информации и развивающимся искусственным интеллектом. В статье освещаются вопросы становления, развития и перспективы совершенствования систем функционального контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. Определено место систем функционального контроля и мониторинга среди систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Отмечены ключевые исторические даты развития систем функционального контроля и мониторинга, указываются сведения о системах основных производителей. Рассматривается необходимость создания ситуационных центров для мониторинга технического состояния устройств управления движением поездов. В статье можно найти достаточно развернутые рассуждения на тему развития систем функционального контроля и мониторинга железнодорожной автоматики и телемеханики, затрагивающие как реалии, так и перспективные технические решения для ближайшего будущего.

железнодорожная автоматика и телемеханика; диспетчерский контроль; функциональный контроль; мониторинг; прогнозирование; системы технического диагностирования и мониторинга

Введение

Высокий уровень надежности и безопасности современных систем управления движением поездов обеспечивается за счет целого комплекса мер: конструктивного исполнения элементов, исключающего опасные отказы; резервирования блоков и узлов; применения самопроверяемых устройств, входящих в схемные

решения систем управления; мероприятий по периодическому обслуживанию устройств, находящихся в эксплуатации, и т. д. [1–3]. Важную роль в работе современного железнодорожного транспорта играют системы функционального контроля и мониторинга, или системы технического диагностирования и мониторинга (СТДМ). Они предназначены для автоматизированного измерения параметров устройств автоматического управления, сбора диагностической информации, ее хранения, обработки, выдачи информационных сообщений о техническом состоянии контролируемых устройств, прогнозируемых изменениях в их работе [4–6].

СТДМ организуются для получения информации о различных объектах инфраструктуры железнодорожного транспорта, в том числе для средств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). СТДМ ЖАТ – это надстраиваемые средства превентивного мониторинга, являющиеся, по сути, совокупностью пассивных средств технического диагностирования и средств обработки получаемых от них данных. СТДМ ЖАТ позволяют автоматизировать задачу измерения некоторых рабочих параметров устройств управления движением поездов, а следовательно, процесс их технического обслуживания и снизить влияние человеческого фактора на работу устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) [7–14].

СТДМ ЖАТ являются усовершенствованным вариантом систем диспетчерского контроля технического состояния устройств электрических централизаций и систем управления движением поездов на перегонах на релейной основе. Релейные системы ЖАТ до сих пор являются доминирующим классом систем управления движением поездов на железных дорогах Российской Федерации (доля релейных систем ЖАТ – примерно 95 % [15]). Современные СТДМ ЖАТ легко контактируют с любыми системами управления движением поездов на микроэлектронной и микропроцессорной основе. СТДМ – это системы верхнего уровня в иерархии систем ЖАТ, позволяющие в автоматизированном режиме «следить» за техническим состоянием устройств управления движением поездов.

1 От систем диспетчерского контроля к системам мониторинга

Первые системы, позволяющие передавать на центральный пост информацию с децентрализованного объекта управления на железнодорожном транспорте, возникли на железных дорогах СССР. В 1934 г. инженер Д. С. Спасский изобрел «устройство для подачи сигналов с линии на диспетчерский пункт» [16]. Уже в 1935 г. стали появляться первые американские патенты на изобретение устройств диспетчерского контроля. Развитие науки и техники во второй половине XX в. привело к созданию первых прототипов СТДМ ЖАТ (естественно, в те годы данные системы такого названия не имели) – систем диспетчерского контроля.

В 1949 г. Всесоюзный научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта разработал первую систему диспетчерского контроля, получившую название ДК-ЦНИИ-49. В период 1949–1951 гг. ею был оборудован опытный участок Тула – Пахомово протяженностью 53 км Московско-Курской железной дороги (примечательно, что спустя ровно 50 лет на этом же объекте будет внедрена первая микропроцессорная система диспетчерского контроля под названием «Аппаратно-программный комплекс диспетчерского контроля» [17]). С 1951 г. началось активное внедрение первой системы диспетчерского контроля на железных дорогах СССР.

В 1957 г. Всесоюзный научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта усовершенствовал свою систему диспетчерского контроля и создал быстродействующую систему диспетчерского контроля (БДК-ЦНИИ-57). Система стала активно тиражироваться на советских железных дорогах. В 1966 г. была создана еще одна система диспетчерского контроля, работающая с применением частотного принципа передачи информации – система ЧДК [16]. К 70-м гг. XX в. системами диспетчерского контроля было оборудовано более 50 тыс. км железных дорог СССР [6].

Первые СТДМ ЖАТ (системы диспетчерского контроля) имели возможность получения ограниченного количества диагностической информации – ими контролировались только дискретные параметры устройств СЦБ – свободность/занятость рельсовых цепей, открытие/закрытие светофоров, положение стрелок, состояния переездов и т. п. Более того, мощность множества передаваемой информации была ограничена (например, в системе ЧДК общее количество контролируемых объектов – 480).

16 декабря 1947 г. физики компании Bell Labs Уолтер Браттейн и Джон Бардин создали первый в мире работоспособный точечный транзистор. Это событие перевернуло мир техники, в том числе используемой на железнодорожном транспорте. Транзисторная техника начала активно развиваться, стали появляться транзисторы на кремнии, затем логические элементы, микросхемы и микропроцессоры. Сегодня именно они являются элементной базой СТДМ ЖАТ. Использование аналогово-цифровых преобразователей дало возможность получения непрерывной диагностической информации (напряжения, токи, сопротивления и т. д.), стал возможным не только «диспетчерский контроль», но и прогнозирование технического состояния [18].

В 80-е гг. XX в. на кафедре «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта под руководством А. В. Гриненко проводятся первые работы по автоматизации измерений параметров устройств СЦБ [17]. Первые прототипы современных СТДМ ЖАТ были получены в лабораториях кафедры в 1994 г. В 1996 г. в Чудовской дистанции сигнализации и связи Октябрьской железной дороги впервые был внедрен «Аппаратно-программный комплекс диспетчера дистанции сигнализации и связи» (АРМ-ШЧД). Новая система, названная разработчиками

«Аппаратно-программный комплекс диспетчерского контроля» (АПК-ДК) стала активно развиваться и внедряться на Восточно-Сибирской железной дороге. Параллельно разработкой аналогичного средства технического диагностирования занимался институт по проектированию сигнализации, централизации, связи и радио на железнодорожном транспорте «Гипротранссигналсвязь» – филиал АО «Росжелдорпроект». Впоследствии эту систему назвали «Автоматизированная система диспетчерского контроля» (АСДК) [19, 20].

В 1999 г. систему АПК-ДК внедрили на станции Тула Московской железной дороги. Этому событию способствовали научные сотрудники кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения А. В. Гриненко и Б. Л. Горбунов [17]. Чуть позже на базе научных лабораторий кафедры были созданы предприятия ООО «Компьютерные информационные технологии» и ЗАО «МГП “ИМСАТ”», функционирующие до сих пор.

В 2001 г. были изданы первые методические указания по проектированию АПК-ДК. Можно сказать, образовался новый класс устройств СЦБ – систем автоматизированного контроля и технического диагностирования (рис. 1).

В 2002 г. в Ростове-на-Дону научно-производственным предприятием «Югпромавтоматизация» была создана «Автоматизированная система диагностирования и контроля устройств сигнализации, централизации и блокировки» (АДК-СЦБ). Сегодня системы АПК-ДК, АСДК, АДК-СЦБ – это основные СТДМ ЖАТ, действующие на железных дорогах России (см. таблицу) [6]. Данные системы конкурируют между собой, будучи внедренными на различных полигонах. Например, основной объект внедрения АДК-СЦБ – Северо-Кавказская железная дорога [21–23], система АПК-ДК, к слову, внедрена на всех железных дорогах России [24]. На некоторых железных дорогах даже в пределах одной дистанции действует несколько СТДМ ЖАТ.

Для централизации процесса обработки диагностической информации с линейных постов данные передаются в концентраторы информации центральных

Рис. 1. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики

Основные показатели систем технического диагностирования и мониторинга

Критерии сравнения	Системы удаленного контроля состояния устройств железнодорожной автоматики и телемеханики					
	ЧДК, ДК-ЦНИИ	АПК-ДК СТДМ	АСДК	АПК-ДК	АДК-СЦБ	КДК-СУ
Производитель	ВНИИЖТ	Кафедра АТ совместно с ООО «КИТ»	Институт ГТСС совместно с ООО «Сектор»	Кафедра АТ совместно с ЗАО «МГП “ИМСАТ”»	НПП ЮгПА	ОАО «НИИАС»
Город	Москва	Санкт-Петербург	Санкт-Петербург	Санкт-Петербург	Ростов-на-Дону	Ростов-на-Дону
Год внедрения	50–70 гг. XX в.	1997	1997	2000	2002	2002
Объекты внедрения	Железные дороги СССР	15 железных дорог РФ, в т. ч. Октябрьская, Московская, Северная	3 железные дороги РФ: Юго-Восточная, Горьковская, Куйбышевская	5 железных дорог РФ, в т. ч. Калининградская, Забайкальская, Дальневосточная	6 железных дорог РФ, в т. ч. Северо-Кавказская, Свердловская, Западно-Сибирская	Сортировочные горки на ж. д. РФ, в т. ч. станции Бекасово-Сортировочное, Красноярск-Восточный, Санкт-Петербург-Московская-Сортировочная
Километраж покрытия ж. д., не менее	60 000	5000	2000	3000	2000	–
Структура	Иерархическая, трехуровневая	Иерархическая, трехуровневая	Иерархическая, двухуровневая	Иерархическая, трехуровневая	Иерархическая, трехуровневая	Иерархическая, двухуровневая
АРМ отображения информации	АРМ ШН	КЗ «Мониторинг»	АРМ АСДК	АРМ АПК-ДК	АРМ ДК ШН	АРМ КДК СУ

Окончание таблицы

Критерии сравнения	Системы удаленного контроля состояния устройств железнодорожной автоматики и телемеханики					
	ЧДК, ДК-ЦНИИ	АПК-ДК СТДМ	АСДК	АПК-ДК	АДК-СЦБ	КДК-СУ
Уровень автоматизации процесса анализа диагностической информации	Отсутствует	Средний				Высокий
Полнота контроля	Низкая: только дискретная информация о состоянии светофоров и рельсовых цепей	Высокая: состояние объектов, ячеек технологического назначения, самодиагностирование, аналоговые измерения				
Контроль дискретной информации	+	+	+	+	+	+
Контроль аналоговой информации	–	+	+	+	+	+
Возможности прогнозирования и автоматизации технического обслуживания	–	+	+	+	+	+
Наличие интегрированных систем поддержки принятия решений	–	–	–	–	–	+

постов, расположенных в зданиях дистанций СЦБ, а затем – в специальные ситуационные центры – центры мониторинга [25–27]. Первый такой центр начали строить в 2003 г. в Санкт-Петербурге – центр мониторинга Октябрьской железной дороги (рис. 2). В 2007 г. он был сдан в эксплуатацию. Сотрудники центра мониторинга анализируют диагностическую информацию, получаемую от устройств ЖАТ (возникающие инциденты). За годы работы центра мониторинга удалось сократить количество отказов более чем в два раза [28].

К концу первого десятилетия XXI в. ситуационные центры были спроектированы на многих железных дорогах – Западно-Сибирской, Северо-Кавказской, Московской и Куйбышевской [17].

Современные СТДМ ЖАТ постоянно совершенствуются: создаются новые измерительные контроллеры, улучшаются каналы передачи информации, повышается надежность самих элементов СТДМ ЖАТ, используются логические методы обработки диагностической информации, минимизируется количество измерительного оборудования и соответственно стоимость самой СДТМ ЖАТ и т. д. [29–41]. К началу второго десятилетия XXI в. руководители железных дорог пришли к важному выводу о необходимости комплексного анализа диагностической информации от всех объектов инфраструктуры железных дорог и, прежде всего, от объектов путевого хозяйства, хозяйства автоматики и телемеханики

Рис. 2. Первый центр мониторинга устройств ЖАТ

и хозяйства энергоснабжения. Стали создаваться ситуационные центры, куда стекается информация от систем автоматизированного диагностирования различных объектов инфраструктуры железных дорог [42].

Эксплуатация ситуационных центров подразумевает не только анализ работы средств обеспечения безопасности движения поездов, но и координацию действий технического персонала дистанций СЦБ по поддержанию высокого уровня отказоустойчивости средств автоматики. В свою очередь, функционирование центра мониторинга с расширением области покрытия железных дорог средствами технического диагностирования и мониторинга приближает переход к прогрессивному методу обслуживания устройств ЖАТ по состоянию.

СТДМ ЖАТ внедряются не только на магистральных железных дорогах, но и на сортировочных горках и в метрополитенах. Например, Ростовским отделением ОАО «НИИАС» с 2002 г. создается система «Контрольно-диагностический комплекс устройств сортировочных горок» (КДК-СУ), ориентированная только на автоматизацию и механизацию сортировочных процессов, а также диагностирование устройств автоматики, обеспечивающих данные процессы [43, 44]. В 2010 г. был согласован проект оборудования станций «Парнас» и «Спасская» Петербургского метрополитена средствами автоматизированного технического диагностирования АПК-ДК. В 2012 г. система АПК-ДК на первых объектах мониторинга в метрополитенах Российской Федерации была введена в постоянную эксплуатацию [45, 46].

В начале XXI в. различные СТДМ ЖАТ развиваются в одинаковых направлениях. Каждая из СТДМ реализует концепцию технического диагностирования и мониторинга устройств ЖАТ, которую можно сформулировать так: повышение отказоустойчивости и ремонтопригодности устройств железнодорожной автоматики достигается за счет непрерывного процесса диагностирования, обработки и автоматизированного анализа информации от объектов контроля.

Реализация СТДМ концепции технического диагностирования и мониторинга позволяет решать все задачи технической диагностики, при этом обеспечиваются [47, 48]:

– контроль технического состояния устройств ЖАТ с возможностью фиксации отклонений их рабочих параметров от допустимых норм;

– сокращение количества отказов благодаря выявлению момента их зарождения на стадии предотказного состояния;

– контроль качества технического обслуживания, а в некоторых случаях – и его автоматизация;

– создание предпосылок к переходу на техническое обслуживание устройств по их фактическому состоянию;

– сокращение времени на поиск неисправностей и восстановление работоспособного состояния устройств ЖАТ;

– архивация, хранение, восстановление событий и сбор статистической информации.

2 Перспективы совершенствования систем мониторинга

СТДМ ЖАТ, шагнувшие из XX в XXI век и имеющие более чем полувековую историю, несомненно являются полезными и необходимыми средствами повышения отказоустойчивости устройств управления движением поездов, а также средствами, облегчающими поиск возникшей неисправности. Системы ЖАТ, не имеющие встроенного уровня самодиагностирования или установленных измерительных контроллеров ЖАТ, кажутся сегодня средствами обеспечения безопасного движения поездов, не защищенными от возникновения отказов (пусть в большинстве своем и защитных). По-прежнему велико участие человека в поддержании высокого уровня отказоустойчивости средств СЦБ. Однако нельзя забывать, что только с повышением уровня автоматизации процессов управления и контроля технического состояния средств управления возможно повышение эффективности и безопасности самих систем, реализующих ответственные технологические процессы, к которым относится и перевозочный процесс на железнодорожном транспорте. СТДМ ЖАТ – это те звенья сложного механизма, которые позволяют «наблюдать» и «предсказывать» поведение устройств управления движением поездов. Такое свойство весьма полезно.

Тем не менее следует констатировать, что современные СТДМ ЖАТ далеки по надежности и качеству от действительно грамотно выстроенных систем мониторинга технического состояния. Этот факт обусловлен, в первую очередь, исторической преемственностью – переходом от систем диспетчерского контроля с минимальным количеством дискретных диагностических параметров к системам, имеющим некоторую долю аналоговых диагностических параметров. К сожалению, как во второй половине XX в., так и в первой четверти XXI в., системы мониторинга организовывались и организуются в большей степени интуитивно – выбираются наиболее простые способы получения диагностической информации, без какого-либо детального анализа необходимости ее дальнейшего целенаправленного использования. СТДМ ЖАТ в большей степени представляют собой хранилища архивной информации (модель «черного ящика» с легким доступом в случае чрезвычайной ситуации). В меньшей мере СТДМ ЖАТ напоминают развитые системы мониторинга со встроенными подсистемами поддержки принятия решения и помощи обслуживающему персоналу дистанций СЦБ. Тем не менее в «зачаточном» виде эти функции имеются, их остается только развить.

Для этого необходим пересмотр принципов получения диагностической информации. Складывается впечатление, что подход к мониторингу носит больше эмпирический, нежели научный характер. Не уделено внимание таким важным характеристикам, как полнота и глубина технического диагностирования. Этот вопрос может быть решен путем детального анализа принципиальных технических решений устройств и систем ЖАТ, с разделением их на напольное технологическое оборудование, каналообразующее оборудование и оборудование постов электрических централизаций. В настоящее время процесс диагностиро-

вания носит преимущественно косвенный характер. Например, о техническом состоянии светофора, расположенного возле железнодорожного пути, СТДМ ЖАТ судит по состоянию датчика измерительного контроллера, установленного на контакты ламп пульта-табло, или же берет данные из управляющего вычислительного комплекса микропроцессорной централизации [17].

Для оценки тестопригодности логических схем, включающих в себя большое количество реле, может быть применен подход, описанный в классической работе Р. Дж. Беннетса [49]. Сам подход, однако, требует совершенствования [50]. Целесообразно также учитывать статистические данные об отказах и вероятностные характеристики элементов автоматики. Для оценки тестопригодности логических схем ЖАТ, кроме того, могут быть использованы современные подходы [51]. Сегодня вопрос оценки тестопригодности остается открытым. Ответ на него позволит получить адекватную оценку необходимости съема того или иного диагностического параметра в схемном узле ЖАТ с учетом известных способов получения диагностической информации. Применительно к конкретной системе ЖАТ это будет первый шаг. Второй шаг, естественно, должен быть связан с оценкой возможности подключения датчиков измерительных контроллеров в схемные узлы ЖАТ. Например, в пятипроводных схемах управления железнодорожными стрелками используется реле НМПШ1200/250, имеющее 2 контактных группы и 2 фронтовых и общих контакта; в работе задействованы все контакты, т. е. нет возможности подключения измерительного устройства к свободным контактам.

Вкупе с подходами к оценке тестопригодности логических схем разработчикам СТДМ ЖАТ следовало бы обратить внимание на теорию синтеза систем диагностирования [52–55] и методов функционального контроля логических устройств автоматики и вычислительной техники [56–64]. Применение теоретических подходов на практике позволит организовать систему более эффективно, а контроль технического состояния – обеспечить оптимальным образом с точностью до необходимого блока или узла. Сегодня аппаратные узлы средств диагностирования практически не имеют узлов самодиагностирования. Задачу их разработки можно было бы решать с применением известных подходов к организации функционального контроля и тестирования логических схем.

Для мониторинга напольного технологического оборудования и кабельной сети ЖАТ следует проработать диагностические модели со всеми особенностями входящих в них устройств и после результатов моделирования выработать рекомендации, какие именно параметры следует контролировать. Это весьма актуально, поскольку на напольное оборудование и кабельную сеть ЖАТ приходится свыше 75 % отказов. Некоторые технические решения по диагностированию средств автоматического управления железнодорожных стрелок могут оказаться в будущем достаточно перспективными, например, подход, описанный в [65]. Авторы представляют к разработке измерительный контроллер, устанавливаемый в корпус стрелочного электропривода, способный по линии обогрева

передавать данные на пост электрической централизации, к контролируемым параметрам в этом случае относятся практически все места соединения проводов в приводе. Подобные устройства могут применяться и для других напольных технологических объектов ЖАТ. В перспективе передача данных может быть осуществлена по спутниковой связи.

Не контролируются сегодня проявления и другой немаловажной составляющей функционирования датчиков контроля подвижных единиц (рельсовых цепей) на линиях с электротягой – асимметрия тягового тока [66–68]. Асимметрия является причиной сбоев в работе бортового оборудования локомотивов и негативно влияет на перевозочный процесс. Например, в СТДМ ЖАТ не используются известные подходы к измерению коэффициентов асимметрии для железных дорог с электротягой переменного тока [69].

Для получения диагностической информации не следует ограничиваться только контроллерами, датчики которых позволяют получить электрические параметры устройств ЖАТ (напряжения, токи, сопротивления и т. д.). В ЖАТ и смежных хозяйствах достаточно много элементов, для которых важны и другие физические величины (например, межконтактные расстояния в автопереключателе стрелочного электропривода или расстояния между подвижными и неподвижными элементами железнодорожной стрелки). Техническое состояние можно оценивать по температуре, акустическому сигналу, для контроля расстояний возможно применение ультразвуковых датчиков [70]. Таким образом, современные СТДМ используют довольно скудный набор физических параметров для постановки диагноза и прогноза. В перспективе перечень контролируемых параметров может быть расширен.

Сегодня возникает и другая немаловажная задача (она в некотором роде идет вразрез с необходимостью развития методов контроля устройств ЖАТ) – минимизация аппаратно-программных средств технического диагностирования. Некоторые попытки ее решения, связанные с мультиплексированием измерительных каналов, описаны в [71]. При использовании данного подхода уместно говорить также о надежности коммутирующего оборудования и его стоимости. Данная проблема также актуальна, так как стоимость контрольного оборудования должна быть значительно меньше стоимости самой системы управления движением поездов. В противном случае невозможно говорить об эффективности системы диагностирования и мониторинга.

Решение обозначенной выше задачи связано с выбором периода диагностирования устройств ЖАТ, который должен определяться не интуитивно, как для некоторых измерительных контроллеров, а с учетом особенностей самих устройств ЖАТ и задач диагностики. Один из подходов к выбору периода диагностирования в микроэлектронных и микропроцессорных системах ЖАТ описан в [72].

Нельзя оставлять без внимания и совершенствование трактов передачи данных – переход от передачи диагностической информации по кабелям ЖАТ и ви-

тым парам к оптоволоконной, радио- и спутниковой связи. Последнее было бы максимально удобно при передаче данных с перегонного напольного оборудования СЦБ (светофоры, сигнальные точки светофоров при релейных АБ, путевые коробки и ящики устройств СЦБ и т. д.).

Кроме того, нельзя обойти вниманием проблему проектирования и внедрения СТДМ ЖАТ. Сам этот процесс достаточно трудоемок и требует реализации целого ряда шагов:

– составления технического задания, где указываются все требования к СТДМ ЖАТ;

– выбора контрольных точек в схемных решениях ЖАТ;

– выбора видов измерительных контроллеров и их монтаж в схемные узлы;

– настройки программного обеспечения первичной обработки диагностической информации измерительными контроллерами;

– разработки «программной оболочки» для вывода результатов мониторинга (технологические окна АРМ с привязками номеров контроллеров и их датчиков к конкретным диагностическим параметрам);

– тестирования программного обеспечения.

В современных СТДМ ЖАТ практически не автоматизирован процесс проектирования и не используются средства CAD (computer-aided design), хотя разработка технологических окон для АРМ технолога и присвоение объектам, расположенным в них, номеров измерительных контроллеров и датчиков могут осуществляться автоматически. Вполне реально, что в будущем, исходя из требований заказчика, по схематическому плану станции и принципиальным схемным решениям ЖАТ будет предоставляться полный «пакет» документов проектировщика СТДМ. В области ЖАТ так, например, реализуют АРМ проектировщиков систем управления движением поездов на станции и перегоне [73].

Немаловажным в развитии СТДМ ЖАТ является использование в работе web-приложений. До сих пор все АРМ СТДМ ЖАТ являются стационарными и неудобными в использовании, так как требуют присутствия единственного пользователя персонального компьютера и навыков работы с программными средствами систем мониторинга. Более перспективным является использование web-интерфейса СТДМ ЖАТ и мобильных приложений АРМ мониторинга. Идеи о создании подобного приложения высказывались давно, однако один из первых эффективно функционирующих web-интерфейсов был реализован только в начале 2014 г. (подробно описан в [74, 75]). АРМ мониторинга в виде приложения легко устанавливается на любое портативное устройство, будь то смартфон, планшет или ноутбук. Благодаря возможности установки ретрансляторов можно использовать портативное устройство с открытым на нем web-интерфейсом системы диагностирования в любом месте станции. В этом случае пользователь получает громадные преимущества: мобильность позволяет иметь доступ к результатам мониторинга непосредственно с рабочего места (из релейного помещения или напольного объекта СЦБ); облегчается поиск неис-

правностей; становится возможным коллективное использование программы мониторинга. Все это не требует больших капиталовложений. Следует отметить, что идея web-интерфейса была также использована разработчиками системы СТД-МПК [76].

В будущем возможно налаживание SMS-информирования пользователя СТДМ ЖАТ о возникающих неисправностях в процессе их функционирования. Конечно, это произойдет только при совершенствовании методов технического диагностирования и мониторинга с минимизацией вероятности постановки неверного диагноза и прогноза. Тем не менее современные СТДМ ЖАТ от этого только выиграли бы, поскольку информация о наиболее важных событиях в работе устройств СЦБ была бы своевременной, а значит, технический персонал имел бы достаточное время на принятие мер по обеспечению отказоустойчивости систем управления движением поездов.

К середине второго десятилетия XXI в. СТДМ ЖАТ покрыто свыше 10% железных дорог Российской Федерации, установлено большое количество измерительных контроллеров, концентраторов информации, программного обеспечения, созданы целые бригады обслуживания самих систем контроля и т. д. СТДМ образовали новый класс устройств ЖАТ. В их работу вовлечено огромное количество технического персонала дистанций СЦБ и ситуационных центров, что, конечно же, является недостатком. В противном случае, сотрудники дистанций СЦБ и ситуационных центров будут следить за самими «системами слежения», а не за устройствами, реализующими безопасный перевозочный процесс.

Заключение

Интеллектуализация железнодорожного транспорта повлекла за собой создание таких важных средств поддержания отказоустойчивости устройств управления движением поездов, как системы их функционального контроля и мониторинга. Они известны с 1949 г. и в усовершенствованном виде существуют по сей день. Их диапазон контроля за более чем полувековую историю от узкого набора дискретных параметров СТДМ ЖАТ расширился до огромного количества диагностических параметров. Сегодня СТДМ представляют собой отдельный класс средств автоматики, пользователями которых являются как электромеханики, диспетчеры дистанций СЦБ и технологи ситуационных центров, так и сотрудники руководящих звеньев. Для работы с СТДМ ЖАТ создаются целые бригады технического персонала, которые обслуживают их наравне с системами ЖАТ, обеспечивающими реализацию перевозочного процесса.

СТДМ ЖАТ удобны в эксплуатации и несомненно приносят ощутимый эффект, позволяя «следить» за развивающимися неисправностями в системах управления движением поездов. Однако современные СТДМ ЖАТ довольно

далеки от по-настоящему грамотно выстроенных систем функционального контроля и мониторинга. Хорошую перспективу имеют такие направления, как минимизация аппаратурной избыточности по сравнению с действующими системами ЖАТ, повышение надежности оборудования и самого процесса мониторинга, использование измерительных контроллеров, работающих с неэлектрическими параметрами. Отдельно следует отметить необходимость проработки теоретической базы создания СТДМ ЖАТ.

Для современных систем управления движением поездов на микроэлектронной и микропроцессорной основе следует предусматривать расширенный уровень самодиагностирования (как в напольном технологическом оборудовании, так и в постовых устройствах). Информацию о ключевых характеристиках системы ЖАТ следует передавать в дистанции СЦБ и ситуационные центры. Это позволит не только минимизировать затраты на строительство и эксплуатацию СТДМ ЖАТ, но и интегрировать диагностические комплексы в сами системы управления (по аналогии с системами SCADA). Не исключено, что в будущем СТДМ ЖАТ будут в числе звеньев в процессе адаптивного управления движением поездов на железных дорогах Российской Федерации.

Библиографический список

1. Сапожников Вал. В. Самопроверяемые дискретные устройства / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
2. Гавзов Д. В. Методы обеспечения безопасности дискретных систем / Д. В. Гавзов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 8. – С. 3–50.
3. Сапожников Вал. В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов, Д. В. Гавзов. – М. : Транспорт, 1995. – 272 с.
4. Федорчук А. Е. Новые информационные технологии : автоматизация технического диагностирования и мониторинга устройств ЖАТ (система АДК-СЦБ) : учебник для вузов ж.-д. транспорта / А. Е. Федорчук, А. А. Сепетый, В. Н. Иванченко. – Ростов н/Д : РГУПС, 2008. – 444 с.
5. Молодцов В. П. Системы диспетчерского контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. пособие / В. П. Молодцов, А. А. Иванов. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2010. – 140 с.
6. Ефанов Д. В. Основы построения и принципы функционирования систем технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. пособие / Д. В. Ефанов, А. А. Лыков. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2012. – 59 с.
7. Брейдо А. И. Организация обслуживания железнодорожных устройств автоматики и связи / А. И. Брейдо, В. А. Овсянников. – М. : Транспорт, 1983. – 209 с.
8. Техническая эксплуатация устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики : учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / Вл. В. Сапожников,

Л. И. Борисенко, А. А. Прокофьев, А. И. Каменев ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М.: Маршрут, 2003. – 336 с.
9. Шаманов В. И. Совершенствование системы технического обслуживания устройств автоматики / В. И. Шаманов, А. В. Пультяков // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – № 12. – С. 13–16.
10. Шабалин А. Н. Новая технология обслуживания устройств СЦБ / А. Н. Шабалин // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 12. – С. 23–24.
11. Абрамов О. В. Мониторинг и прогнозирование технического состояния систем ответственного назначения / О. В. Абрамов // Информатика и системы управления. – 2011. – № 2. – С. 4–15.
12. Вотолевский А. Л. АСУ и технологии обслуживания устройств ЖАТ / А. Л. Вотолевский // Автоматика, связь, информатика. – 2011. – № 10. – С. 36–42.
13. Вотолевский А. Л. Внедрение автоматизированной технологии обслуживания устройств ЖАТ / А. Л. Вотолевский, Е. М. Шандин // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 2. – С. 8–11.
14. Вотолевский А. Л. Проектирование дорожных центров мониторинга устройств ЖАТ / А. Л. Вотолевский // Автоматика, связь, информатика – 2012. – № 6. – С. 10–11.
15. 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.
16. Сороко В. И. Автоматика, телемеханика, связь и вычислительная техника на железных дорогах России : энциклопедия : в 2 т. Т. 1 / В. И. Сороко, В. М. Кайнов, Г. Д. Казиев ; под ред. В. И. Сороко. – М. : НПФ «Планета», 2006. – 736 с.
17. Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения в XX – начале XIX в. / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников [и др.]. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2009. – 346 с.
18. Гаскаров Д. В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры / Д. В. Гаскаров, Т. А. Голинкевич, А. В. Мозгалевский ; под ред. Т. А. Голинкевича. – М. : Советское радио, 1974. – 224 с.
19. Аверкиев С. А. АСДК : Развитие и совершенствование системы / С. А. Аверкиев, С. С. Морозов // Автоматика, связь, информатика. – 2003. – № 7. – С. 35–36.
20. Ребенок Г. В. Диагностическая аппаратура АСДК / Г. В. Ребенок // Автоматика, связь, информатика. – 2011. – № 5. – С. 34–35.
21. Сепетый А. А. Диагностика и мониторинг на Северо-Кавказской дороге / А. А. Сепетый // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – № 6. – С. 6–9.
22. Сепетый А. А. Интегрированная система технического диагностирования и мониторинга линейных устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / А. А. Сепетый, А. Е. Федорчук // Информатизация и связь. – 2013. – № 2. – С. 80–86.
23. Сепетый А. А. Мониторинг объектов инфраструктуры в СТДМ АДК-СЦБ / А. А. Сепетый, И. А. Фарапонов, А. А. Карпов // Автоматика, связь, информатика. – 2014. – № 12. – С. 33–35.

24. Нестеров В. В. Развитие систем СТДМ, АСУ-Ш-2 и АОС-ШЧ / В. В. Нестеров // Автоматика, связь, информатика. – 2012. – № 12. – С. 45–46.
25. Шабалин А. Н. Центр технической диагностики и мониторинга на Октябрьской дороге / А. Н. Шабалин, Г. Ф. Насонов, П. А. Капуста // Автоматика, связь, информатика. – 2007. – № 5. – С. 23–25.
26. Москвина Е. А. Диагностика и мониторинг на Октябрьской дороге / Е. А. Москвина // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – № 1. – С. 32–34.
27. Нестеров В. В. Центр диагностики и мониторинга устройств ЖАТ / В. В. Нестеров, Д. С. Першин // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 1. – С. 29–31.
28. Шабалин А. Н. Результаты использования и перспективы развития передовых технологий обслуживания устройств ЖАТ / А. Н. Шабалин // Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте : сб. докладов Пятой Международной научно-практической конференции «ТрансЖАТ-2010». – Ростов н/Д, 2010. – С. 81–89.
29. Чухонин В. М. Измерение фазовых соотношений в стрелочных электроприводах с двигателями переменного тока / В. М. Чухонин, Б. Л. Горбунов // Разработка и эксплуатация новых устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. под ред. Вл. В. Сапожникова. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2004. – С. 21–24.
30. Измерение тока в путевых приемниках рельсовых цепей / В. М. Чухонин, Б. Л. Горбунов, А. К. Легоньков, А. С. Падалко // Автоматика и телемеханика железных дорог России. Техника, технология, сертификация : сб. науч. тр. под ред. Вл. В. Сапожникова. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2008. – С. 37–40.
31. Горишний Д. В. Алгоритм выявления зависимостей между сбоями устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Горишний, Э. А. Мамаев // Наука и техника транспорта. – 2010. – № 2. – С. 57–65.
32. Ефанов Д. В. Метод кодирования состояний диагностируемых объектов / Д. В. Ефанов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – № 2. – С. 74–85.
33. Бушуев С. В. Исследование точности измерений среднеквадратических значений электрических сигналов на ограниченных интервалах времени / С. В. Бушуев, А. Н. Попов // Транспорт Урала. – 2011. – № 2. – С. 46–50.
34. Ефанов Д. В. Автоматизация контроля на стрелках / Д. В. Ефанов, Н. А. Богданов // Мир транспорта. – 2011. – № 2. – С. 54–59.
35. Годяев А. И. Система автоматизированного мониторинга параметров физических величин, оказывающих непосредственное влияние на функционирование систем обеспечения безопасности движения / А. И. Годяев, А. А. Онищенко // Вестник транспорта Поволжья. – 2012. – № 2. – С. 29–34.
36. Ефанов Д. В. Мониторинг параметров рельсовых цепей тональной частоты / Д. В. Ефанов, Н. А. Богданов // Транспорт Урала. – 2013. – № 1. – С. 36–42.
37. Волков А. А. Выявление предотказов стрелочных электроприводов / А. А. Волков, Д. С. Першин, С. Н. Григорьев // Автоматика, связь, информатика – 2014. – № 4. – С. 16–18.
38. Ефанов Д. В. Метод автоматизации проверки логики функционирования объектов диагностирования в системах удаленного контроля и мониторинга / Д. В. Ефанов // Транспорт Урала. – 2014. – № 3. – С. 58–62.

39. Чухонин В. М. Нормирование активной мощности двигателей переменного тока при переводе стрелки / В. М. Чухонин, Б. Л. Горбунов, Е. В. Басалаев // Развитие элементной базы и совершенствование методов построения устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. под ред. Вл. В. Сапожникова. – СПб. : ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2014. – С. 23–25.
40. Ефанов Д. В. Некоторые аспекты развития систем функционального контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Ефанов // Транспорт Урала. – 2015. – № 1. – С. 35–40.
41. Иванов А. А. Новые приборы регистрации параметров устройств железнодорожной автоматики в системе АПК-ДК (СТДМ) / А. А. Иванов, К. А. Легоньков, В. П. Молодцов // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. – № 3. – С. 282–297.
42. Москвина Е. А. Опыт организации ЦУСИ / Е. А. Москвина // Автоматика, связь, информатика. – 2013. – № 9. – С. 22–25.
43. Шелухин В. И. Автоматизация и механизация сортировочных горок : учебник для техникумов и колледжей ж.-д. транспорта / В. И. Шелухин. – М. : Маршрут, 2005. – 240 с.
44. Сачко В. И. Подсистема технического обслуживания и ремонта СЖАТ на автоматизированных сортировочных горках / В. И. Сачко, А. В. Мельников // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – № 11. – С. 11–13.
45. Басалаев Е. Контроль параметров устройств автоматики в Петербургском метрополитене / Е. Басалаев, Б. Горбунов, Д. Ефанов // Control Engineering Россия. – 2014. – № 2 (50). – С. 54–57.
46. Ефанов Д. В. Техническое диагностирование и мониторинг устройств автоматики в метрополитенах / Д. В. Ефанов // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 3. – С. 4–8.
47. Ефанов Д. В. Обеспечение безопасности движения за счет технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Ефанов, П. А. Плеханов // Транспорт Урала. – 2011. – № 3. – С. 44–48.
48. 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.
49. Беннетс Р. Дж. Проектирование тестопригодных логических схем / Р. Дж. Беннетс. – М. : Радио и связь, 1990. – 176 с.
50. Ефанов Д. В. К вопросу о тестируемости релейно-контактных схем железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Ефанов // Интеллектуальные системы на транспорте : сб. материалов V МНПК «ИнтеллектТранс-2015» ; под ред. д-ра техн. наук, проф. А. А. Корниенко. – СПб. : ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. – С. 89–95.
51. Ланцов В. Н. Современные подходы к проектированию и тестированию интегральных микросхем / В. Н. Ланцов, С. Г. Мосин. – Владимир : Изд-во Владимирского гос. ун-та, 2010. – 285 с.
52. Пархоменко П. П. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомонян. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 320 с.

53. Мозгалевский А. В. Вопросы проектирования систем диагностирования / А. В. Мозгалевский, А. Н. Койда. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. – 112 с.
54. Согомонян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян, Е. В. Слабаков. – М. : Радио и связь, 1989. – 207 с.
55. Сапожников Вал. В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов, Д. В. Гавзов. – М. : Транспорт, 1995. – 272 с.
56. Сапожников Вал. В. Самопроверяемые дискретные устройства / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
57. Сапожников Вал. В. Самодвойственные дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, М. Гессель. – СПб. : Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отд-ние, 2001. – 331 с.
58. Сапожников Вал. В. Синтез самодвойственных дискретных систем / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Р. Ш. Валиев. – СПб. : Элмор, 2006. – 224 с.
59. Гессель М. Исследование комбинационных самопроверяемых устройств с независимыми и монотонно независимыми выходами / М. Гессель, А. В. Морозов, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 1997. – № 2. – С. 180–193.
60. 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.
61. 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.
62. 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.
63. 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.
64. Сапожников Вал. В. Обнаружение опасных ошибок на рабочих выходах комбинационных логических схем / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 2. – № 1. – С. 195–211.
65. Ефанов Д. В. Контроль параметров стрелочных электроприводов / Д. В. Ефанов, Н. А. Богданов // Проблемы безопасности и надежности микропроцессорных комплексов : сб. тр. научно-практ. конференции под ред. Вал. В. Сапожникова. – СПб. : ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. – С. 118–128.
66. Шаманов В. И. Электромагнитная совместимость систем железнодорожной автоматики и телемеханики / В. И. Шаманов. – М. : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. – 244 с.
67. Шаманов В. И. Процесс формирования асимметрии тягового тока в рельсовой линии / В. И. Шаманов // Электротехника. – 2014. – № 8. – С. 34–37.

68. Шаманов В. И. Моделирование генерации помех токами рельсовой тяговой сети / В. И. Шаманов // Автоматика, связь, информатика. – 2014. – № 10. – С. 5–9.
69. Пат. RU 2514027. Шаманов В. И., Балуев Н. Н. Способ диагностики состояния электрического сопротивления рельсовых линий в рельсовых цепях на участках с электротягой переменного тока ; опубл. 27.09.2014.
70. Иваникин М. С. Выбор ультразвукового датчика для контроля расстояний между подвижными элементами стрелочного перевода / М. С. Иваникин, Д. В. Ефанов // Проблемы безопасности и надежности микропроцессорных комплексов : сб. тр. научно-практ. конференции под ред. Вал. В. Сапожникова. – СПб. : ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. – С. 150–157.
71. Средства технической диагностики и удаленного мониторинга СТД-МПК / А. Б. Никитин, С. В. Бушуев, К. В. Гундырев, А. В. Алексеев, С. В. Гребель, А. Н. Попов // Автоматика, связь, информатика – 2012. – № 10. – С. 6–8.
72. Сапожников Вал. В. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи : учеб. пособие для вузов ж. д. транспорта / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, В. И. Шаманов ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : Маршрут, 2003. – 263 с.
73. Василенко М. Н., Трохов В. Г., Зуев Д. В., Седых Д. В. Развитие электронного документооборота в хозяйстве АТ // Автоматика связь, информатика. – 2015. – № 1. – С. 14–16.
74. Ефанов Д. В. Интернет-технологии в системах технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики / Д. В. Ефанов, В. В. Дмитриев, В. Г. Алексеев // Инновационный транспорт. – 2014. – № 4. – С. 28–32.
75. Ефанов Д. В. Web-интерфейс для систем мониторинга устройств ЖАТ / Д. В. Ефанов, В. В. Дмитриев, В. Г. Алексеев // Автоматика, связь, информатика – 2015. – № 1. – С. 18–19.
76. Никитин А. Б. Совершенствование диагностики систем ЖАТ / А. Б. Никитин // Автоматика, связь, информатика. – 2015. – № 11. – С. 14–15.

Efanov Dmitry V.
«Automation and remote Control on Railways» department
Petersburg state transport university

Becoming and development prospects of concurrent error detection and monitoring systems of railway automation and remote control devices

Concurrent error detection and monitoring systems allow to increase reliability and safety of railway automation and remote control devices. They passed the way from dispatching systems with limited number of tested digital parameters to hardware-software complexes with automated analysis of diagnostic data and upcoming artificial intelligence. The article is devoted to the problems of becoming, development and prospects for improving of

concurrent error detection and monitoring systems of railway automation and remote control devices. The position of concurrent error detection and monitoring systems among railway automation and remote control systems is determined. The key dates of concurrent error detection and monitoring systems development are stated and information about the most popular systems is specified. The problem of necessity of situation centers creation for the monitoring of technical condition of train traffic control devices is discussed. Plenty detailed considerations about railway automation and remote control concurrent error detection and monitoring systems evolution that contain realities as well as quite perspective technical solutions for the nearest future could be found in the article.

railway automation and remote control; dispatching system; concurrent error detection; monitoring; prognostication; systems of technical diagnostics and monitoring

References

1. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. Self-Checking Discrete Devises. St. Petersburg, Energoatomizdat, 1992, 224 p.

2. Gavzov D. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. Methods of discrete systems safety provision. Automation & Remote Control, 1994, issue 8, pp. 3–50.

3. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Hristov H. A., Gavzov D. V. Methods of safety microelectronic railway automation systems design. Moscow, Transport, 1995, 272 p.

4. Fedorchuk A. E., Sepety A. A., Ivanchenko V. N. New information technologies: automation of automation of technical diagnostics and monitoring of railway automation and remote control devices (system ADK-SCB): Textbook for railway transport high schools. Rostov-on-Don, RSTU, 2008, 444 p.

5. Molodtsov V. P., Ivanov A. A. Dispatching control and railway automation and remote control monitoring systems: manual. St. Petersburg, PGUPS, 2010, 140 p.

6. Efanov D. V., Lykov A. A. Base of formation and principles of functioning of technical diagnostic and monitoring systems of railway automation and remote control devices: textbook. St. Petersburg, Petersburg State Transport University, 2012, 59 p.

7. Brejdo A. I., Ovsyannikov V. A. Organization of railway automation and remote control devices maintenance. Moscow, Transport, 1983, 209 p.

8. Sapozhnikov Vl. V., Borisenko L. I., Prokof'ev A. A., Kamenev A. I. Technical operation of railway automation and remote control devices and systems: tutorial for railway transport high schools; eds. Vl. V. Sapozhnikov. Moscow, Marshrut, 2003, 336 p.

9. Shamanov V. I., Pultyakov A. V. Development of automation devices technical maintenance system. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2008, issue 12, pp. 13–16.

10. Shabalin A. N. New technology of SCB devices maintenance. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2009, issue 12, pp. 23–24.

11. Abramov O. V. Monitoring and technical state prediction for responsible purpose systems. Computer Science & Control Systems, 2011, issue 2, pp. 4–15.

12. Votolevsky A. L. ACS and railway automation and remote control devices maintenance technologies. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2011, issue 10, pp. 36–42.

13. Votolevsky A. L., Shandin E. M. Introduction of automated railway automation and remote control devices maintenance technology. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2009, issue 2, pp. 8–11.

14. Votolevsky A. L. Design of railway automation and remote control devices monitoring railway centers. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2012, issue 6, pp. 10–11.

15. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. Use of codes with summation in the synthesis of railway automation and remote control systems based on field-programmable gate arrays. Automation on Transport, 2015, vol. 1, issue 1, pp. 84–107.

16. Soroko V. I., Kajnov V. M., Kaziev G. D. Automation, remote control, communication and computer technologies on Russian railways: Encyclopedia in 2 vol., vol. 1; eds. V. I. Soroko. Moscow, NPF «Planeta», 2006, 736 p.

17. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. «Automation & Remote Control on railways» department of Petersburg state transport university in XX – beginning of XXI century. St. Petersburg, PSTU, 2009, 346 p.

18. Gaskarov D. V., Golinkevich T. A., Mozgalevskii` A. V. Prognostication of technical state and reliability of radio-electronic devices; ed. by T. A. Golinkevich. Moscow, Sovetskoe radio, 1974, 224 p.

19. Averkiev S. A., Morozov S. S. ASDK: Development of the system. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2003, issue 7, pp. 35–36.

20. Rebenok G. V. Diagnostic devices ASDK. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2011, issue 5, pp. 34–35.

21. Sepety A. A. Diagnostics and monitoring on the North-Caucasus Railway. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2008, issue 6, pp. 6–9.

22. Sepety A. A., Fedorchuk A. E. Integrated system of technical diagnostics and monitoring of railway automation and remote control field devices. Informatizatciia i sviaz`, 2013, issue 2, pp. 80–86.

23. Sepety A. A., Faraponov I. A., Karpov A. A. Monitoring of infrastructure objects in STDM ADK-SCB. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2014, issue 12, pp. 33–35.

24. Nesterov V. V. Development of systems STDM, ASU-Sh-2 and AOS-ShCh. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2012, issue 12, pp. 45–46.

25. Shabalin A. N., Nasonov G. F., Kapusta P. A. Center of technical diagnostics and monitoring on October Railway. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2007, issue 5, pp. 23–25.

26. Moskvina E. A. Diagnostics and monitoring on October Railway. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2008, issue 1, pp. 32–34.

27. Nesterov V. V., Pershin D. S. Center of railway automation and remote control devices diagnostics and monitoring. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2009, issue 1, pp. 29–31.

28. Shabalin A. N. Results of use and development perspectives of advanced technologies railway automation and remote control devices maintenance. Automation & Remote Control on railway transport. Proceedings of Fifth international scientific and practical conference «Trans ZHAT – 2010», Rostov-on-Don, 2010, pp. 81–89.

29. Chukhonin V. M., Gorbunov B. L. Measurement of phase shifts in point machines with AC motors. Development and operation of new railway automation and remote control

devices and systems. Collection of scientific papers edited by Vl. V. Sapozhnikov. St. Petersburg, PSTU, 2004, pp. 21–24.

30. Chukhonin V. M., Gorbunov B. L., Legon`kov A. K., Padalko A. S. Measurement of current in track circuit receivers. Automation & Remote Control on Russian railways. Technique, technology, sertification. Collection of scientific papers edited by Vl. V. Sapozhnikov. St. Petersburg, PSTU, 2008, pp. 37–40.

31. Gorishny D. V., Mamaev E. A. Algorithm of dependencies between railway automation and remote control devices faults identification. Science and technique of transport, 2010, issue 2, pp. 57–65.

32. Efanov D. V. Method of diagnostic objects states coding. Proceedings of Petersburg Transport University, 2010, issue 2, pp. 74–85.

33. Busuev S. V., Popov A. N. Research of electric signals root mean square values measurement accuracy on limited time periods. Transport of the Urals, 2011, issue 2, pp. 46–50.

34. Efanov D. V., Bogdanov N. A. Automation of switch points test. Transport world, 2011, issue 2, pp. 54–59.

35. Godyaev A. I., Onischenko A. A. System of automated monitoring of physical parameters that have direct influence on train traffic safety provision systems functioning. Povolzhie transport herald, 2012, issue 2, pp. 29–34.

36. Efanov D. V., Bogdanov N. A. Monitoring of voice frequency track circuits parameters. Transport of the Urals, 2013, issue 1, pp. 36–42.

37. Volkov A. A., Pershin D. S., Grigorjev S. N. Detection of point machines prefaults. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2014, issue 4, pp. 16–18.

38. Efanov D. V. Method of automation of diagnostic objects functioning logic check in remote monitoring systems. Transport of the Urals, 2014, issue 3, pp. 58–62.

39. Chukhonin V. M., Gorbunov B. L., Basalaev E. V. Measurement of active power of AC motors during switch operation. Development of component base and design methods of railway automation and remote control devices: Collection of scientific papers edited by Vl. V. Sapozhnikov. St. Petersburg, PSTU, 2014, pp. 23–25.

40. Efanov D. V. Some aspects of railway automation and remote control devices concurrent error detection systems development. Transport of the Urals, 2015, issue 1, pp. 35–40.

41. Ivanov A. A., Legon'kov A. K., Molodtsov V. P. New devices for registration of parameters of railway automation hardware within APK-DK (STDM) system. Automatyon on Transport, 2015, vol. 1, issue 3, pp. 282–297.

42. Moskvina E. A. Experience of CUSI organization. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2013, issue 9, pp. 22–25.

43. Shelukhin V. I. Automation and mechanization of humps: textbook for railway transport colleges. Moscow, Marshrut, 2005, 240 p.

44. Sachko V. I., Mel`nikov A. V. Subsystem of maintenance and repairs of railway automation and remote control systems on automated humps. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2008, issue 11, pp. 11–13.

45. Basalaev E., Gorbunov B., Efanov D. Check of Petersburg Subway automation devices parameters. Control Engineering Russia, 2014, issue 2 (50), pp. 54–57.

46. Efanov D. V. Technical diagnostics and monitoring of subway automation devices. Industrial automation, 2014, issue 3, pp. 4–8.

47. Efanov D. V., Plehanov P. A. Increase of railway traffic reliability and safety at the expense of technical diagnosing systems and monitoring of railway signaling and interlocking devices. Transport of the Urals, 2011, issue 3, pp. 44–48.

48. Lykov A. A., Efanov D. V., Vlasenko S. V. Technical diagnostics and monitoring of railway automation and remote control devices state. Transport of the Russian Federation, 2012, issue 5, pp. 67–72.

49. Bennets R. D. Design of testable logic circuits. Moscow, Radio & Svayz`, 1990, 176 p.

50. Efanov D. V. On the problem of testability of railway automation and remote control relay-contact circuits. Intelligence systems on transport: Proceedings of V international scientific and practical conference «IntellektTrans – 2015»; eds. A. A. Kornienko. St. Petersburg, PSTU, 2015, pp. 89–95.

51. Lantsov V. N., Mosin S. G. Modern approach to the design and test of integrated circuits. Vladimir, Vladimir State University, 2010, 285 p.

52. Parkhomenko P. P., Sogomonyan E. S. Base of technical diagnostics (optimization of diagnostic algorithms, hardware means). Moscow, Energoatomizdat, 1981, 320 p.

53. Mozgalevsy A. V., Kojda A. N. Problems of diagnostic systems design. Leningrad, Energoatomizdat (Leningrad department), 1985, 112 p.

54. Sogomonyan E. S., Slabakov E. V. Self-Checking Devices and Fault-Tolerant Systems. Moscow, Radio & Svayz`, 1989, 207 p.

55. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Hristov H. A., Gavzov D. V. Methods of safety microelectronic railway automation systems design. Moscow, Transport, 1995, 272 p.

56. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. Self-checking discrete devices. St. Petersburg, Energoatomizdat, 1992, 224 p.

57. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Goessel M. Self-dual discrete devices. St. Petersburg, Energoatomizdat (St. Petersburg department), 2001, 331 p.

58. Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V., Valiev R. Sh. Synthesis of self-dual discrete systems. St. Petersburg, Elmor, 2006, 224 p.

59. Goessel M., Morozov A. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. Research of combinational self-checking devices with independent and monotonically independent outputs. Automation & Remote Control, 1997, issue 2, pp. 180–193.

60. Goessel M., Morozov A. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. Boolean complement – new method of combinational circuit test. Automation & Remote Control, 2003, issue 1, pp. 167–176.

61. Goessel M., Morozov A. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov Vl. V. Test of combinational circuits by Boolean complement. Automation & Remote Control, 2005, issue 8, pp. 161–172.

62. Mekhov V.B., Sapozhnikov Val.V., Sapozhnikov Vl.V. Test of combinational circuits based on modified codes with summation. Automation & Remote Control, 2008, issue 8, pp. 153–165.

63. Blyudov A.A., Efanov D.V., Sapozhnikov Val.V., Sapozhnikov Vl.V. On Codes with Summation of Unit Bits In Concurrent Error Detection Systems. Automation & Remote Control, 2014, issue 8, pp. 131–145.

64. Sapozhnikov Val.V., Sapozhnikov Vl.V., Efanov D.V. Application of codes with summation for the synthesis of railway automation and remote control systems based on field-programmable gate arrays. Automation on Transport, 2015, vol. 1, issue 1, pp. 84–107.

65. Efanov D.V., Bogdanov N.A. Check of point machines parameters. Proceedings of scientific and practical conference «Problems of microcomputer complexes safety and reliability»; eds. Val.V. Sapozhnikov. St. Petersburg, PSTU, 2015, pp. 118–128.

66. Shamanov V.I. Electromagnetic compatibility of railway automation and remote control systems. Moscow, FSBEI «Study and methodical railway transport education center», 2013, 244 p.

67. Shamanov V.I. Process of traction current asymmetry formation in rail line. Elektrotekhnika, 2014, issue 8, pp. 34–37.

68. Shamanov V.I. Simulation of interference generation by track circuit currents. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2014, issue 10, pp. 5–9.

69. Shamanov V.I., Baluev N.N. Way of track circuit electric resistance diagnostics on AC current tracks. – Patent RU 2514027, 27.09.2014.

70. Ivanikin M.S., Efanov D.V. Selection of ultrasonic transducer for checking of distance between moving elements of points. Proceedings of scientific and practical conference «Problems of microcomputer complexes safety and reliability»; eds. Val.V. Sapozhnikov. St. Petersburg, PSTU, 2015, pp. 150–157.

71. Nikitin A.B., Bushuev S.V., Gundyrev K.V., Alexeev A.V., Grebel` S.V., Popov A.N. Means of technical diagnostics and remote monitoring STD-MPK. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2012, issue 10, pp. 6–8.

72. Sapozhnikov Val.V., Sapozhnikov Vl.V., Shamanov V.I. Reliability of railway automation, remote control and communication systems: tutorial for railway transport high schools; eds. Vl.V. Sapozhnikov. Moscow, Marshrut, 2003, 263 p.

73. Vasilenko M.N., Trokhov V.G., Zuev D.V., Sedykh D.V. Development of electronic document management in automation and remote control. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2015, issue 1, pp. 14–16.

74. Efanov D.V., Dmitriev V.V., Alexeev V.G. Internet technologies in technical diagnostics and monitoring systems of railway automation devices. Innovative transport, 2014, issue 4, pp. 28–32.

75. Efanov D.V., Dmitriev V.V., Alexeev V.G. Web-interface for railway automation and remote control systems monitoring. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2015, issue 1, pp. 18–19.

76. Nikitin A.B. Development of railway automation and remote control systems diagnostics. Avtomatika, svyaz`, informatica, 2015, issue 11, pp. 14–15.

Статья представлена к публикации членом редколлегии С. А. Никищенковым
Поступила в редакцию 09.10.2015, принята к публикации 11.12.2015

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., 2016

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 ПРОМЫШЛЕННОГО КАПИТАЛИЗМА (1861–1900 гг.). ЧАСТЬ 3: РЕГУЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ НА ПЕРЕГОНАХ

Данная работа содержит материалы второго 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». Освещаются особенности регулирования движения поездов на перегонах в рассматриваемый период.

движение поездов; перегон; семафор; электрозадерживающий механизм; электромагнитный телеграф; автоматическая блокировка; электрожезловая система

До 1883 г. движение поездов в России регулировалось согласно «Правилам движения по железным дорогам» 1874 г., посредством расписания и телеграфных сношений (§ 43). При перерыве действия телеграфа на однопутных линиях переходили на письменные сношения, а на двухпутных линиях движение поездов переводилось на расписание с разграничением поездов по времени.

Для установления связи поезда, остановившегося в пути, со станцией поезда снабжались переносными телеграфными аппаратами.

Однако уже в 1868–1869 гг. по инициативе инженера В. М. Верховского появляется первая перегонная блокировка на участке Петербург – Ораниенбаум.

Это была независимая неавтоматическая блокировка, блокировочные приборы которой имели чисто известительный характер и не были связаны с семафорами. Блок-аппарат представлял собой небольшой шкафчик, на передней стенке которого помещались небольшой семафор с красным и белым крыльями и три кнопки: звонковая, красная и белая. При отправлении поезда по открытии выходного семафора (называвшегося тогда «индикатором») со станции отправления посылался условный звонковый сигнал на следующую станцию. На станции приема по получении звонка начальником станции нажималась красная кнопка, в результате чего на этой станции в блок-аппарате поднималось белое крылышко, а на станции отправления – красное крылышко. По прибытии по-

езда на станции приема нажималась белая кнопка и крылья семафоров вновь опускались.

В аппарате применялись поляризованные электромагниты, источником тока служили первичные элементы.

Несмотря на примитивность и несовершенство данной системы, она существовала на дороге свыше 30 лет.

В 1878 г. по инициативе [директора Николаевской железной дороги и известного инженера] И. Ф. Кенига была построена блокировка на Петербурго-Московской железной дороге. Эта блокировка действовала посредством нормально открытых электросемафоров. Каждый электросемафор имел верхнее сигнальное крыло красного цвета и нижнее второе серое крыло, не имевшее сигнального значения. Внизу на мачте находились два прибора с рукоятками: «К» – для управления верхним красным крылом и «С» – для управления нижним серым крылом. Нормально оба крыла находились в наклонном положении. Такое положение для красного верхнего крыла являлось естественным, а для нижнего серого принудительным, в нем оно удерживалось электрозадерживающим механизмом.

Для верхнего красного крыла также имелся электрозадерживающий механизм, приспособленный для удержания крыла в горизонтальном положении.

При проходе поезда мимо поста сигналист, поворачивая рукоятку «К», закрывал свой семафор, переводя красное крыло в горизонтальное положение. При этом в линию посылался постоянный электрический ток, воздействовавший на электромагнит задерживающего механизма серого крыла следующего по ходу поезда семафора.

По приходе поезда к следующему посту его сигналист, поворачивая рукоятку «С», ставил серое крыло своего семафора в наклонное положение и одновременно посылал ток в электромагнит задерживающего механизм красного крыла предыдущего семафора, благодаря чему последний открывался.

Отсутствие контроля прибытия поезда позволяло при этой системе дать команду о преждевременном прибытии. Повреждение тяги, идущей к красному крылу, оставляло семафор в открытом положении.

Вместе с тем указанная система, благодаря принципу нормально открытых перегонов, позволяла быстро пропускать поезда. По данным инж. В. Х. Протасевича, под руководством которого производилась эксплуатация блокировки, введение последней повлекло значительное уменьшение опозданий поездов.

Блокировка с электросемафорами была известна как система Лартига. При освоении этой системы русскими железнодорожниками в нее было внесено много улучшений и изменений с целью приспособления ее к местным суровым климатическим условиям. По предложению В. Х. Протасевича управление семафорами было перенесено в помещения.

Увеличение густоты движения поездов требовало введения более совершенных систем регулирования движения поездов, чем способ телеграфных сношений.

Передовые русские железнодорожники настойчиво указывали на необходимость введения блокировки. Так, инженер М. В. Рутковский в 1877 г. писал: «В технической эксплуатации дорог первенствующее значение имеют рациональное устройство товарных станций, от которого зависит быстрота грузового движения, а также сигналы и системы регулирования движения поездов, обусловливающие своим существованием как безопасность самого движения, так и перевозочную способность железных дорог».

В 1878 г. В. М. Верховским была выпущена брошюра: «О наибольшем числе поездов, которое может быть пропускаемо по железным дорогам и о значении, какое в этом отношении имеет усовершенствованная сигнализация».

В. М. Верховский был известным железнодорожным инженером. По окончании в 1858 г. физико-математического факультета Московского университета он поступил в Институт инженеров путей сообщения, который и закончил в 1860 г. Верховский работал сначала в Главном обществе российских железных дорог, а с 1884 г. в Министерстве путей сообщения. Кроме упомянутой выше брошюры им в «Журнале Министерства путей сообщения» за 1881 г. помещена статья, где рассмотрено влияние пассажирских поездов на пропускную способность грузовых.

В первом труде Верховского были заложены основы научно-эксплуатационных расчетов пропускной способности железнодорожных линий. Для двухпутных линий при наличии телеграфных сношений Верховский предложил формулу для определения числа поездов. Формула учитывала потери времени на разгон и замедление. Учитывалась также система блокировки с нормально открытыми перегонами.

Расчеты пропускной способности, произведенные Верховским, показывали, что минимальные потери пропускной способности при наличии телеграфа и при длине перегонов 12,5 версты составляют 6 %, а при длине перегонов 6,25 версты – 10 %. Для отнопутных линий, при аналогичных длинах перегонов, потери соответственно 9 и 15 %.

В брошюре проанализировано также применение пакетного графика и подсчитано, что введение сигнального поста увеличивает пропускную способность на 26 % (при двух поездах в пакете).

Верховский вывел как следствие из своих расчетов, что «влияние способа сигнализации на число поездов возрастает по мере уменьшения длины перегонов». На основе теоретических расчетов В. М. Верховский составил и привел в конце брошюры таблицы пропускной способности для условий того времени. В его работе имелся тот недостаток, что при практических расчетах не учитывалось влияние пассажирских поездов на график. Интересно привести заключительный вывод В. М. Верховского: «Усовершенствованная сигнализация при большом движении на дороге не только составляет существенную необходимость для безопасности, но, содействуя успеху движения, может весьма быстро окупить и расходы, на устройства ее потраченные».

Эту правильную мысль, однако, приходилось неоднократно доказывать и много лет спустя после ее высказывания.

В 1876 г. Николай Дихт предложил «электромагнитный телеграф для контроля движения железнодорожных поездов».

Изобретение Н. Дихта было значительно шире, чем говорит это заглавие. В его предложении заключались и идея автоматической блокировки точечного, или прерывного, действия. Однако сам автор основным в своем изобретении считал осуществление контроля скорости движения поезда.

По заявлению Н. Дихта, «изобретение заключается в совокупности устройств электромагнитного телеграфа с входящим в состав него звонком; прибор этот, устанавливаемый в известных точках пути, приходит в соприкосновение с проходящим мимо него поездом и при этом передает на две промежуточные станции и в промежуточные между ними будки разного рода условные сигналы, по каким можно судить о месте нахождения поезда на линии». Электромагнитные приборы должны были включаться в специальный провод и нормально питаться по замкнутой цепи постоянным током. На каждой версте подвешивался на деревянном столбе контактный прибор с нормально замкнутыми контактами, а на паровозе предвиделась установка специального «прерывателя», сделанного из стального прута. При проходе поездом каждого столба с контактным прибором прерыватель паровоза нажимал цепь, вызывая размыкание контактов прибора вследствие оттяжки вниз контактной пластинки. При этом на обеих станциях, ограничивающих перегон, получалось по одному удару звонков, в приемных аппаратах поворачивались на одно деление стрелки, показывая, какую версту проходит поезд, а на движущейся бумажной ленте отмечался проколом отверстия момент прохождения поезда мимо путевого контакта. Лента приемного аппарата, протягиваемая с постоянной скоростью, была соответственно разграфлена. Поскольку проколы на ленте происходили при проходе поездом каждой версты, то по числу их на ленте можно было определить скорость движения поезда.

Изобретатель предлагал также прибор, печатающий на ленте номера проходимых поездом верст.

В качестве дополнительного прибора для предупреждения случаев сближения поездов, выпущенных один вслед за другим, Н. Дихт предлагал установку через 4–5 верст электроавтоматических семафоров. Семафоры снабжались механизмами, подобными электрозаводным. Нормально механизмы питались током по замкнутой цепи и держали семафор открытым (крыло опущено вниз). При проходе поезда специальный коленчатый рычаг на паровозе воздействовал на передачу к крылу и последнее становилось в горизонтальное положение. При следовании поезда дальше и проходе его мимо верстовых столбов с описанными выше контактными приборами происходило кратковременное размыкание линейной цепи, что вызывало поворот сигнального механизма и опускание крыла на 28°36'. По проходе всех четырех верстовых столбов между семафорами кры-

ло путевого семафора опускалось вертикального вниз, что показывало «второму поезду», что первый поезд уже миновал второй семафор и, следовательно, путь между первым и вторым семафором свободен.

Таким образом, Н. Дихтом были впервые в России предложены автоматическая блокировка точечного действия и поверстный контроль местонахождения поезда.

В 1883 г., как уже отмечалось, были введены новые «Правила движения поездов по железным дорогам». Эти правила учитывали применение блок-системы. Для осуществления блокировки правила предусматривали: а) оптические сигнальные аппараты на постах для сохранения определенного расстояния между поездами, б) соединение сигнальных постов между собой, в) блок-сигналы.

Перегонная блокировка начинает усиленно развиваться на двухпутных дорогах как количественно, так и качественно. Вместо неавтоматической зависимой (связанной лишь с сигналами) блокировки, применявшейся в конце 1870-х гг. на Петербурго-Московской железной дороге, с 1884 г. на юго-западных и других дорогах получают распространение несколько систем полуавтоматической блокировки постоянного тока. С 1892 г. появляется полуавтоматическая блокировка переменного тока с педалями. Ряд заграничных систем путевой полуавтоматической блокировки, применявшихся на некоторых русских железных дорогах, был основан на использовании электросцепляющих механизмов, или механическом запирании рычагов входных семафоров. Все эти системы постоянного тока имели тот недостаток, что их блокмеханизмы могли разблокироваться от короткого импульса тока. Поэтому при случайном сообщении блокировочного провода, например, с телеграфным, или при грозе могло произойти опасное для движения поездов освобождение устройств. Импульсные системы постоянного тока в то время не применялись, почему блокировочные устройства переменного тока имели явные преимущества.

В середине 1890-х гг. русским изобретателем А. И. Джаваховым были предложены сигнальный блок-аппарат и механическая педаль, которые испытывались на Санкт-Петербурго-Варшавской железной дороге. Однако надлежащей помощи изобретателю оказано не было и изобретение дальнейшего применения не получило.

Продолжая дело инженеров Верховского и Рутковского, начатое в упоминавшихся выше работах, в 1893 г. С. Д. Карейша выступает на XI съезде инженеров службы пути с большим докладом на тему «О мерах к увеличению пропускной способности железных дорог вообще и разных системах блокировки пути». В докладе приводилась таблица пропускной способности для того времени всех русских железных дорог; кроме того, подчеркивалось значение блокировки. Основная мысль докладчика сводилась к тому, что «более усовершенствованная сигнализация должна удовлетворять двум требованиям: ускорять сношения между станциями в движении поездов или даже совсем не требо-

вать этих сношений и обеспечивать безопасность движения в большой степени, чем это достигается телеграфными аппаратами». Рассматривая эффективность блокировки для однопутных линий, докладчик высказывал мнение, что целесообразность применения на них блокировки не ясна, что же касается двухпутных дорог, то блокировочные устройства на них безусловно влияют на увеличение пропускной способности. Согласно данным С. Д. Карейши, к 1890 г. блокировка была распространена на 2348 верстах русских железных дороге, т. е. примерно 9 % всех линий было оборудовано блокировкой. По отношению к протяженности двухпутных линий железных дорог, где тогда только и применялась блокировка, ее доля достигала примерно 25 %. Из этих 2348 км независимой неавтоматической блокировкой было оборудовано 37 верст, связанной с сигналами неавтоматической блокировкой – 746 верст и полуавтоматической блокировкой – 1565 верст. Средняя длина блок-участка составляла 6,7 версты. Вопросы влияния блокировки на пропускную способность железных дорог были также освещены инженером В. Х. Протасевичем в ряде статей, помещенных им в 1893 г. в журнале «Железнодорожное дело».

К 1900 г. протяжение линий, оборудованных блокировкой, составляло уже 4788 верст (примерно 9,5 % от общего протяжения сети), средняя длина блок-участка составляла 5,4 версты.

Кроме постоянных блокировочных устройств, на некоторых дорогах во время усиленных грузовых перевозок применялось так называемое «временное блокирование». На перегонах устраивались временные сигнальные посты, соединенные между собой и станциями телеграфной связью. У путей устанавливались красные диски, нормально открытые. По проходе поездом диска последний закрывался. Перед диском на расстоянии 100 сажен (213 м) укладывались петарды и сторожем выставлялся красный флаг. Пост передавал на предыдущий пост или станцию телефонограмму о проследовании поезда, что служило разрешением для открытия диска на предшествующем посту. При перерыве телефонной связи поезда пропускались с разграничением временем (15 мин).

Аппаратура блокировки поставлялась заграничными фирмами, которые препятствовали организации отечественного производства. Русскими техниками было внесено много различных усовершенствований в аппаратуру, причем часто эти усовершенствования патентовались фирмами, переносились в аналогичные зарубежные установки, и приоритет наших изобретателей терялся. При этом устройства автоматической блокировки в те времена в Европе вообще еще не применялись.

Согласно § 130–133 «Правил движения по железным дорогам» 1883 г., порядок движения на однопутных дорогах мог осуществляться, кроме телеграфных сношений: а) одним паровозом, б) посредством поездного проводника, в) посредством поездного жезла. В последнем случае для каждого перегона применялся единственный жезл особого цвета и формы с названием оконченных станций.

Так называемая «смешанная» жезловая система применялась у нас с 1884 г. на Фастовской железной дороге*, а затем на ряде других дорог. При смешанной системе дозволялось в отдельных случаях отправлять поезда «против жезла», с согласия станции приема, что фактически представляло переход на телеграфные сношения. В 1895 г. применение этой системы на русских железных дорогах было запрещено (правительственное распоряжение по министерству путей сообщения № 9, апрель 1895 г.).

Начальник службы телеграфа Закавказской железной дороги Ф. И. Балюкевич предложил еще в начале 1880-х гг. смешанную телефонно-жезловую систему, вызвавшую в свое время большую полемику. Эта система, аналогичная телеграфно-жезловой системе, предполагала наличие одного жезла особой формы для каждого перегона и переход на телеграфные сношения при необходимости отправки поезда «против жезла».

Ф. И. Балюкевич родился в 1842 г. в небогатой семье. В 1867 г. окончил физико-математический факультет Варшавского университета, в 1875 г. институт инженеров путей сообщения. По окончании института работал на постройке, а затем эксплуатации Привислинских железных дорог, где и сделал свое изобретение. С 1883 г. работал начальником службы телеграфа на Закавказских железных дорогах. Умер в 1896 г.

Наиболее существенным в системе Ф. И. Балюкевича, на которую он получил привилегию**, был уже отмеченный выше способ одновременного телеграфирования и телефонирования.

---

* Возникновение и функционирование малоизвестной Фастовской железной дороги связано, в первую очередь, с сахарозаводчиками Бобринскими. Сахар и другая сельскохозяйственная продукция из имения Бобринских на станции погрузки Киево-Брестской и Харьковско-Николаевской железных дорог доставлялась гужевым транспортом. Это значительно затрудняло доставку к потребителю и повышало цену. Министр путей сообщения Российской империи (1869–1871 гг.) генерал-лейтенант граф В. А. Бобринский активно лоббировал перед царем строительство железной дороги по землям своего имения.

В ноябре 1873 г. императором утвержден устав общества Фастовской железной дороги. По утвержденному плану дорога должна соединить небольшой провинциальный городок Фастов Киево-Брестской магистрали и ст. Знаменка Харьковско-Николаевской железной дороги. В состав правления новой дороги вошли Поляков, Варшавский, Губонин и другие известные железнодорожные магнаты.

Граф В. А. Бобринский убедил акционеров общества проложить дорогу вблизи своих сахарных заводов и построить ветку на Черкассы, чтобы иметь выход к речным портам. Так были построены ст. Бобринская, названная в честь графа (теперь имени Тараса Шевченко) и ст. Смела. Движение поездов на участках Фастов – Знаменка и Бобринская – Черкассы было открыто 7 декабря 1876 г. Дорога называлась Фастовской, но управление дороги находилось на станции Бобринская. Здесь также не обошлось без вмешательства всесильного графа Бобринского. Бобринские – основатели сахарной промышленности Украины, их усилиями Киев стал сахарной столицей мира, а Российская империя вошла в число крупнейших производителей сахара (*Примеч. ред.*).

** Согласно Толковому словарю В.И. Даля, личное (исключительное) право (*Примеч. ред.*).

Система Ф. И. Балюкевича была допущена к применению постановлением инженерного совета министерства в 1894 г.

Система предусматривала установку на станциях контрольных аппаратов с движущейся лентой, на которой отмечался штемпелем время выдачи жезла и могли делаться другие отметки. При вынимании жезла, так же как и при вкладывании его, отметки на ленте получались автоматически.

С 1895–1896 гг. на наших дорогах начала применяться взаимозамыкающая электрожезловая система.

Lupal Nikolay V.
«Automation and remote Control on Railways» department
Leningrad Institute of Railway Transport Engineers

Development of signaling, interlocking and line-block in period of industrial capitalism (1861–1900). Part 3: Traffic control on open lines

This paper contains materials of second paragraph of unreleased manuscript «Development of Signaling, Interlocking and Line-Block on Russian Railways» written by the first head of «Automation and Remote Control on Railways» department of Leningrad institute of railway engineers Nikolay Vasilyevich Lupal. It describes features of train traffic control on open lines during considered period.

train traffic; open line; semaphore; electric detaining mechanism; electromagnet telegraph; automatic line block; electric rod system

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 советских железных дорогах 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., 2016

Подписано в печать с оригинал-макета 15.03.2016. Формат 60×84/9,5. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 16,425. Уч.-изд. л. 9,75. Установочный тираж 500 экз. Заказ . Цена свободная.
Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО ПГУПС. 190031, СПб., Московский пр., 9.