



АВТОМАТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

AUTOMATION ON TRANSPORT

№ 3 • Том 7

Сентябрь, 2021

September, 2021



УЧРЕДИТЕЛЬ

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

ИЗДАТЕЛЬ

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

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ СРЕДСТВА МАССОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

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

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

ISSN 2412-9186

Индекс Роспечати 80525

АДРЕС УЧРЕДИТЕЛЯ

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

АДРЕС ИЗДАТЕЛЯ

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

РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

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

Верстка: *А. А. Стуканова*

Электронное сопровождение: *А. С. Иванов*

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021

FOUNDER

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

PUBLISHER

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

EDITOR-IN-CHIEF

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

MASS MEDIA REGISTRATION

CERTIFICATE NUMBER

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

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

ISSN 2412-9186

Rospechat Index 80525

FOUNDER'S ADDRESS

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

PUBLISHER'S ADDRESS

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

JOURNAL STAFF

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

Layout: *Anna A. Stukanova*

Electronic maintenancy *Aleksei S. Ivanov*

© PSTU, 2021

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Валерий Сапожников

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

Константин Бочков

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

Сергей Власенко

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

Грегор Теег

д-р техн. наук, «Сименс», Брауншвейг,
Германия и Университет прикладных
наук Санкт-Пёльтена, Австрия

Марек Мезитис

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

Йорн Пахль

профессор, Брауншвейгский
технический университет,
Брауншвейг, Германия

Раймунд Убар

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

Владимир Хаханов

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

Фуниан Ху

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

Христо Христов

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Никитин Александр Борисович

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

Кушпиль Игорь Васильевич

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

Баранов Леонид Аврамович

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

Бестемьянов Петр Филимонович

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

Бушуев Сергей Валентинович

канд. техн. наук, доцент,
УрГУПС, Екатеринбург

Василенко Михаил Николаевич

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

Долгий Игорь Давидович

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

Ефанов Дмитрий Викторович

д-р техн. наук, доцент,
РУТ, Москва

Кокурин Иосиф Михайлович

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

Марков Дмитрий Спиридонович

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

Наседкин Олег Андреевич

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

Никищенко Сергей Алексеевич

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

Пыркин Антон Александрович

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

Розенберг Ефим Наумович

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

Шаманов Виктор Иннокентьевич

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

Ходаковский Валентин Аветикович

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

Сухих Николай Николаевич

д-р техн. наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный
университет гражданской авиации

INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL

Valery Sapozhnikov

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

Konstantin Bochkov

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

Sergey Vlasenko

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

Gregor Theeg

Ph. D., Siemens Mobility GmbH, Braunschweig,
Germany, St. Pölten University of Applied
Sciences, Austria

Marek Meztis

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

Jorn Pacht

Professor, Technical University
of Braunschweig,
Braunschweig, Germany

Raimund Ubar

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

Vladimir Hahanov

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

Funian Hu

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

Khristo Khristov

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

EDITORIAL BOARD

Alexander B. Nikitin

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

Igor V. Kushpil

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

Leonid A. Baranov

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

Peter F. Bestemiyarov

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

Sergey V. Bushuev

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

Michael N. Vasilenko

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

Igor D. Dolgiy

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

Dmitry V. Efanov

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

Iosif M. Kokurin

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

Dmitry S. Markov

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

Oleg A. Nasedkin

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

Sergey A. Nikischenkov

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

Anton A. Pyrkin,

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

Efim N. Rozenberg

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

Victor I. Shamanov

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

Valentin A. Khodakovsky

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

Nikolay N. Suhih

D. Sc., Professor

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

- Е. О. Аверченков, Л. А. Баранов, М. А. Шевченко*
 Функциональная структура комплекса систем управления движением поездов метрополитена 343
- А. Б. Никитин, А. Н. Ковкин*
 Управление электроприводами в системе микропроцессорной централизации МПЦ-МПК 362

ЖИВУЧЕСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ

- Д. В. Комнатный*
 Комплексный анализ устойчивости систем управления движением поездов к сверхширокополосным электромагнитным импульсам преднамеренного воздействия 379
- В. И. Шаманов*
 Влияние отказов в системах интервального регулирования на движение поездов по двухпутным участкам 395

ЭЛЕКТРОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Д. С. Кокорев, В. Г. Сидоренко, С. К. Хромов*
 Автоматизация организации работы службы поддержки пользователей автоматизированных систем управления транспортных предприятий 414
- И. М. Кокурин*
 Решения задач интервального разграничения поездов 438

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ СИСТЕМЫ

- Р. Б. Абдуллаев*
 Синтез полностью самопроверяемых схем встроенного контроля на основе полиномиальных кодов для комбинационных логических устройств 452
- А. В. Пашуков*
 Исследование особенностей обнаружения ошибок на выходах программируемых логических интегральных схем при функциональном контроле на основе модульных кодов с суммированием 477

CONTENTS

TRANSPORT CONTROL SYSTEMS

- E. O. Averchenkov, L. A. Baranov, M. A. Shevchenko*
 Functional structure of the subway train traffic control system complex..... 343
- A. B. Nikitin, A. N. Kovkin*
 Electric point machines in the microprocessor controller
 and microprocessor interlocking system..... 362

VIABILITY, RELIABILITY, SAFETY

- D. V. Komnatny*
 Comprehensive stability analysis of train control systems to ultra-wideband
 electromagnetic pulses of intentional impact..... 379
- V. I. Shamanov*
 The effect of failures in interval control systems on the movement
 of trains on double-track sections 395

ELEKTRONIC SIMULATION

- D. S. Kokorev, V. G. Sidorenko, S. K. Khromov*
 Automation of work organization support services for users
 of automated management systems of transportation companies..... 414
- I. M. Kokurin*
 Solution of problems for interval train separation 438

TECHNICAL DIAGNOSTICS AND CONTROLLABLE SYSTEMS

- R. B. Abdullaev*
 Synthesis of fully self-checked schemes built-in control based on
 polynomial codes for combination logic devices 452
- A. V. Pashukov*
 Research of peculiarities of error detection on the outputs
 of programmable logic integrated circuits with functional control
 based on modular codes with summation 477

УДК 681.5+656.34

Е. О. Аверченков

АО «Трансмашхолдинг», Москва

Л. А. Баранов, докт. техн. наук

Кафедра «Управление и защита информации», Российский университет транспорта

М. А. Шевченко

Служба технической политики, ГУП «Московский метрополитен»

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА КОМПЛЕКСА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДОВ МЕТРОПОЛИТЕНА

Описаны основные аспекты формирования архитектуры комплекса систем управления движением поездов метрополитена. Приведена структура процессов управления движением поездов на примере ГУП «Московский метрополитен». Описаны основные задачи, которые необходимо решать для достижения высоких уровней автоматизации управления движением поездов в метрополитенах. Предлагается функциональная структура комплекса систем управления движением поездов метрополитена, охватывающая уровни организации и планирования движения поездов, оперативного управления движением и непосредственно исполнительных систем. Показаны взаимосвязи между объектами автоматики и телемеханики движения поездов, устройствами операционного уровня и системами организации и планирования движения. Отмечена необходимость дооснащения метрополитена средствами обеспечения транспортной безопасности и увязки их с управляющими движением системами, такими как средства информирования пассажиров, обеспечивающие возможности оперативного информирования пассажиров как при штатной работе транспортной системы, так и в случае нештатных ситуаций, средства связи «пассажир – диспетчерский/ситуационный центр», для обеспечения взаимодействия между пассажирами и оперативным персоналом метрополитена при необходимости, средства видеонаблюдения, обеспечивающие расширенные возможности дистанционного контроля текущей ситуации в салонах вагонов подвижного состава, на платформах. Использование комплексных систем управления движением поездов в метрополитенах повышает эффективность их использования за счет повышения пропускной и провозной способности, точного выполнения графика движения и возможностей его быстрого восстановления в случае сбоев. При этом повышается безопасность движения путем уменьшения вероятности опасного сближения поездов, а также снижаются затраты энергии на тягу поезда за счет выбора энергооптимальных режимов управления поездом и оптимального по критерию минимума энергозатрат распределения времени хода по линии на время хода по перегонам.

Автоматизация движения поездов в метрополитенах; организация и управление движением поездов; беспилотное движение; архитектура системы управления движением

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-3-343-361

Введение

В крупнейших городских агломерациях всего мира, население которых исчисляется миллионами и даже десятками миллионов, важнейшей транспортной системой является метрополитен [1]. Плотная застройка районов, постоянно расширяющиеся территории, огромное количество автотранспорта и динамически протекающие процессы перемещения – метрополитены крупнейших городов играют ведущую роль в пассажирских перевозках. Метрополитен представляет собой внеуличную железную дорогу, целиком или частично расположенную в тоннелях, безраздельно отданных под такое использование. Этот вид транспорта может включать в себя как подземные железные дороги, так и пролегающие на поверхности земли, а также на эстакадах над ней.

Первая подземная железная дорога была построена в Лондоне в 1863 году. Сейчас это одна из крупнейших сетей метрополитенов мира. В России первая линия метро была открыта 15 мая 1935 года в Москве. Сегодня в нашей стране метрополитены эксплуатируются в семи городах – в Москве, Санкт-Петербурге, Нижнем Новгороде, Новосибирске, Самаре, Екатеринбурге и Казани; планируется строительство метрополитена в Красноярске.

Московский метрополитен, самый крупный в России, активно развивается и расширяется в последние десятилетия. Он занимает шестое место в мире по пассажиропотоку (после Пекина, Токио, Шанхая, Сеула и Гуанчжоу), четвертое место в мире и первое в Европе по эксплуатационной длине линий и первое место в мире по суточному пассажиропотоку. Актуальная статистическая информация о перевозках и об оснащенности столичного метро представлена на сайте эксплуатирующей организации – ГУП «Московский метрополитен» [2].

Метрополитен – стратегически важная составляющая транспортной системы Москвы. Ввиду роста пассажиропотоков, строительства новых линий метрополитена, более тесной интеграции метрополитена с трамвайными и пригородными железнодорожными сетями столицы и Московской области пристальное внимание уделяется организации движения поездов, стабильности перевозок, повышению комфортабельности перевозок и решению смежных задач. Над организацией движения поездов в метрополитене работает большое количество подразделений, осуществляющих планирование, организацию и диспетчеризацию движения поездов, эксплуатацию подвижного состава и инфраструктурного хозяйства, а также технических средств автоматизации управления движением. Это позволяет обеспечивать в периоды максимального пассажиропотока (в так называемый период «часа пик») 90-секундный интервал движения поездов (пропуск до 40 пар поездов), что красноречиво характеризует используемые при планировании и организации движения технические и организационные решения, наработанные в течение продолжительного времени существования метрополитена.

Для управления движением поездов используются технические средства автоматизации, распределенные по инфраструктурному комплексу метрополитена, средства автоматизации, расположенные на подвижном составе, средства электрической и диспетчерской централизации, системы интервального регулирования движения поездов [3].

Эффективность системы автоматического управления движением поездов определяется:

- увеличением пропускной способности и, как следствие, провозной способности за счет точного выполнения графика движения и возможностей его быстрого восстановления в случае сбоев;
- повышением безопасности движения путем уменьшения вероятности опасного сближения поездов;
- снижением затрат энергии на тягу поезда за счет выбора энергооптимальных режимов управления поездом и оптимального по критерию минимума энергозатрат распределения времени хода по линии на время хода по перегонам [4–6].

Все это возможно при реализации комплекса систем управления движением поездов, объединяющего и организующего функциональное и информационное взаимодействие жизненно важных для транспортной системы метрополитена компонентов — от системы организации и планирования движения до систем автоматизации, расположенных непосредственно на подвижных единицах и объектах инфраструктурного хозяйства [7–9].

Опираясь на принципы, изложенные в работе [10] и программном документе «Концепции создания Автоматизированной системы комплексного управления движением поездов метрополитена ГУП «Московский метрополитен» (АСКУ ДПМ)» [11], постараемся обосновать, почему функциональная структура — это шаг к формированию концептуальной архитектуры перспективного комплекса систем управления движением для Московского метрополитена. Концептуальная архитектура, в свою очередь, станет отправной точкой в подготовке нормативно-технической базы и требований к самой системе и ее компонентам.

1. Действующая структура управления движением поездов

Комплекс процессов управления движением, автоматизируемых АСКУ ДПМ, имеет выраженную структуру, которая схожа с описанной в ПНСТ МЭК 62290–2:2014 «Системы управления и контроля для железнодорожных пассажирских перевозок в городском и пригородном сообщении» [12], и включает следующие составляющие:

- процессы организации, планирования и анализа движения;
- процессы оперативного управления движением;
- процессы исполнения движения.

Обобщенная схема группы процессов управления движением представлена на рис. 1 [9].

Сложившийся комплекс процессов управления движением поездов в метрополитене подразумевает участие специалистов ряда служб метрополитена, а именно специалистов службы движения, службы подвижного состава и других. Управление движением поездов метрополитена осуществляется из диспетчерского центра поездными диспетчерами, каждый из которых управляет движением в рамках диспетчерского круга (линии метрополитена).

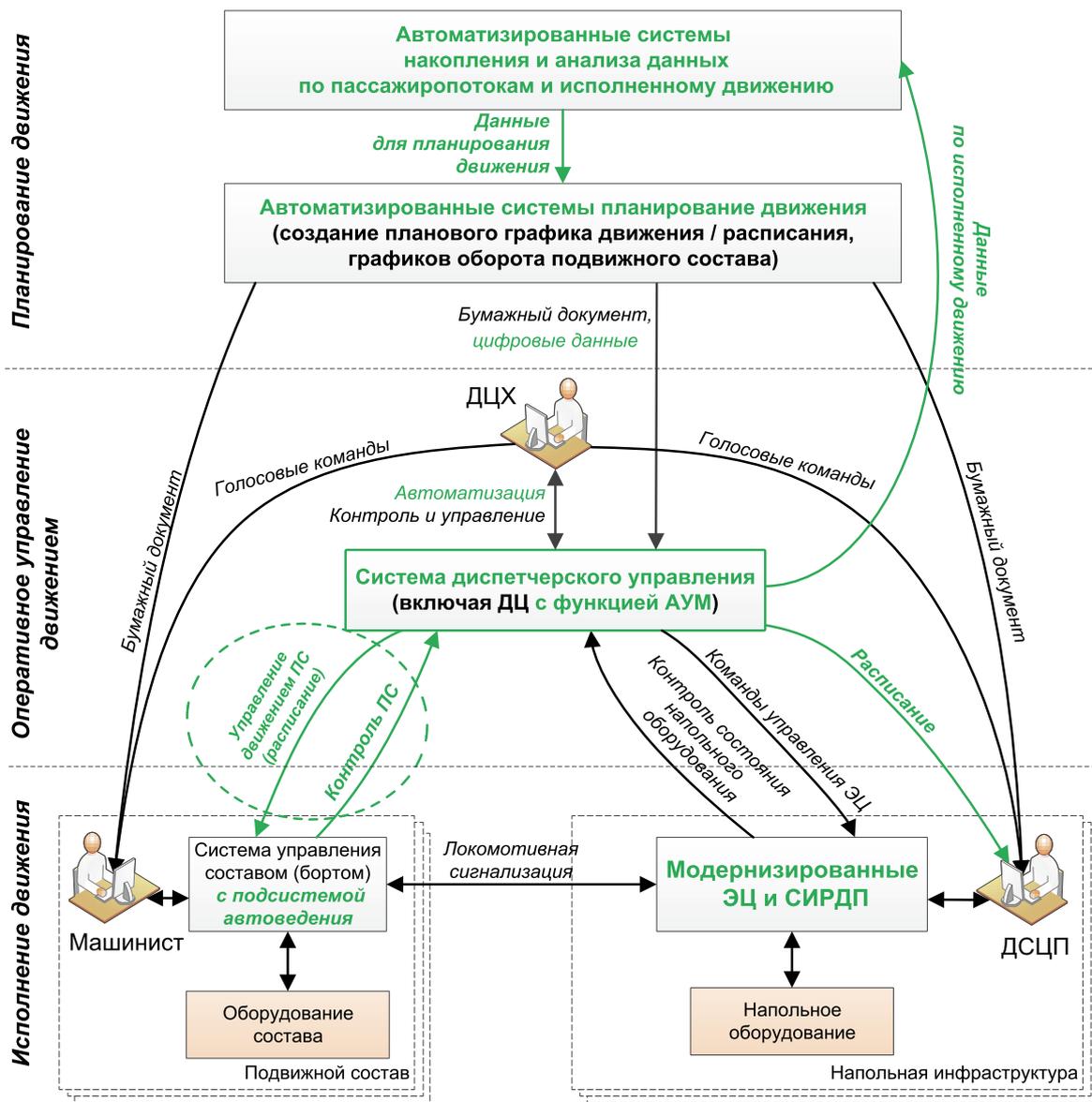


Рис. 1. Обобщенная схема группы процессов управления движением Московского метрополитена

ДЦХ – поездной диспетчер; ДЦ – диспетчерская централизация; АУМ – система автоматической установки маршрутов; ЭЦ – система электрической централизации; СИРДП – система интервального регулирования движением поездов; ДСЦП – дежурный (станционный) поста централизации; ПС – подвижной состав

Процессы *организации, планирования и анализа движения* реализуются в основном специалистами служб движения и подвижного состава. Со стороны службы движения задействованы графисты, непосредственно осуществляющие составление плановых графиков движения поездов, и инженеры-аналитики, выполняющие ретроспективный анализ данных исполненного движения, расчет значений показателей исполненного движения, определение целевых значений показателей движения для составления плановых графиков движения поездов на будущие периоды.

Со стороны службы подвижного состава над составлением плановых графиков движения совместно с графистами службы движения работают специалисты, разрабатывающие графики оборота парка подвижного состава, в соответствии с которыми обеспечивается подготовка и выдача подвижных единиц на линию в ходе выполнения движения. Специалисты службы подвижного состава в рамках этого процесса также разрабатывают графики работы локомотивных бригад.

В ходе процесса планирования специалистами обеих служб решаются следующие ключевые задачи:

- сбор диагностических данных по движению, состоянию объектов инфраструктурного хозяйства, подвижного состава, ретроспективный анализ и определение целевых значений показателей для планирования движения и эксплуатационной работы на будущие периоды;

- планирование движения и эксплуатационной работы, заключающееся в составлении плановых графиков движения для соответствующей линии Московского метрополитена и графиков оборота подвижного состава, приписанного к обслуживающим линию депо, формирование суточных графиков движения поездов при необходимости (планирование вставок), планирование работы локомотивных бригад.

Результатом процесса планирования движения становятся плановые графики движения для каждой из линий (полигонов управления) метрополитена. Графики планового движения готовятся заблаговременно. Таким образом, процессы данной группы не выполняются в режиме реального времени.

Оперативное управление процессами движения осуществляют специалисты диспетчерских участков службы движения – поездные диспетчеры, ответственные за управление движением поездов на каждом из полигонов управления (как правило, линии метрополитена). В числе основных задач службы движения:

- организация движения поездов метрополитена на основе планового суточного графика движения поездов, актуализация графика движения при необходимости (в случае возникновения нештатных ситуаций, приводящих к сбоям графика);

- формирование команд управления объектами напольной инфраструктуры для реализации графика движения поездов;

– мониторинг процессов движения с анализом данных и выдачей указаний и рекомендаций участникам движения с целью восстановления графика движения поездов при его нарушении.

Процессы этой группы выполняются оперативными подразделениями метрополитена в режимах, близких к реальному времени. В ходе оперативного управления процессами движения не решаются задачи обеспечения безопасности движения поездов.

Технологические процессы исполнения движения реализуются при участии специалистов следующих основных подразделений службы движения и службы подвижного состава. От службы движения реализацию процессов осуществляют диспетчер-централизатор и дежурные станционных постов централизации. Диспетчер-централизатор посредством соответствующих инструментов (диспетчерская централизация) управляет техническими средствами напольной автоматизации для реализации графика движения поездов (режим диспетчерского управления). Дежурные станционных постов централизации, которые осуществляют управлением техническими средствами напольной автоматизации для реализации графика движения поездов (режим местного управления), а также выполняют ответственные функции в случае нештатных ситуаций. От службы подвижного состава процессы реализуют диспетчера, машинисты и машинисты-инструкторы, в чьи обязанности входит выдача (отставление) подвижного состава на линию, ведение его по линии с контролем выполнения расписания движения, выполнение маневровых работ при необходимости.

Основными решаемыми задачами специалистов данного уровня являются безопасное ведение подвижных единиц согласно расписанию с использованием технических средств систем обеспечения безопасности движения поездов (устройств и систем сигнализации, централизации и блокировки, СЦБ), а также безопасное управления объектами инфраструктуры в соответствии с графиком движения поездов [13].

Ключевой особенностью задач, решаемых на данном уровне управления, в отличие от ранее рассмотренных, является предъявление жестких требований в части обеспечения безопасности движения поездов, что диктует и требования к реализации инструментов автоматизации – соответствия их уровню полноты безопасности УПБ 4 (SIL 4) [14]. Это следует учитывать при разработке АСКУ ДПМ и ее компонентов. Процессы данной группы выполняются оперативными подразделениями метрополитена в режимах реального времени.

Таким образом, инструменты реализации основных технологических процессов могут быть разделены на категории по строгости соответствия различным уровням полноты безопасности, и соответственно, выделены группы технических решений различной сложности и исполнения в смысле минимально необходимого объема аппаратно-программных средств для реализации конкретного технологического процесса.

2. Требования к задачам управления движением поездов для достижения целевых уровней автоматизации управления

Целевыми уровнями автоматизации управления движением в Московском метрополитене, на что указывает Концепция построения АСКУ ДПМ, являются уровни GoA3 и GoA4 [11]. Указанные уровни автоматизации определяются группой международных стандартов IEC 62290 Railway applications – Urban guided transport management and command/control systems (отечественный аналог ПНСТ МЭК 62290 «Системы управления и контроля для железнодорожных пассажирских перевозок в городском и пригородном сообщении»). Рассмотрим состав задач целевой (перспективной) модели АСКУ ДПМ, дополнительно возникающих по отношению к выполняемым в настоящее время при необходимости повышении уровня автоматизации управления движением до целевых.

Достижение высоких уровней автоматизации управления движением должно сопровождаться реализацией механизмов автоматизированного или автоматического купирования ряда угроз, связанных с обеспечением безопасности пассажирских перевозок. Другими словами, отсутствие машиниста (либо оператора) на борту поезда требует решения в автоматическом или автоматизированном режиме ряда задач, которые ранее решались в ручном режиме, с возможностью эскалации ситуации для привлечения оперативного диспетчерского персонала. Более подробно с перечнем функций, необходимых для реализации в рамках системы управления движением при реализации соответствующего уровня автоматизации можно ознакомиться в стандарте [12].

Рассмотрим спектр задач, возникающих при реализации высоких уровней автоматизации в части обеспечения безопасности, работы в случае нештатных ситуаций, и требуемые механизмы для их решения (таблица 1).

Видно, что основные задачи в части обеспечения безопасности и работы в случае нештатных ситуаций при реализации высоких уровней автоматизации управления требуют реализации средств контроля и защиты габаритов следования состава, инструментов контроля условий безопасного отправления, инструментов дистанционного контроля и управления, включая инструменты и управления подвижным составом.

Следует отметить, что не весь представленный комплекс задач относится непосредственно к задачам управления движением. Часть задач относится к задачам обеспечения транспортной безопасности, что является существенным при построении высокоавтоматизированной (беспилотной) транспортной системы.

В соответствии с приведенными задачами в схеме функциональной структуры АСКУ ДПМ должны быть предусмотрены соответствующие функциональные подсистемы.

1. Подсистема платформенных дверей, обеспечивающая защиту габарита следования подвижного состава на станциях, которая внедряется в соответствии

Таблица 1. Обеспечение безопасности при высоких уровнях автоматизации управления

Задача	Решение задачи
Задачи, требующие решения при нахождении (остановке) поезда в тоннеле	
Обеспечение связи пассажиров с машинистом/диспетчером	Необходима реализация средств транспортной безопасности, для обеспечения связи с диспетчерским/ситуационным центром – видеонаблюдение, оперативная связь «пассажир – ситуационный центр».
Работа в случаях нештатных ситуаций, делающих невозможным автоматическое управление движением	Необходима реализация средств расширенного мониторинга ситуации (видеонаблюдение, телеметрия) и дистанционного управления подвижным составом из диспетчерского центра (возможность управления человеком в случае нештатной ситуации).
Управление эвакуацией	Необходима реализация средств дистанционного управления дверями состава, информирования и управления эвакуацией при возникновении нештатных ситуаций.
Контроль состояния за пространством по ходу движения состава	Необходима реализация средств видеонаблюдения/машинного зрения за пространством следования подвижного состава.
Задачи, требующие решения при выходе поезда на станцию (на платформу)	
Нахождение человека или предметов в подплатформенном пространстве	Должны быть реализованы либо средства защиты габарита следования (платформенные двери), либо средства контроля пространства пути в районе платформы с применением аварийного торможения при невыполнении условий безопасности.
Нахождение человека или предметов на платформе в габарите следования поезда	Должны быть реализованы либо средства защиты габарита следования поезда (платформенные двери), либо средства контроля пространства края платформы с применением аварийного торможения при невыполнении условий безопасности (дополнительно – оповещение пассажиров/дежурной при пересечении зоны контроля).
Задачи, требующие решения при отправлении поезда от платформы	
Нахождение частей тела/предметов в пространстве между поездом и платформой (в габарите следования поезда)	Должны быть реализованы средства контроля пространства между поездом и платформой и запрет отправления при невыполнении условий безопасности (дополнительно оповещение причастных), при использовании платформенных дверей средства должны быть интегрированы в систему платформенных дверей.
Задачи, требующие решения при выходе поезда на оборот/в депо	
Нахождение пассажиров в салоне при отправлении с конечной станции	Должны быть реализованы средства транспортной безопасности – обеспечение автоматического контроля освобождения вагонов для продолжения следования (закрытия дверей) с оповещением причастных лиц при необходимости.

с соответствующими проектными решениями при строительстве новых и модернизации существующих линий.

2. Подсистема контроля пространства в районе станционных путей (подплатформенное пространство) и подсистема контроля пространства платформы для предотвращения несчастных случаев (травмирования пассажиров).

3. Подсистемы контроля условий безопасности при отправлении поезда в сценариях автоматизации ведения в составе системы управления подвижного состава могут реализовываться опциональные дополнительные функции (например, контроль свободности промежутка между вагоном и платформой).

4. Подсистемы дистанционного управления как в составе бортового оборудования, так и в составе систем уровня диспетчерского управления, необходимые при запуске движения без машиниста.

Кроме того, должны реализовываться средства обеспечения транспортной безопасности, непосредственно не входящие в контур комплекса систем управления движением, в частности:

- средства информирования пассажиров, обеспечивающие возможности оперативного информирования пассажиров как при штатной работе транспортной системы, так и в случае нештатных ситуаций;

- средства связи «пассажир – диспетчерский/ситуационный центр», для обеспечения взаимодействия между пассажирами и оперативным персоналом метрополитена при необходимости;

- средства видеонаблюдения, обеспечивающие расширенные возможности дистанционного контроля текущей ситуации: в салонах вагонов подвижного состава, на платформах.

3. Функциональная структура АСКУ ДПМ

Исходя из ранее описанного, далее предлагается обобщенная схема функциональной структуры АСКУ ДПМ, представленная на рис. 2. Представленная схема функциональной структуры АСКУ ДПМ разработана в соответствии со структурой процессов (см. рис. 1), и призвана обеспечить автоматизацию комплекса задач управления движением Московского метрополитена.

Схема функциональной структуры содержит следующие основные элементы, разнесенные по уровням процессов управления:

- на уровне исполнения движения предусматриваются комплекс станционных и бортовых систем, автоматизирующих процессы обеспечения безопасности, контроля и управления напольными объектами и подвижными единицами;

- для объединения территориально распределенных систем, включая мобильные компоненты на подвижном составе обязательна реализация систем технологической связи, включая как стационарные сети передачи данных, так и системы беспроводной связи;

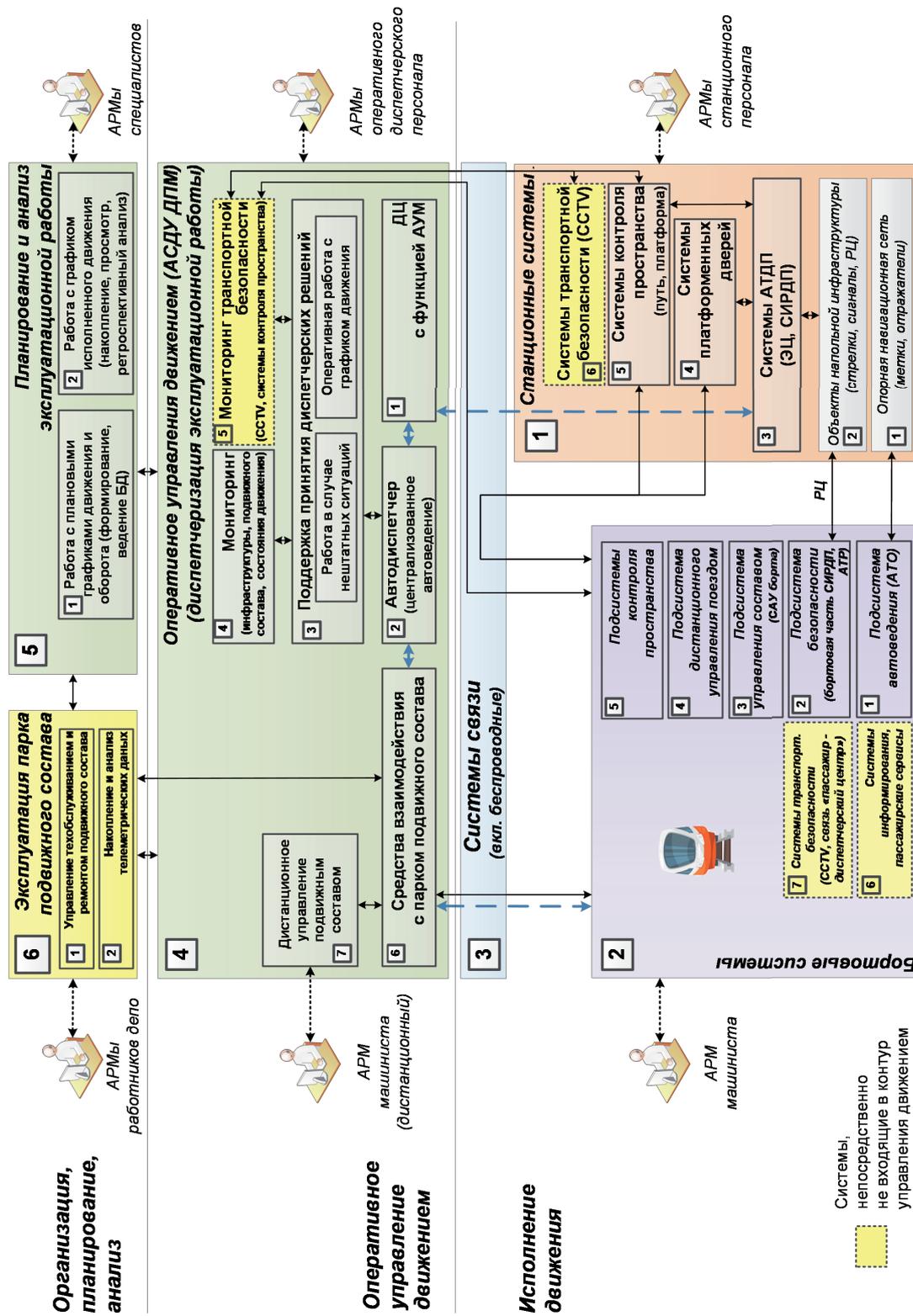


Рис. 2. Функциональная структура АСКУ ДПМ:
 АРМ – автоматизированное рабочее место; АТДП – автоматика, телемеханика движения поездов;
 БД – база данных; РЦ – рельсовая цепь

– на уровне оперативного управления движением реализуется ряд систем/подсистем для решения задач оперативного централизованного диспетчерского контроля и управления как отдельными подвижными единицами и объектами напольной инфраструктуры, так и движением поездов в целом, дополнительно включая инструменты для автоматизации работы в случае нештатных ситуаций;

– на уровне планирования движения и анализа исполненного движения должны быть реализованы системы/подсистемы, автоматизирующие процессы формирования плановых графиков, накопления данных и ретроспективного анализа исполненного движения;

– в качестве смежных (обеспечивающих) подсистем для реализации функций АСКУ ДПМ также рассматриваются:

- системы транспортной безопасности и информирования пассажиров;
- системы управления эксплуатацией парка подвижного состава.

Структура АСКУ ДПМ включает функциональные блоки и компоненты.

1. Станционные системы. Представлены следующими функциональными блоками.

1.1. Опорная навигационная сеть, расположенная на путевом развитии полигона управления и предназначенная для решения задач определения местоположения подвижного состава на полигоне управления. Как правило, навигационная сеть реализуется при помощи идентифицируемых реперных датчиков, располагаемых на путевом развитии и решающих задачи сопоставления положения подвижной единицы с точкой на электронной карте полигона управления. В зависимости от требований (точности) к решению тех или иных задач, например, задачи непрерывного мониторинга положения или задачи прицельной остановки подвижного состава, исполнение датчиков может отличаться. Как правило, предполагается пассивное исполнение датчиков, не требующее постоянного внешнего энергоснабжения и подразумевающее считывание информации оборудованием подвижного состава, — это могут быть как RFID-метки, так и отражатели (электромагнитные, световые, ультразвуковые). При необходимости для решения задач навигации при условии соответствия предъявляемым требованиям могут использоваться средства активного определения местоположения подвижного состава, реализуемые в составе систем беспроводной связи.

1.2. Объекты напольной инфраструктуры движения. Включают в себя стрелки, сигналы, рельсовые цепи и прочие объекты инфраструктуры движения, при помощи которых производится контроль и управление движением подвижных единиц.

1.3. Системы АТДП. Включают традиционные системы ЭЦ, обеспечивающие возможности дистанционного управления (телеуправления), так и СИРДП. Системы ЭЦ могут быть представлены как полностью бесконтактными микро-

процессорными централизациями, так и гибридными релейно-процессорными централизациями. СИРДП могут быть представлены либо современными системами АЛС-АРС, взаимодействующими с подвижным составом посредством рельсовой линии (рельсовых цепей), либо СИРДП по радиоканалу, например, системы типа СВТС.

1.4. Системы платформенных дверей. Предназначены для предотвращения несчастных случаев, связанных с падением пассажиров на пути и травмирования пассажиров подвижным составом по прибытии либо отправлении поезда. Включает в себя как собственно систему платформенных дверей, так и исполнительные механизмы, и систему безопасного управления. Требуется интеграция с напольными системами безопасности и системой управления на борту поезда.

1.5. Системы контроля пространства (пространства пути, пространства платформы). Предназначены для применения на станциях, не оборудованных системами платформенных дверей. Должны обеспечивать непрерывный контроль за пространством пути с целью оперативного реагирования в случаях падения на путь людей или предметов, а также непрерывный контроль за пространством платформы с целью недопущения травмирования пассажиров прибывающим поездом.

1.6. Системы транспортной безопасности. Представляют собой инструменты автоматизированного контроля ситуации на пассажирских платформах, переходах. Непосредственно в контур АСКУ ДПМ указанные системы не входят, но являются необходимыми к реализации при реализации малолюдных технологий для обеспечения перевозочного процесса.

2. Комплекс бортовых систем. Включает следующие функциональные блоки:

2.1. Подсистема автоведения. Обеспечивает автоматическое или автоматизированное управление движением электропоезда в соответствии с нормативами, расписанием, графиком движения. Дополнительно к функциям управления движением подсистема должна реализовывать следующие функции: прицельную остановку поезда у платформы, управление дверями поезда, расчет времени отправления поезда. Реализует функции Automatic Train Operation и/или Automatic Train Control в случае реализации режима управления без машиниста.

2.2. Подсистема безопасности (устройства безопасности, функциональная подсистема Automatic Train Protection). Включает в себя бортовые компоненты СИРДП, обеспечивающих контроль условий безопасности движения поезда, в первую очередь допустимой скорости движения поезда в зависимости от состояния объектов напольной инфраструктуры, текущего поезда положения. Обеспечивает автоматическое управление тормозной системой поезда при нарушении условий безопасности.

2.3. Система управления подвижным составом. Обеспечивает централизованное безопасное управление оборудованием и системами подвижного состава, включая тяговый привод, тормоза, двери и прочие системы.

2.4. Подсистема дистанционного управления поездом. Программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий безопасное дистанционное управление поездом из диспетчерского центра по радиоканалу в случае нештатных ситуаций, включая как функции управления движением поезда, так и функции управления дверями, системами жизнеобеспечения, информирования и т. д.

2.5. Подсистема контроля пространства. Опциональная система (системы) для обеспечения безопасности движения поезда в условиях отсутствия систем защиты габарита следования (платформенных дверей) и на открытых пространствах. Должна решать задачи контроля свободности пространства по ходу движения поезда, а также задачи контроля условий безопасности при отправлении поезда для предотвращения травмирования пассажиров из-за зажатия дверями или попадания частей тела или предметов между поездом и платформой при отсутствии платформенных дверей.

2.6. Системы информирования пассажиров, пассажирские информационные сервисы. Смежные по отношению к АСКУ ДПМ системы, призванные обеспечить оперативное информирование пассажиров в соответствии с текущей ситуацией. Необходимо предусматривать взаимодействие со стороны АСКУ ДПМ с указанными системами, обязательно при реализации автоматического режима управления движением — движения без машиниста.

2.7. Системы транспортной безопасности (ССТV, связь «пассажир — ситуационный центр»). Смежные по отношению к АСКУ ДПМ системы, призванные обеспечить возможности централизованного объективного контроля ситуации на борту, и взаимодействия пассажиров с удаленным оперативным диспетчерским персоналом в случае нештатных ситуаций. Системы обязательны к реализации при работе транспортной системы в автоматическом режиме управления движением — режиме движения без машиниста.

3. Системы технологической связи. Подразумевается комплекс систем связи, обеспечивающий взаимодействие компонентов АСКУ ДПМ. Включает как стационарные линии и системы связи, так и системы беспроводной связи с подвижным составом на всем полигоне управления движением, включая территорию депо, главные пути, путевое развитие, оборотные тупики.

4. Комплекс систем оперативного управления движением (система АСДУ ДПМ). Является центральной частью АСКУ ДПМ и решает следующие основные задачи:

- централизованный контроль состояния объектов напольной инфраструктуры, парка подвижного состава и процесса движения поездов в границах полигона управления;
- оперативное управление движением поездов.

Комплекс предназначен для автоматизации оперативного диспетчерского управления движением поездов в границах полигона управления движением и включает в себя следующие основные функциональные блоки:

4.1. Диспетчерская централизация с возможностью автоматической установки маршрутов, обеспечивающей управление станционными системами автоматики и телемеханики и с возможностью централизованной установки маршрутов согласно действующему графику движения и текущей поездной обстановки.

4.2. Функциональная подсистема «автодиспетчер», решающая задачу согласованного управления парком подвижных единиц и объектами напольной инфраструктуры в соответствии с действующим графиком движения с учетом текущей поездной обстановки путем выдачи команд управления в систему диспетчерской централизации (установка маршрутов) и на подвижные единицы (актуальное расписание следования и необходимые корректировки).

4.3. Подсистема поддержки принятия диспетчерских решений. Подсистема реализует ряд инструментов для автоматизации работы поездного диспетчера как для режима нормальной работы, так и в случае нештатных ситуаций, а также средства для оперативной работы с графиком движения (перестроение графика движения при необходимости).

4.4. Подсистема мониторинга состояния инфраструктуры движения, состояния парка подвижного состава, состояния движения в границах полигона управления. Включает комплексные средства визуализации и объективного контроля текущей ситуации.

4.5. Подсистема мониторинга транспортной безопасности. Данная подсистема является смежной системой по отношению к АСКУ ДПМ и не входит непосредственно в состав АСКУ ДПМ. Подсистема обязательна к реализации при работе транспортной системы в автоматическом режиме управления движением (режиме движения без машиниста) для обеспечения объективного оперативного контроля.

4.6. Подсистема взаимодействия с парком подвижного состава. Является обеспечивающей функциональной подсистемой и реализует возможности онлайн-взаимодействия с подвижными единицами в границах полигона управления, в том числе в рамках выполнения ряда задач, к которым предъявляются особые требования по функциональной безопасности, например, задачи удаленного управления поездом.

4.7. Подсистема дистанционного управления подвижным составом предназначена для решения задач удаленного безопасного управления движением поезда и его системами в случае нештатных ситуаций при отсутствии машиниста на борту.

5. Комплекс систем планирования и анализа движения. Предназначен для автоматизации процессов планирования движения, накопления и анализа данных по исполненному движению. Включает в себя следующие функциональные блоки:

5.1. Подсистема работы с плановыми графиками движения, обеспечивающая формирование и ведение архива графиков планового движения и оборота подвижного состава.

5.2. Подсистема работы с графиками исполненного движения, обеспечивающая сбор, накопление и анализ (оперативный и ретроспективный) данных исполненного движения.

6. Комплекс систем эксплуатации парка подвижного состава. Данная функциональная система не входит непосредственно в контур АСКУ ДПМ и предназначена для автоматизации смежных процессов, связанных с управлением обслуживанием и ремонтом парка подвижного состава, ведением технических паспортов подвижных единиц, включая функциональные паспорта (паспорта состояния), предоставлением исходных данных для формирования графика оборота и графика работы локомотивных бригад.

Заключение

Описанные выше основные элементы функциональной структуры АСКУ являются необходимы для автоматизации процессов планирования, организации и управления движением поездов метрополитена в привязке к задачам управления движением и к ряду смежных процессов. На основании функциональной структуры АСКУ ДПМ формируется функциональная структура до уровня отдельных систем/подсистем с уточнением состава функциональных блоков в привязке к специфике конкретной транспортной системы (в нашем случае – ГУП «Московский метрополитен»).

Необходимо отметить, что при разработке АСКУ ДПМ (см. «Концепцию построения АСКУ ДПМ» [11]) требуется обеспечивать режимы последовательной деградации системы от уровня максимальной автоматизации к уровню минимальной автоматизации при возникновении отказов компонентов системы, отвечающих за ту или иную функциональность. Таким образом, на этапе разработки АСКУ ДПМ необходимо обеспечить возможность модульной реализации с выделением компонентов, а также подсистем, чтобы четко задать возможные режимы работы АСКУ ДПМ как при нормальном функционировании, так и при возникновении нештатных ситуаций. Деградация системы при возникновении отказов компонентов (включая отказы программного обеспечения и аппаратных средств) соответствующих уровней должна быть управляемой и осуществляться автоматически с предупреждением участников движения об изменениях в технологии реализации движения поездов. Аналогично должно производиться обратное действие по восстановлению полной функциональности системы под контролем оперативного персонала с предупредительными сообщениями участникам движения с подтверждением переходов между режимами работы и соответствующей передачи управления.

Реализация АСКУ ДПМ позволяет повысить эффективность эксплуатации метрополитенов и качество процесса управления движением поездов.

Библиографический список

1. About UrbanRail.Net. – Электронный ресурс [режим доступа: <http://www.urbanrail.net/about.htm#definition>, 26.02.2021 г.].
2. Метрополитен в цифрах. – Электронный ресурс [режим доступа: <https://mosmetro.ru/press/digits/>, 26.02.2021 г.].
3. Баранов Л. А., Головичер Я. М., Ерофеев Е. В., Максимов В. М. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава. – Под ред. Л. А. Баранова. – М.: Транспорт, 1990. – 272 с.
4. Su S., Tang T., Li Z., Gao Z. Optimization of Multitrain Operations in a Subway System // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2014. – Vol. 15. – Issue 2. – Pp. 673–684. – DOI: 10.1109/TITS.2013.2285737.
5. Баранов Л. А., Доцатов Д. А. Регулирование времени хода по перегону поезда метрополитена // Наука и техника транспорта. – 2018. – Т. 16. – № 3. – С. 55–59.
6. Баранов Л. А. Беспилотная система управления движением поездов как составляющая цифровизации городского транспорта // Автоматика на транспорте. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 441–449.
7. Балакина Е. П. Принципы построения алгоритмов системы поддержки принятия решений поездному диспетчеру // Наука и техника транспорта. – 2008. – № 2. – С. 23–26.
8. Баранов Л. А., Балакина Е. П. Перспективы использования многофункциональных моделей // Мир транспорта. – 2012. – № 2. – С. 70–74.
9. Xiong G., Shen D., Dong X., Hu B., Fan D., Zhu F. Parallel Transportation Management and Control System for Subways // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2017. – Vol. 18. – Issue 7. – Pp. 1974–1979. – DOI: 10.1109/TITS.2016.2622282.
10. Аверченков Е. О., Данько С. В. Актуальные задачи модернизации системы управления движением поездов Московского метрополитена // Наука и технологии железных дорог. – 2017. – № 2. – С. 11–22.
11. Концепция создания автоматизированной системы комплексного управления движением поездов ГУП «Московский метрополитен» (АСКУ ДПМ). – Москва, 2019, 68 с.
12. ПНСТ МЭК 62290-2:2014. Железные дороги. Управление городским транспортом и системы команд/регулирования. Часть 2. Спецификация функциональных требований, раздел 4. Москва, СтандартИнформ (IEC 62290-2:2014, Railway applications – Urban guided transport management and command/control systems – Part 2: Functional requirements specification).
13. Theeg G., Vlasenko S. Railway Signalling & Interlocking: 3ed Edition // Germany, Leverkusen PMC Media House GmbH, 2020. – 552 p.
14. Smith D. J., Simpson K. G. L. Functional safety: A Straightforward Guide to IEC 61508 and Related Standards. – Butterworth-Heinemann; 1st edition (June 26, 2001). – 208 p.

E. O. Averchenkov*JSC Transmashholding, Moscow***L. A. Baranov, PhD in Technical Sciences***Department of Information Management and Protection, Russian University of Transport***M. A. Shevchenko***Technical Policy Service, State Unitary Enterprise "Moscow Metro"***FUNCTIONAL STRUCTURE OF THE SUBWAY TRAIN TRAFFIC CONTROL SYSTEM COMPLEX**

The main architectural aspects of metro train traffic control systems are presented. The structure of train traffic control processes is presented with the example of the State Unitary Enterprise "Moscow Metro" and the main tasks that need to be solved to achieve high levels of automation of train traffic control in subways are described. A functional structure of a complex of metro train traffic control systems is presented, covering the levels of organization and planning of train traffic, operational traffic control and direct executive systems. The relationship between objects of automation and remote control of train movement, devices of the operational level and systems of organization and planning of movement are shown. The necessity of re-equipping the metro with means of ensuring transport safety and linking them with traffic control systems such as: means of informing passengers, providing the possibility of promptly informing passengers both during normal operation of the transport system and in case of emergency situations, means of communication "passenger – control center (situation center)" is shown. The latter ensures interaction between passengers and operational personnel of the subway, and if necessary, video surveillance equipment that provides enhanced remote control of the current situation in the interior of rolling stock cars and on platforms. The use of complex systems for controlling the movement of trains in subways increases the efficiency of their use by increasing the throughput and carrying capacity, accurate fulfillment of the traffic schedule and the possibility of its rapid recovery in case of failures. At the same time, traffic safety increases by reducing the likelihood of dangerous train convergence, and also the energy consumption for train traction is reduced due to the choice of energy-optimal train control modes and the optimal distribution of travel time along the line by the criterion of minimum energy consumption for the duration of travel along the tracks.

Automation of train traffic in subways, organization and management of train traffic, automated mobility, train traffic control system complex

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-3-343-361

References

1. About UrbanRail.Net. Electronic resource [<http://www.urbanrail.net/about.htm#S>, accessed: 26.02.2021].
2. Metropolitien v tsifrakh [Subway in numbers]. Electronic resource [<https://mosmetro.ru/press/digits/>, accessed: 26.02.2021].
3. Baranov L. A., Erofeev E. V., Maksimov V. M., Golovicher Y. M. (1990) *Mikroprotsessornyye sistemy avtovedeniya elektropodvizhnogo sostava* [Microprocessor-based automatic driving systems for electric rolling stock]. Under general editorship of L. A. Baranov, Moscow, Transport Publ., 272 p. (In Russian)

4. Su S., Tang T., Li Z., Gao Z. (2014) Optimization of Multitrain Operations in a Subway System. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 15, iss. 2, pp. 673–684. DOI: 10.1109/TITS.2013.2285737.
5. Baranov L. A., Doshchatov D. A. (2018) Regulirovaniye vremeni khoda po peregonu poyezda metropolitena [Regulation of the travel time on the passage of a subway train]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology in Transport], vol. 16, no. 3, pp. 55–59. (In Russian)
6. Baranov L. A. (2019) Bepilotnaya sistema upravleniya dvizheniyem poyezdov kak sostavlyayushchaya tsifrovizatsii gorodskogo transporta [Unmanned train traffic control system as a component of urban transport digitalization]. *Avtomatika na transporte* [Automation on Transport], vol. 5, no. 4, pp. 441–449. (In Russian)
7. Balakina E. P. (2008) Printsipy postroyeniya algoritmov sistemy podderzhki prinyatiya resheniy poyezdnomu dispatcheru [Principles of algorithms construction of system of support decision making for a train dispatcher]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology in Transport], no. 2, pp. 23–26. (In Russian)
8. Baranov L. A., Balakina E. P. (2012) Perspektivy ispol'zovaniya mnogofunktsional'nykh modeley [Prospects for multifunction models]. *Mir transporta* [World of Transport and Transportation Journal], no. 2 pp. 70–74. (In Russian)
9. Xiong G., Shen D., Dong X., Hu B., Fan D., Zhu F. (2017) Parallel Transportation Management and Control System for Subways. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, iss. 7, pp. 1974–1979. DOI: 10.1109/TITS.2016.2622282.
10. Averchenkov E. O., Danko S. V. (2017) Aktualnye zadachi modernizatsii sistemy upravleniya dvizheniyem poyezdov Moskovskogo metropolitena [Actual problems of modernization of the system control the movement of trains of the Moscow Subway]. *Nauka i tekhnologii zheleznnykh dorog* [Science and technology of railways], no. 2, pp. 11–22. (In Russian)
11. Kontseptsiya sozdaniya avtomatizirovannoy sistemy kompleksnogo upravleniya dvizheniyem poyezdov GUP «Moskovskiy metropoliten» (ASKU DPM) [The concept of creating an automated system for the integrated traffic control of trains of the State Unitary Enterprise “Moscow Subway” (automatic dispatcher control system of underground train services)]. Moscow, 2019, 68 p. (In Russian)
12. PNST MEK 62290-2:2014. Zheleznnyye dorogi. Upravleniye gorodskim transportom i sistemy komand/regulirovaniya. Chast 2. Spetsifikatsiya funktsional'nykh trebovaniy, razdel 4. Moskva, StandartInform [IEC 62290-2:2014, Railway applications – Urban guided transport management and command/control systems – Part 2: Functional requirements specification].
13. Theeg G., Vlasenko S. (2020) Railway Signalling & Interlocking: 3ed Edition. Germany, Leverkusen PMC Media House GmbH, 552 p.
14. Smith D. J., Simpson K. G. L. (2001) Functional safety: A Straightforward Guide to IEC 61508 and Related Standards. Butterworth-Heinemann, 1st edition, 208 p.

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

Поступила в редакцию 10.03.2021, принята к публикации 02.04.2021

Информация об авторах

АВЕРЧЕНКОВ Егор Олегович – руководитель направления систем автоматизации движения Дирекции по развитию городского транспорта АО «Трансмашхолдинг», Москва
e_g_o_r@mail.ru

БАРАНОВ Леонид Аврамович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление и защита информации» Российского университета транспорта, Москва
baranov.miit@gmail.com

ШЕВЧЕНКО Максим Анатольевич – заместитель главного инженера, начальник Службы технической политики ГУП «Московский метрополитен», Москва
sokol73@inbox.ru

© Аверченков Е. О., Баранов Л. А., Шевченко М. А., 2021

УДК 681.518.5:004.052.32

А. Б. Никитин, докт. техн. наук

А. Н. Ковкин, канд. техн. наук

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

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ В СИСТЕМЕ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ МПЦ-МПК

В статье рассмотрены принципы построения и практическая реализация бесконтактных устройств сопряжения на основе силовых преобразовательных схем для управления стрелочными приводами с трехфазными асинхронными двигателями переменного тока и приводами электромеханических автостопов на железных дорогах и метрополитенах в системе микропроцессорной централизации МПЦ-МПК, разработанной специалистами Петербургского университета путей сообщения. Описаны общие принципы обеспечения безопасности силовых модулей, реализующих непосредственное управление напольными объектами, особенности построения силовой схмотехники, а также узлов, осуществляющих функции контроля текущего состояния управляемых устройств и проверки исправности линейных цепей. Особое внимание уделено вопросам логической обработки управляющих сигналов, формирования управляющих воздействий для силовых ключей преобразовательной схемы, реализации управления двигателями с использованием трех- и пятипроводной рабочей цепи, контроля положения стрелочного перевода и механизма автостопа с применением кодовых сигналов. Затронуты вопросы практической реализации обнаружения обрывов рабочей цепи в периоды времени между переводом стрелок и изменением состояния электромеханических автостопов. Приведены основные технические характеристики силового модуля, сведения об используемой элементной базе и особенностях конструктивной реализации аппаратуры.

Микропроцессорная централизация, бесконтактные устройства сопряжения, силовой модуль, безопасный логический элемент, генератор управляющих сигналов, преобразовательная схема, гальваническая развязка, контроль положения стрелки, контроль рабочей цепи

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-3-362-378

Введение

Современные системы железнодорожной автоматики и телемеханики представляют собой программно-аппаратный комплекс, безопасность которого достигается путем реализации многоканальной структуры и использования в устройствах сопряжения с исполнительными объектами специальных технических решений, исключающих ложную активизацию объектов при возникновении отказов [1, 2]. Известны различные способы построения устройств сопряжения для безопасных систем управления. Наиболее простой и очевидный путь реализации безопасного сопряжения с объектами – построение аппаратуры сопряжения на основе реле первого класса надежности [3]. Принцип применяется в отечественных разработках [4], но в силу значительных

габаритов аппаратуры, ограниченной возможности использования печатного монтажа и необходимости периодического обслуживания не может рассматриваться в качестве перспективного направления. Зарубежные разработчики используют для сопряжения с объектами иные решения, в которых не задействована элементная база, обладающая свойствами реле первого класса [5]. Одним из вариантов является применение малогабаритных реле с жестко связанными контактными группами (safety relay), адаптированных для печатного монтажа, что позволяет создавать относительно компактные и технологичные устройства сопряжения, безопасность которых основана на дублировании реле и реализации контроля фактического размыкания контактов [6]. Этот подход осложняется тем, что указанные реле выпускаются сравнительно небольшим количеством зарубежных производителей и не имеют отечественных аналогов. Поэтому перспективным направлением развития микропроцессорных систем железнодорожной автоматики в нашей стране считается использование бесконтактных устройств сопряжения [7]. основополагающие принципы обеспечения безопасности при бесконтактном управлении объектами хорошо известны. Безопасность при возникновении отказов достигается либо путем тестирования полупроводниковых ключей с гарантированным отключением питания при обнаружении отказа, либо за счет преобразовательных схем, формирующих напряжение для исполнительных объектов в процессе динамической работы полупроводниковых коммутационных элементов. На современном этапе представляют интерес способы практической реализации бесконтактных устройств сопряжения, а также вопросы, связанные с контролем состояния напольных объектов без использования релейно-контактной элементной базы.

Одной из передовых разработок в области железнодорожной автоматики, предусматривающих бесконтактное сопряжение с напольными объектами, стала система МПЦ-МПК (микропроцессорная централизация на основе микро-ЭВМ и программируемых контроллеров), созданная специалистами Петербургского университета путей сообщения [8]. Система предназначена для централизованного управления стрелками и сигналами на станциях магистрального и промышленного железнодорожного транспорта, а также на линиях метрополитенов. Для бесконтактного сопряжения с объектами используются функциональные преобразователи с несимметричным отказом, получающие питание от источников постоянного напряжения. Такой принцип бесконтактного сопряжения не требует программно-аппаратной реализации контроля исправности полупроводниковых коммутационных элементов и удачно сочетается с современными системами бесперебойного электропитания на основе шины постоянного тока. Вместе с тем применение преобразовательных устройств требует особого внимания к вопросам энергетической эффективности технических решений и безопасности при управлении удаленными объектами [9].

В современных системах автоматики взаимодействие между вычислительными средствами и устройствами сопряжения осуществляется с помощью стан-

дартных интерфейсов, предусматривающих минимальное количество физических цепей. Это определяет необходимость использования в составе устройств сопряжения программируемой элементной базы, реализующей последовательный обмен данными. В системе МПЦ-МПК сопряжение вычислительного комплекса с объектами управления и контроля происходит за счет *контроллеров безопасного сопряжения с объектами (КБСО)*. В состав КБСО входит *контроллерный модуль*, являющийся частью вычислительных средств и обеспечивающий взаимодействие аппаратуры сопряжения и *центральной вычислительной системы* с помощью последовательного интерфейса, и набор *силовых модулей*, непосредственно управляющих напольными объектами. Отличительная черта бесконтактных устройств сопряжения – специфичность силовой аппаратуры, управляющей различными типами исполнительных объектов. Здесь рассматриваются особенности построения силовых модулей, которые управляют трехфазными асинхронными двигателями в составе электроприводов, используемых на объектах железнодорожного транспорта и метрополитена.

1. Общие принципы построения силовой аппаратуры в системе микропроцессорной централизации МПЦ-МПК

Безопасность системы МПЦ-МПК обеспечивает дублированная вычислительная структура, управляющая объектами по принципу «два из двух», согласно которому активизация исполнительного объекта возможна лишь при наличии соответствующих управляющих сигналов на выходах двух вычислительных комплексов. Для осуществления этого принципа в системах железнодорожной автоматики используются различные по схемным решениям безопасные логические элементы, реализующие функцию «И» [10, 11]. В системе МПЦ-МПК безопасные логические элементы (БЛЭ) входят в состав силовых модулей, бесконтактно управляющих стрелками и светофорами (рис. 1).

Входными сигналами силовых модулей являются периодические импульсные последовательности с частотой 10 кГц, поступающие от двухканальной вычис-

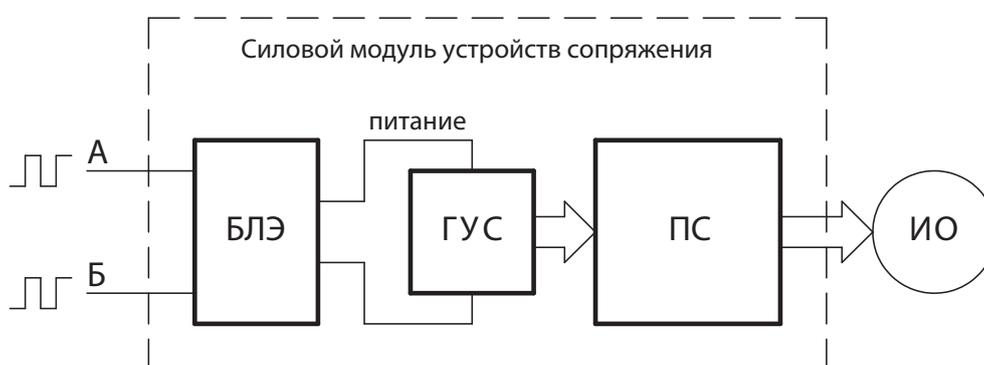


Рис. 1. Структура управляющей схмотехники силовых модулей системы МПЦ-МПК

лительной структуры. Когда динамические сигналы присутствуют на обоих входах, на выходе БЛЭ возникает постоянное напряжение. Оно обеспечивает питание генератора управляющих сигналов (ГУС), формирующего импульсы, управляющие силовыми ключами преобразовательной схемы (ПС). Напряжение, формируемое ПС, активирует исполнительный объект (ИО).

При отсутствии динамического сигнала хотя бы на одном из входов силового модуля постоянного напряжения на выходе БЛЭ нет, питание на схему ГУС не подается, все силовые ключи ПС не получают управляющих воздействий, что является необходимым и достаточным условием для гарантированного нахождения ИО в выключенном состоянии. Принципиально важный момент: ПС под воздействием сигналов от схемы ГУС формирует переменное напряжение низкой частоты. Это позволяет минимизировать взаимные влияния в кабельной сети при управлении удаленными объектами и обеспечить нормальное функционирование двигателей переменного тока. Схемотехника БЛЭ работает на высоких частотах, таким образом достигается сокращение габаритов элементной базы.

Основным требованием к безопасным логическим элементам, применяемым в дублированных безопасных структурах, можно считать исключение формирования выходного сигнала при отсутствии динамического сигнала хотя бы на одном из входов, вне зависимости от наличия отказов в схеме. Указанное требование определяет необходимость использования схемных решений с однонаправленным отказом. В системе МПЦ-МПК безопасность логического элемента достигается за счет преобразовательных схем [12, 13]. Функциональная схема БЛЭ приведена на рис. 2.

В состав схемы входят три преобразователя – два входных и один выходной. Входные предназначены для контроля наличия динамических сигналов

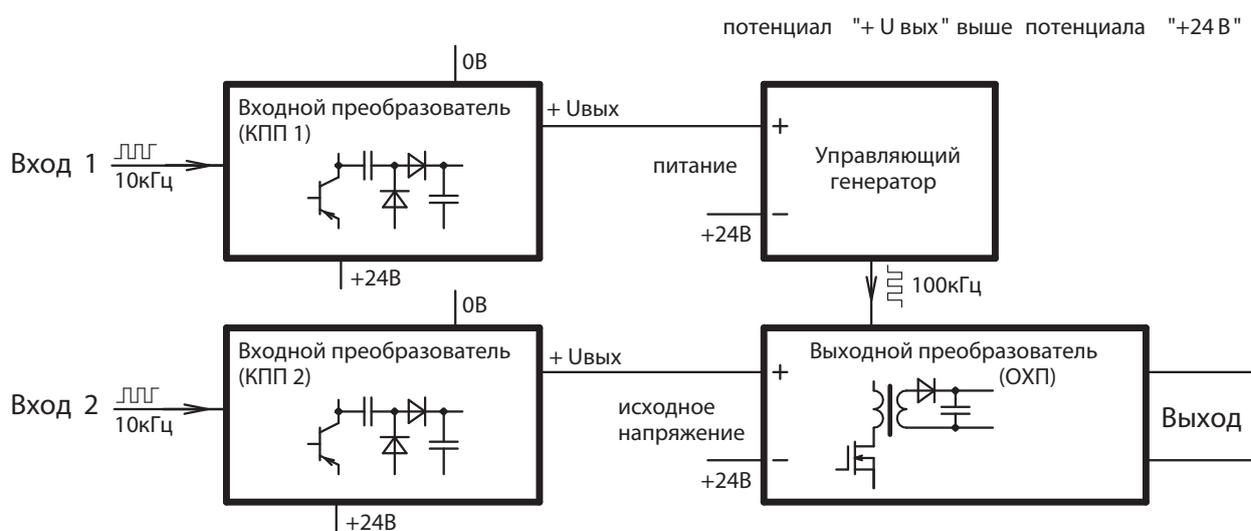


Рис. 2. Функциональная схема БЛЭ

на входах БЛЭ и представляют собой конденсаторные преобразователи полярности (КПП), широко используемые в различных схемотехнических решениях с несимметричным отказом. Выходной преобразователь формирует постоянное напряжение и представляет собой обратноходовой преобразователь (ОХП), включающий в себя малогабаритный импульсный трансформатор. При поступлении на входы БЛЭ динамических сигналов от вычислительной системы КПП создают постоянные напряжения заданной полярности.

Напряжение с выхода КПП1 питает управляющий генератор, который обеспечивает переключение коммутационного элемента в схеме выходного преобразователя. Напряжение с выхода КПП2 преобразуется в схеме ОХП и поступает на выход БЛЭ. Если на одном из входов БЛЭ нет динамического сигнала, выходной преобразователь не получает либо управляющего воздействия, либо исходного напряжения для преобразования, а значит, постоянное напряжение на выходе БЛЭ будет отсутствовать.

2. Силовой модуль для управления приводами

Непосредственное управление стрелочными приводами железных дорог и метрополитенов в системе МПЦ-МПК производится с помощью силовых модулей СТ-1-2. На метрополитенах такой модуль управляет приводами электромеханических автостопов. Силовой модуль обеспечивает управление трехфазным асинхронным электродвигателем мощностью до 0,3 кВт и контролирует положение напольного объекта. Принцип безопасного управления двигателем состоит в использовании трехфазного мостового инвертора, силовые ключи которого работают в низкочастотном режиме и создают ступенчатое прямоугольное напряжение при условии поступления соответствующих управляющих сигналов от вычислительных средств [14, 15].

Силовой модуль взаимодействует с контроллерным в составе КБСО с помощью динамических сигналов. Управляющие сигналы, переводящие стрелку, представляют собой импульсные последовательности частотой 10 кГц. В силовом модуле идет логическая обработка управляющих сигналов с реализацией функции «И», что дает возможность использовать данное изделие в безопасной структуре управления «два из двух» без каких-либо дополнительных логических устройств.

Питание силового модуля осуществляется постоянным напряжением от двух изолированных источников — логического и силового. Номинальное напряжение логического питания составляет 24 В. Напряжение питания силовых схем зависит от параметров двигателя в составе привода и протяженности линейной цепи. Для стрелочных приводов величина напряжения питания модуля равняется 285 или 300 В (определяется удаленностью привода от поста централизации) [15]. При управлении приводами автостопов напряжение питания модуля должно иметь величину от 150 до 185 В.

Функциональная схема силового модуля СТ-1-2 приведена на рис. 3. Модуль состоит из двух независимых узлов – управляющего и контрольного. Управляющий включает в себя два БЛЭ, занимающихся логической обработкой сигналов. Каждый БЛЭ инициирует вращение двигателя в одном из направлений. Генератор управляющих сигналов и мостовая схема преобразования составляют инвертор, формирующий напряжение для двигателя. Помимо управляющей схемотехники, в состав инвертора входят диагностические схемы. Они порождают аналоговые сигналы, пропорциональные току перевода стрелки, и контролируют исправность рабочей цепи.

Генератор управляющих сигналов выполнен на основе микроконтроллеров, которые обеспечивают работу силовых ключей схемы преобразования в низкочастотном режиме без использования широтно-импульсной модуляции. Питает генератор энергия выходного сигнала БЛЭ, что исключает возможность ложного формирования трехфазного напряжения при отсутствии динамических сигналов на управляющих входах силового модуля. Преобразовательная схема модуля имеет гальваническую связь с цепью напольного объекта. Надежное функционирование генератора управляющих сигналов в указанных условиях обеспечивается за счет оптоэлектронной развязки.

Мостовая схема преобразования реализована с использованием биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT). Применение IGBT обусловлено необходимостью минимизировать потери энергии на ключах в условиях высокого рабочего напряжения нагрузки инвертора [16–20]. Транзисторы управляются с помощью драйверных микросхем, производящих привязку управляющих импульсов к плавающему потенциалу эмиттера верхних ключей мостовой схемы без использования трансформаторов [21].

Специфика мостовой схемы преобразования в составе модуля СТ-1-2 заключается в наличии 10 силовых полупроводниковых ключей. Это обеспечивает универсальность силового модуля, т. к. появляется возможность построения рабочих цепей с разным количеством проводов. Реверсирование двигателя происходит путем изменения порядка чередования фаз, определяемого алгоритмом управления силовыми ключами. Особенность схем управления приводами в системе МПЦ-МПК – отсутствие контактов автопереключателя в рабочей цепи. Остановка двигателя по окончании работы привода осуществляется на уровне программного обеспечения по факту получения контроля требуемого положения управляемого напольного объекта.

Принцип построения рабочих цепей с тремя и пятью проводами, а также временные диаграммы работы силового модуля при различных направлениях работы двигателя показаны на рис. 4.

Реализация рабочей цепи с пятью проводами показана на примере привода электромеханического автостопа, используемого на метрополитенах [22]. Особенность электрической схемы автостопа – наличие контактов, состояние которых определяется текущим положением привода. Для открытия и закрытия

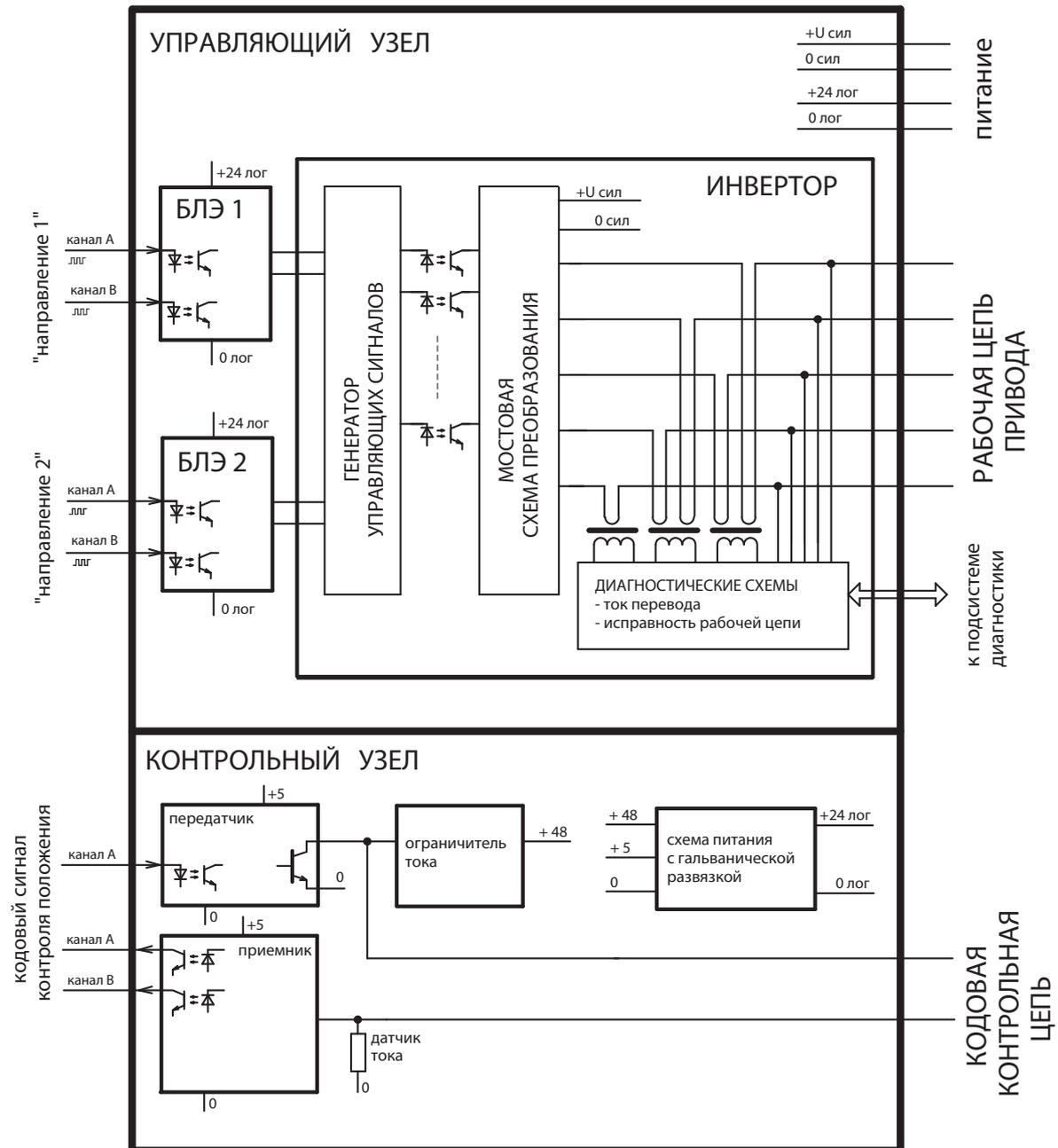


Рис. 3. Функциональная схема модуля СТ-1-2

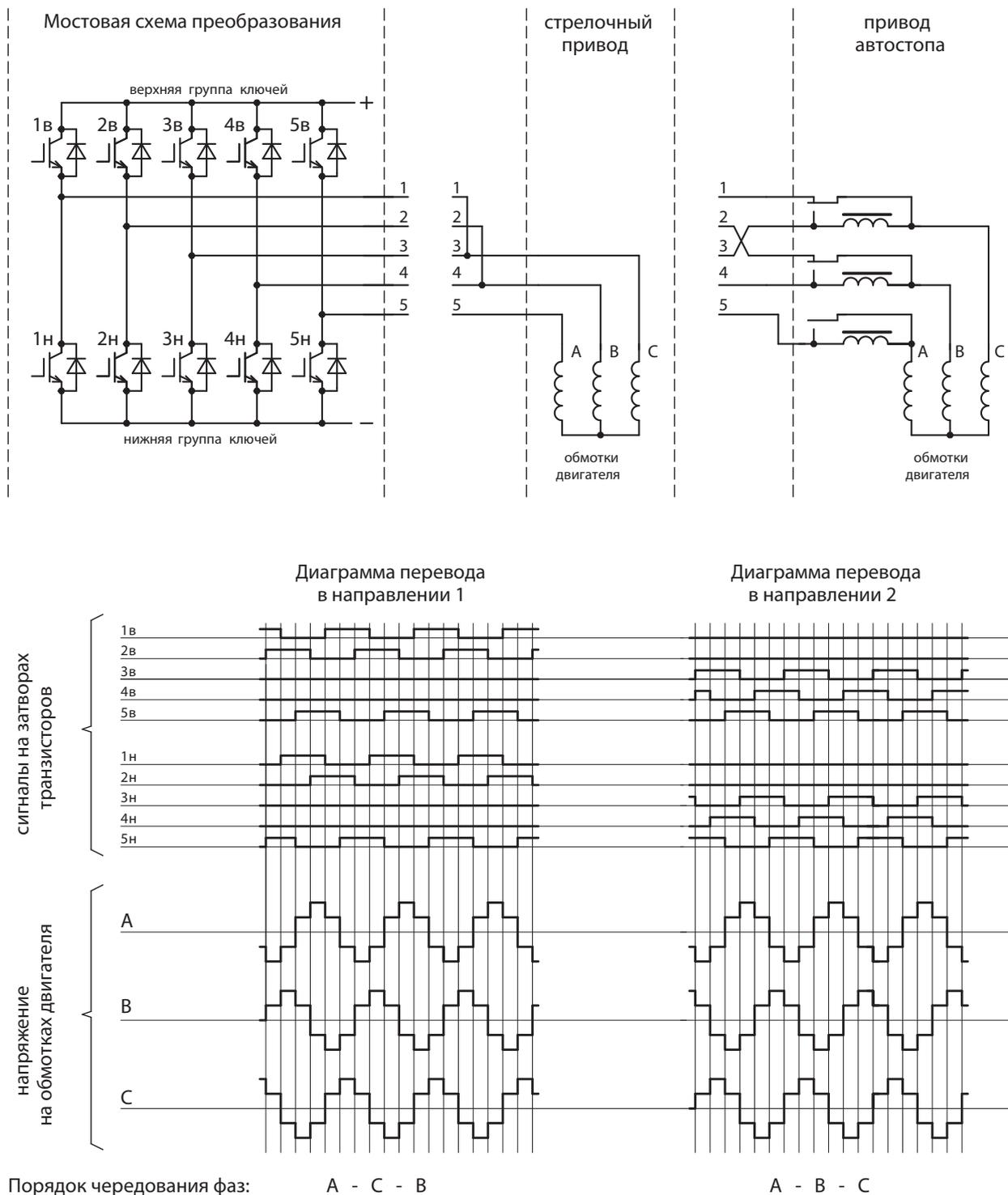


Рис. 4. Упрощенная схема рабочей цепи и временная диаграмма работы инвертора

автостопа необходимы разные пары проводов. Чтобы открыть автостоп и удерживать механизм в открытом состоянии, нужны провода 3, 4, 5. При завершении открытия контакты принимают положение, показанное на рисунке, и после по-

дачи напряжения на провода 1, 2, 5 автостоп возвращается в закрытое состояние. Дроссели в схеме привода ограничивают ток в режиме удержания открытого автостопа.

Для контроля положения стрелочного перевода или привода автостопа используется кодовая контрольная цепь, разработанная для системы МПЦ-МПК [23]. Основу цепи составляют электронные кодовые датчики ДСТ, размещенные в непосредственной близости от напольного объекта и коммутируемые контактами, предусмотренными в конструкции привода. Контроллерный модуль в составе КБСО периодически посылает на датчики ДСТ запрос в виде кодовой комбинации. Датчики обрабатывают запрос и отправляют на контроллерный модуль ответную кодовую комбинацию, на основании которой программное обеспечение определяет положение стрелки или привода автостопа. Питание датчиков ДСТ и передача кодовых комбинаций в обоих направлениях идут по отдельной двухпроводной контрольной цепи.

Контрольный узел силового модуля СТ-1-2 (рис. 3) представляет собой схему, реализующую двунаправленную передачу информации между контроллерным модулем и кодовыми датчиками ДСТ по двухпроводной линейной цепи с номинальным напряжением 48 В. По той же цепи производится питание датчиков ДСТ. Контрольный узел включает в себя приемник, передатчик и ограничитель тока. Питание контрольного узла осуществляется через схему, обеспечивающую формирование необходимых напряжений и гальваническую развязку контрольной цепи привода и источника логического питания силового модуля. Напряжение 48 В через ограничитель тока поступает в контрольную цепь привода, питая датчика ДСТ. Обратный провод контрольной цепи подключен к источнику питания через резистор – датчик тока. Передатчик транслирует код от контроллерного модуля на датчик ДСТ путем периодического шунтирования контрольной цепи.

После получения запроса датчик ДСТ формирует ответный код шунтированием контрольной цепи на дальнем конце линии (около привода). В результате увеличения тока в контрольной цепи при шунтировании схемой ДСТ на датчике тока выделяется сигнал, поступающий через схему приемника на контроллерный модуль. В схемах передатчика и приемника реализована оптоэлектронная развязка. Ограничитель тока исключает чрезмерное повышение тока, потребляемого от схемы питания при шунтировании контрольной цепи в процессе передачи кодов.

3. Реализация контроля исправности рабочей цепи в периоды времени между переводами стрелок

Одним из эффективных методов контроля исправности цепи управления двигателем является контроль протекания тока при подключении источника напряжения. Поскольку силовой модуль СТ-1-2 предназначен для управления

асинхронным двигателем переменного тока и рабочая цепь отделена от контрольной цепи, целесообразно использовать постоянное напряжение. В этом случае проще обеспечить работоспособность схемы контроля на длинных кабельных линиях, имеющих значительную емкость.

Схема контроля рабочей цепи в составе модуля СТ-1-2 дает возможность обнаруживать обрывы цепи управления и обмоток двигателя электропривода и выявлять разомкнутое состояние блок-контактов в приводе в периоды времени, когда привод не используется. Принципиальная схема описываемого технического решения приведена на рис. 5. Схема контроля рабочей цепи входит в состав инвертора и состоит из четырех одинаковых узлов контроля, что позволяет обнаруживать отказы в трех- и пятипроводной цепи управления двигателем. На рисунке в целях упрощения изображено только два узла – достаточно для пояснения принципа работы схемы.

Постоянное напряжение подается в контролируемую цепь через DC/DC-конвертер с гальванической развязкой, что исключает объединение рабочих цепей разных приводов через источник питания схем контроля. Узлы контроля подключаются к каждому проводу рабочей цепи, кроме одного, соединенного непосредственно с положительным выводом DC/DC-конвертера. Когда рабочая цепь исправна, ток от положительного полюса DC/DC-конвертера протекает через рабочую цепь привода и элементы FU, VD, VT1, R_{дт} узлов контроля на отрицательный полюс. Напряжение с датчиков тока R_{дт} через интегриру-

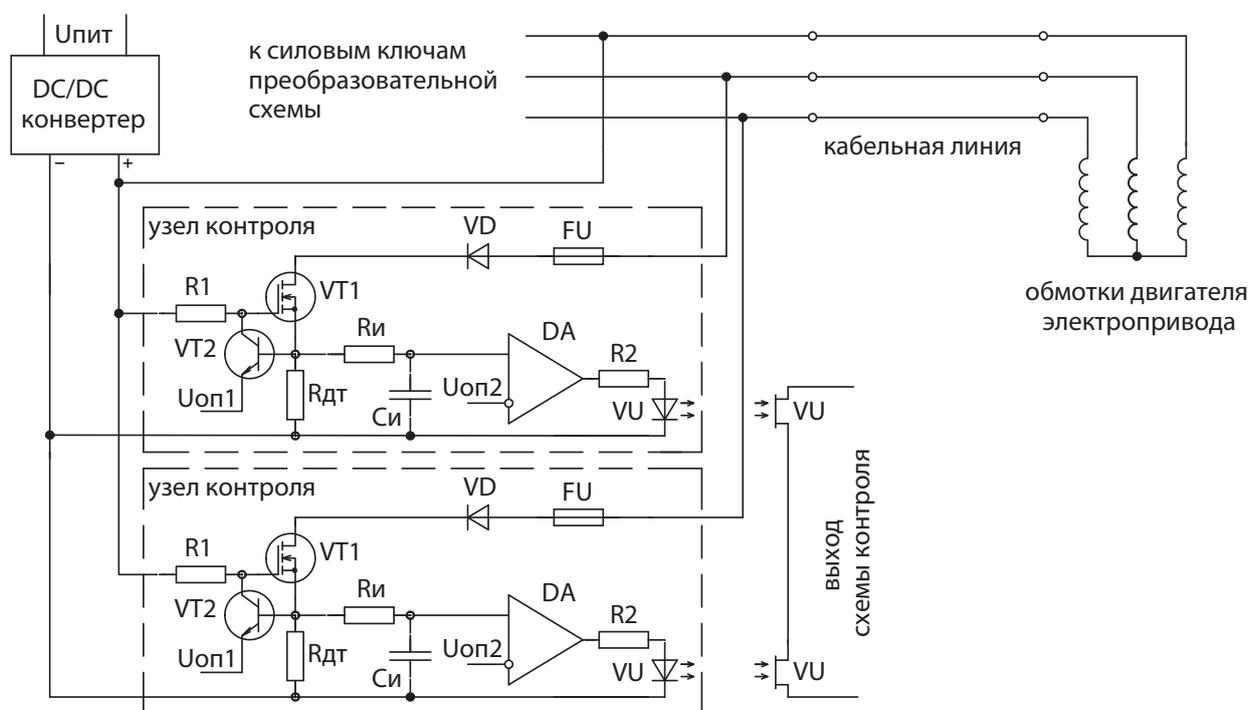


Рис. 5. Принцип реализации контроля исправности рабочей цепи на примере трехпроводной схемы управления двигателем

щие цепи $R_{и}$, $C_{и}$ поступает на входы компараторов, реализованных на основе операционных усилителей. Указанное напряжение превышает опорное напряжение $U_{оп2}$, на выходе компараторов формируется высокий потенциал. Ток протекает через светодиоды оптронов, в результате чего транзисторы в составе оптронов замыкают выходную цепь схемы контроля. Если в рабочей цепи стрелочного привода имеется обрыв, в цепи хотя бы одного узла контроля не будет тока, а значит, соответствующий оптрон разомкнет выходную цепь. Параметры компаратора определяются величиной опорного напряжения $U_{оп2}$ и обеспечивают работоспособность схемы на кабельных линиях любой длины в пределах допустимой для аппаратуры управления электроприводом.

Рассматриваемая схема контроля не отключается от рабочей цепи в период работы двигателя электропривода. Чтобы предотвратить повреждение схемы контроля и шунтирование рабочей цепи, существует схема ограничения тока на транзисторах VT1 и VT2. Когда электропривод выключен, транзистор VT1 открыт в результате воздействия потенциала, поступающего через резистор R1. Ток через транзистор VT1 определяется значением напряжения на датчике тока, при котором транзистор VT2 остается в закрытом состоянии. Если при работе двигателя возникают условия для увеличения тока через узел контроля, напряжение на датчике тока превысит опорное напряжение $U_{оп1}$, транзистор VT2 будет открываться и шунтировать цепь затвора VT1, поддерживая установленное значение тока. При воздействии противоположной полярности напряжения протекание тока через узел контроля исключается за счет наличия диодов VD.

Интегрирующие цепи $R_{и}$, $C_{и}$ обеспечивают устойчивое обнаружение обрывов в рабочей цепи в условиях мешающего влияния со стороны других цепей через емкость кабельной линии. За счет интегрирующих цепей предотвращается ложное переключение компараторов под воздействием переменной составляющей, создаваемой источником влияния. Параметры интегрирующих цепей оптимизируются с учетом возможности подавления влияний частотой 50 Гц и достаточного быстродействия схемы контроля, помогающего обнаруживать кратковременные обрывы.

Предохранители FU предотвращают влияние отказов схемы контроля на возможность управления электроприводом. Благодаря предохранителям исключается шунтирование рабочей цепи при пробое транзисторов VT1 или диодов, а также при возникновении отказов элементов, ограничивающих ток. При возникновении перечисленных событий предохранители срабатывают под воздействием рабочего напряжения, создаваемого схемой управления приводом, и отключают отказавшие узлы контроля от рабочей цепи.

Заключение

Силовые модули аппаратуры сопряжения в составе системы МПЦ-МПК построены на основе преобразовательных схем, формирующих переменное

напряжение, необходимое для работы исполнительных объектов. Такое решение исключает зависимость от дефицитной элементной базы и хорошо сочетается с устройствами электропитания на основе шины постоянного тока. Безопасность аппаратуры при возникновении отказов достигается за счет того, что управление силовыми ключами преобразовательных схем осуществляется с помощью генераторов управляющих сигналов, которые получают питание от безопасных логических элементов «И», обрабатывающих сигналы в дублированной структуре управления.

Особенностью модулей, осуществляющих управление электроприводами переменного тока, является отсутствие трансформаторов в составе силовых преобразовательных схем, что обеспечивает малые габариты, высокую энергетическую эффективность и технологичность аппаратуры. Силовые модули формируют трехфазное напряжение ступенчатой прямоугольной формы без использования широтно-импульсной модуляции. Это позволяет существенно сократить потери энергии в преобразовательной схеме, в результате чего заметно уменьшается тепловыделение аппаратуры во время работы приводов.

Применение кодовой контрольной цепи исключает возможность получения ложного контроля положения стрелок при ошибочном подключении линейных проводов и обеспечивает высокую устойчивость контрольной схемотехники к воздействию дестабилизирующих факторов. Схемные узлы, контролирующие исправность рабочей цепи в периоды времени между переводами стрелок, помогают выявлять отказы цепи управления двигателем до того, как возникнет необходимость в использовании привода. Это уменьшает вероятность задержки поездов из-за неисправности аппаратных средств. Кроме того, появляется возможность выявлять предотказные состояния, выраженные в кратковременной потере контакта в цепях управления и контроля стрелочным электроприводом.

Отличительная черта аппаратуры управления электроприводами в системе МПЦ-МПК – универсальность в отношении типа напольного объекта и количества проводов в цепи управления двигателем. Область возможного применения силового модуля, рассмотренного в статье, не ограничивается управлением стрелочными приводами и приводами электромеханических автостопов. Можно адаптировать это техническое решение для управления устройствами заграждения на переездах, приводами разъединителей на линиях электроснабжения и другими приборами с асинхронными электродвигателями.

Конструктивная реализация аппаратуры МПЦ-МПК обеспечивает эффективное использование внутреннего пространства электротехнических шкафов, удобство монтажа и обслуживания в процессе эксплуатации. Силовые модули СТ-1-2 изготовлены в закрытых конструктивах «Евромеханика», позволяющих быстро заменять устройства. Силовой модуль 51×250×262 мм управляет одним электроприводом и контролирует положение управляемого напольного объекта. В состав стрелочного КБСО входит пять силовых модулей. Габариты стандартного электротехнического шкафа позволяют разместить до пяти стрелочных

КБСО, что позволяет управлять 25 стрелками. Высокие показатели надежности аппаратуры управления стрелками и автостопами подтверждаются многолетним опытом эксплуатации силовых модулей в составе системы МПЦ-МПК на станциях магистрального и промышленного железнодорожного транспорта и объектах Петербургского метрополитена.

Библиографический список

1. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Христов Х. А., Гавзов Д. В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / Под ред. Вл. В. Сапожникова. – М.: Транспорт, 1995. – 272 с.
2. Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Методы и принципы обеспечения безопасности микроэлектронных СЖАТ. РТМ 32 ЦШ 1115842.01–94. – СПб.: ПГУПС, 1994. – 120 с.
3. А. С. Переборов, М. П. Лисовский, А. А. Прокофьев. Построение устройств согласования электронных схем управления с исполнительными реле // Автоматика, телемеханика и связь. – 1982. – № 5. – С. 7–11.
4. С. С. Пресняк, А. С. Ершов, О. Л. Маковеев, А. В. Циркин. Микропроцессорная система централизации ЭЦ-ЕМ // Автоматика, связь, информатика. – 2000. – № 9.
5. В. Н. Алешин. Микропроцессорная централизация стрелок и сигналов системы Ebi-lock-950 // Автоматика, связь и информатика. – 2003. – № 1.
6. А. Б. Никитин, А. Н. Ковкин, А. Д. Манаков. Использование малогабаритных силовых реле в безопасных устройствах сопряжения компьютерных систем железнодорожной автоматики // Автоматика на транспорте. – 2018. – № 2. – Т. 4.
7. О. К. Дрейман, Д. В. Гавзов, М. В. Илюхин. Бесконтактные устройства сопряжения микропроцессорных систем железнодорожной автоматики с напольными объектами // Автоматика, телемеханика и связь. – 1991. – № 1. – С. 12–14.
8. В. В. Сапожников, А. Б. Никитин. Микропроцессорная система электрической централизации МПЦ-МПК // Наука и транспорт. – 2009. – С. 18–21.
9. Д. В. Гавзов, А. Н. Ковкин. Бесконтактные УСО для микропроцессорных централизаций // Проблемы безопасности функциональных преобразователей с несимметричным отказом. Сборник научных трудов. – СПб.: ПГУПС, 2004.
10. Х. А. Христов. Электронизация на осигурительная техника. – София: Техника, 1984. – 355 с.
11. Schiwiek L. W. Failsafe – Schaltungen mit LOGISAFE – Technik / Signal and Draht. – 1986. – № 9. – S. 192–197.
12. А. Н. Ковкин. Методы построения бесконтактных устройств сопряжения управляющего вычислительного комплекса с исполнительными объектами систем железнодорожной автоматики: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – СПб.: ПГУПС, 2005.
13. Патент на полезную модель № 114017 МПК В61L. Устройство для включения исполнительных устройств систем железнодорожной автоматики и телемеханики // А. Б. Никитин, А. Н. Ковкин, Н. Н. Балухев, О. А. Наседкин, Ю. А. Алешечкин. Начало действия патента 03.10.2011. Дата публикации 10.03.2012.
14. А. Н. Ковкин, А. М. Костроминов, Ю. И. Ефименко. Электронное управление электродвигателями в системах железнодорожной автоматики // Электротехника. – 2016. – № 5. – С. 61–65.

15. А. Н. Ковкин. Инверторы как средство безопасного управления двигателями стрелочных электроприводов // Автоматика на транспорте. – 2020. – № 2. – Т. 6. – С. 121–133.
16. Б.Ю. Семенов. Силовая электроника для любителей и профессионалов. – М.: «СОЛОН-Р», 2001. – 327 с.
17. А. Попов, С. Попов. Применение IGBT в преобразовательной технике // Новости электроники. – 2013. – № 5. – С. 35–46.
18. Blake C. and Bull Ch. IGBT or MOSFET: Choose Wisely. IR, 1999. – 5 p.
19. Chou W. Ultra-fast 1200V IGBTs reduce switching and conduction losses // Power Electronics, 31.08.2011.
20. IGBT Characteristics. Application Note AN-983. IR, 2012. – 16 p.
21. А. Булычев, К. Автушенко. Ключ на плечо! Особенности применения высоковольтных драйверов производства IR // Новости электроники. – 2013. – № 5. – С. 20–26.
22. А. Н. Ковкин. Бесконтактное управление электродвигателями в системах автоматике железных дорог и метрополитенов // Проблемы безопасности и надежности микропроцессорных комплексов: сборник трудов научно-практической конференции. – СПб.: ПГУПС, 2015. – С. 18–23.
23. Д. В. Ефанов, А. А. Блюдов. Повышение надежности датчиков контроля положения железнодорожных стрелок // Известия ПГУПС. – 2014. – № 3. – С. 69–77.

A. B. Nikitin, Doctor of Technical Sciences

A. N. Kovkin, PhD in Technical Sciences

*Department of Automation and Telemechanics on Railways,
Saint Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I*

ELECTRIC POINT MACHINES IN THE MICROPROCESSOR CONTROLLER AND MICROPROCESSOR INTERLOCKING SYSTEM

The article discusses the principles of construction and practical implementation of contactless bridging devices based on powered conversion circuits for point machines controlling in the microprocessor controller and microprocessor interlocking system with three-phase asynchronous motors and electromechanical train stop drives on railways and subways in the MPC-MPK microprocessor-based centralization system, developed by specialists of Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I. The general principles of ensuring the safety of power modules that implement direct control of floor-level objects, the features of the construction of powered circuit engineering, as well as units that carry out the functions of monitoring the current state of controlled devices and checking the health of circuit lines are described. Particular attention is paid to the issues of logical processing of control signals, the formation of control actions for the power keys of the converter circuit, the implementation of motor control using a three- and five-wire working circuit, control of the point operating gear position and the train stop drive mechanism using code signals. The questions of the practical implementation of the detection of breaks in the actuating circuit during the periods between switching of points and the change in the state of the electromechanical train stop drives are touched upon. The main technical characteristics of the power module, information about the used element base and the features of the constructive implementation of the equipment are given.

Computer-based interlocking, contactless bridging devices, power module, safe logic element, generator of control signals, conversion circuit, galvanic isolation, point operating gear control, actuating circuit control

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-3-362-378

References

1. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Khristov Kh. A., Gavzov D. V. (1995) *Metody postroyeniya bezopasnykh mikroelektronnykh sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki* [Methods of safe microelectronic systems constructing of railway automation]. Moscow, Transport Publ., 272 p. (In Russian)
2. *Bezopasnost zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki. Metody i printsipy obespecheniya bezopasnosti mikroelektronnykh SZHAT. RTM 32 TSSH 1115842.01-94* [Safety of railway automation and remote control. Methods and principles for ensuring the safety of microelectronic compressed air systems. RTM 32 TsSh 1115842.01-94]. Saint Petersburg, St. Petersburg State Transport University, 1994, 120 p. (In Russian)
3. Pereborov A. S., Lisovsky M. P., Prokofiev A. A. (1982) Postroyeniye ustroystv soglasovaniya elektronnykh skhem upravleniya s ispolnitel'nymi rele [Construction of devices for matching electronic control circuits with executive relays]. *Avtomatika, telemekhanika i svyaz* [Automation, remote control and communication], no. 5, pp. 7–11. (In Russian)
4. Presnyak S. S., Ershov A. S., Makoveev O. L., Tsirkin A. V. (2000) Mikroprotsessornaya sistema tsentralizatsii ETS-EM [Microprocessor system of centralization of EC-EM] *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, communication, informatics], no. 9. (In Russian)
5. Aleshin V. N. (2003) Mikroprotsessornaya tsentralizatsiya strelok i signalov sistemy Ebilock-950 [Microprocessor-based centralization of arrows and signals of the Ebilock-950 system]. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, communication, informatics], no. 1. (In Russian)
6. Nikitin A. B., Kovkin A. N., Manakov A. D. (2018) Ispolzovaniye malogabaritnykh silovykh rele v bezopasnykh ustroystvakh sopryazheniya komp'yuternykh sistem zheleznodorozhnoy avtomatik [Using the small-sized power relays for design of safe interface devices within the computer systems of railway automation]. *Avtomatika na transporte* [Automation on Transport], no. 2, vol. 4.
7. Dreiman O. K., Gavzov D. V., Ilyukhin M. V. (1991) Beskontaktnyye ustroystva sopryazheniya mikroprotsessornykh sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki s napolnymi obyektami [Non-contact devices for interfacing microprocessor systems of railway automation with floor objects]. *Avtomatika, telemekhanika i svyaz* [Automation, remote control and communication], no. 1, pp. 12–14.
8. Sapozhnikov V. V., Nikitin A. B. 2009 Mikroprotsessornaya sistema elektricheskoy tsentralizatsii MPTS-MPK [Microprocessor system of electric centralization MPCMPK]. *Nauka i transport* [Science and transport], no. 5, pp. 18–21.
9. Gavzov D. V., Kovkin A. N. (2004) Beskontaktnyye USO dlya mikroprotsessornykh tsentralizatsij. Problemy bezopasnosti funktsionalnykh preobrazovatelej s nesimmetrichnym otkazom [Contactless USO for microprocessor centralization. Safety problems of functional converters with asymmetric failure], Collection of proceedings. St. Petersburg: Proceedings of Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university [PGUPS]. (In Russian)
10. Khristov K. (1984) Electronization of equipment. Sofia: Technics, 355 p. (In Bulgarian)

11. Schiwiek L. W. (1986) Failsafe – Schaltungen mit LOGISAFE – Technik. *Signal and Draht*, h. 9, s. 192–197. – Дата ведь должна идти перед названием? И вообще тут, похоже, что-то потерялось. В русском библи. списке было так: Schiwiek L.W. Failsafe Circuits with LOGISAFE technology / Signal and wire. – 1986. – № 9. – Pp. 192–197.
12. Kovkin A. N. (2005) *Metody postroyeniya beskontaktnykh ustroystv sopryazheniya upravlyayushchego vychislitel'nogo kompleksa s ispolnitel'nymi obyektami sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki*. Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Methods of constructing contactless devices for interfacing the control computer complex with the executive objects of the railway automation systems. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences]. Saint Petersburg, St. Petersburg State Transport University Publ. (In Russian)
13. Nikitin A. B., Kovkin A. N., Baluyev N. N., Nasedkin O. A., Aleshechkin Y. A. Patent na poleznyuyu model № 114017 MPK B61L. *Ustroystvo dlya vklyucheniya ispolnitel'nykh ustroystv sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki*. [Patent for utility model No. 114017 IPC B61L. Device for switching on actuators of railway automation and remote control systems]. Nachalo deystviya patenta 03.10.2011. Data publikatsii 10.03.2012. Date of publication 03.10.2012. (In Russian)
14. Kovkin A. N., Kostrominov A. M., Efimenko Yu. I. (2016) Elektronnoye upravleniye elektrodvigatelyamy [Electronic control of electric motors in railway automation systems]. *Elektrotehnika [Electrical engineering]*, no. 5, pp. 61–65. (In Russian)
15. Kovkin A. N. (2020) Invertory kak sredstvo bezopasnogo upravleniya dvigatelyami strelochnykh elektroprivodov [Invertors as means of secure control for electric switch mechanisms]. *Avtomatika na transporte [Automation on Transport]*, no. 2, vol. 6, pp. 121–133. (In Russian)
16. Semenov B. Yu. (2001) Silovaya elektronika dlya lyubiteley i professionalov [Power electronics for hobbyists and professionals]. Moscow, SOLON-R Publ., 327 p. (In Russian)
17. Popov A., Popov S. (2013) Primeneniye IGBT v preobrazovatelnoy tekhnike [Application of IGBTs in converter technology]. *Novosti elektroniki [Electronics News]*, no. 5, pp. 35–46. (In Russian)
18. Blake C., Bull C. (1999) IGBT or MOSFET: Choose Wisely. IR, 5 p.
19. Chou W. Ultra-fast 1200V IGBTs reduce switching and conduction losses. *Power Electronics*, 31.08.2011.
20. IGBT Characteristics. Application Note AN-983. IR, 2012, 16 p.
21. Bulychev A., Avtushenko K. (2013) Klyuch na plecho! Osobennosti primeneniya vysokovoltnykh draiverov proizvodstva IR [Shoulder arms! Application specificities of high voltage IR-production drivers]. *Novosti elektroniki [News of electronic engineering]*, no. 5, pp. 20–26. (In Russian)
22. Kovkin A. N. (2015) Beskontaktnoye upravleniye elektrodvigatelyamy v sistemakh avtomatiki zheleznykh dorog i metropolitenov [Contactless control of electric motors in systems of railway and subway automation]. *Problemy bezopasnosti i nadezhnosti mikroprotsessornykh kompleksov [Security and reliability issues of microprocessor-based complexes]*. Sbornik trudov nauchno-prakticheskoy konferentsii [Collected papers of research and training conference]. Saint Petersburg, Saint Petersburg State Transport University Publ., pp. 18–23. (In Russian)
23. Efanov D. V., Blyudov A. A. (2014) Povysheniye nadezhnosti datchikov kontrolya polozheniya zheleznodorozhnykh strelok [Increasing the reliability of position sensors of railway points], Collection of proceedings. St. Petersburg: Proceedings of Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university [PGUPS], no. 3, pp. 69–77. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии
профессором Л. А. Барановым
Поступила в редакцию 04.03.2021, принята к публикации 30.03.2021*

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

КОВКИН Алексей Николаевич — кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I
akovkin@yandex.ru

© Никитин А. Б., Ковкин А. Н., 2021

УДК 656.25

Д. В. Комнатный, канд. техн. наук

*Кафедра автоматики, телемеханики и связи,
Белорусский государственный университет транспорта,
Гомель (Белоруссия)*

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДОВ К СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИМПУЛЬСАМ ПРЕДНАМЕРЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Рассматривается проблема обеспечения устойчивости микропроцессорных систем железнодорожной автоматики к сверхширокополосным импульсам электромагнитного поля. Показана уязвимость современных микропроцессорных систем управления и обеспечения безопасности движения поездов к электромагнитным импульсам преднамеренного воздействия. Выделены особенности критичных к безопасности микропроцессорных систем железнодорожной автоматики, которые определяют отличие проблемы обеспечения устойчивости этих систем от той же проблемы в отношении информационных систем.

Электростатические разряды обладают наибольшей шириной частотного спектра. Они воздействуют на те же апертуры в корпусах технических средств микропроцессорных систем железнодорожной автоматики, что и импульсы преднамеренного воздействия. При падении электромагнитной волны импульса преднамеренного воздействия апертура выделяет этот импульс и передает его внутрь корпуса. Поэтому излучаемый внутрь корпуса импульс преднамеренного воздействия и импульс электростатического разряда могут быть сопоставлены по форме и амплитуде с помощью спектрально-энергетического условия эквивалентности. Рассмотрен расчет энергии и активной полосы частот импульсов, наиболее часто используемых в качестве импульсов преднамеренного воздействия. Продемонстрировано, что расчет активной полосы частот в инженерной практике производится путем построения интегральной кривой распределения энергии в спектре. Разработана методика косвенной оценки воздействия электромагнитного импульса преднамеренного воздействия по данным расчетного прогнозирования устойчивости к электростатическим разрядам.

В статье получен аналог уравнения силового подавления радиоэлектронных средств, который позволяет найти параметры генератора электромагнитных импульсов, создающего опасные для микропроцессорных систем железнодорожной автоматики импульсы. Приведено также выражение для интенсивности помех, характеризующей вклад электромагнитных импульсов преднамеренного воздействия в электромагнитную обстановку на месте расположения микропроцессорной аппаратуры железнодорожной автоматики.

Микропроцессорные системы железнодорожной автоматики, электромагнитный импульс преднамеренного воздействия, помехоустойчивость, киберзащищенность, энергия, электростатический разряд, эквивалентность импульсов, активная полоса частот, неоднородность корпуса, косвенная оценка воздействия

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-3-379-394

Введение

На современном этапе развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) происходит не просто широкое внедрение микропроцессорных и микроэлектронных систем, но переход к новым концепциям разработки и эксплуатации систем управления движением поездов — цифровизации и интеллектуализации [1]. Это объясняется необходимостью на новом уровне решить две основные задачи функционирования железнодорожного транспорта — по обеспечению высокого уровня безопасности движения поездов и требуемой провозной способности. Самым эффективным путем решения этих задач является создание комплексной системы управления и обеспечения безопасности движения поездов. В современных условиях повышение безопасности движения требует не только развития традиционных систем железнодорожной автоматики, но и привлечения дополнительных ресурсов на базе информационных технологий и цифровых систем. Таким образом, на базе микропроцессорных СЖАТ организуется система обеспечения безопасности движения, а на базе автоматизированных систем верхнего уровня — система управления процессами перевозок. Взаимодействуя между собой, они создают комплексную систему центров управления процессами перевозок на сети железных дорог [2, 3]. Следовательно, система управления процессами перевозок в настоящее время представляет собой единый комплекс, основанный на единой вычислительной среде и единой цифровой сети. В ней образуются три контура безопасности. Первый из них централизованный, он возникает путем централизации управления маршрутами и координатного управления в диспетчерском центре управления. Вторым — децентрализованный, его образуют системы железнодорожной автоматики и телемеханики и технической диагностики. Третий — бортовой, в его составе имеются системы АЛС и автоведения [4].

Вместе с тем возрастает чувствительность элементной базы СЖАТ к электромагнитным помехам и воздействиям. Число возможных видов электромагнитных воздействий также увеличилось, в т. ч. появилась техническая возможность генерирования сверхширокополосных импульсов электромагнитного поля для преднамеренного воздействия ими на микроэлектронные технические средства с целью создания большого потока сбоев в этих средствах или вывода их из строя. Объектами воздействия электромагнитных импульсов преднамеренного воздействия (ЭИПВ) может оказаться и аппаратура современных систем управления перевозочным процессом железнодорожных магистралей, особенно на крупных железнодорожных узлах и линиях скоростного движения [5–7], что повлечет за собой снижение уровня безопасности движения.

1. Постановка проблемы

Для микропроцессорных СЖАТ можно выделить следующие особенности, которые определяют отличие проблемы обеспечения устойчивости этих систем

к ЭИПВ от проблемы обеспечения устойчивости систем информационных технологий к этим же импульсам [8, 9].

Микропроцессорные системы автоматики и телемеханики относятся к нижнему уровню инфраструктуры управления движением поездов, поэтому к ним предъявляются повышенные требования по функциональной безопасности.

Возможная попытка воздействия будет иметь целью как нарушение функциональной безопасности систем железнодорожной автоматики, так и вывод их из строя. Оба этих направления атаки вызывают нарушение условий безопасности движения поездов. Воздействие может быть сосредоточено на тех объектах систем, последствия отказа или сбоя которых наиболее опасны.

Микропроцессорные СЖАТ территориально распределены, часть аппаратуры систем управления концентрируется на постах электрической и диспетчерской централизации. Отдельные блоки и устройства систем (объектные контроллеры на станциях, переездах, перегонах, сигнальные точки автоблокировки) находятся на территории парка станции или на перегонах в непосредственной близости от объектов управления. Системы железнодорожной автоматики практически не имеют периметров защиты, особенно это касается систем автоблокировки и переездной сигнализации, электрической централизации и диспетчерской централизации малых станций. Следовательно, они доступны для преднамеренного электромагнитного воздействия с близкого расстояния.

Таким образом, перед разработчиками СЖАТ встает задача обеспечения устойчивости современных микропроцессорных и компьютерных систем автоматики к возможному воздействию ЭИПВ, которая входит составной частью в комплексную проблему киберзащищенности систем обеспечения безопасности движения поездов [8]. Объединение проблем объясняется тем, что одним из аспектов киберзащищенности является минимизация последствий внешних деструктивных воздействий. Актуальность проблемы подтверждается следующим фактом: в Европейском союзе создан консорциум NIPOW, среди задач которого — анализ воздействия ЭИПВ на системы управления железнодорожным транспортом и разработка мер защиты инфраструктуры железных дорог [10, 11].

2. Косвенная оценка электромагнитных импульсов преднамеренного воздействия

Устойчивость аппаратуры СЖАТ к установленным в настоящее время в технических нормативных правовых актах видам электромагнитных помех подтверждается хорошо апробированными процедурами испытаний. Для ЭИПВ такое подтверждение усложняется тем, что адекватное моделирование этих импульсов требует применения генераторов, являющихся уникальными установками [7]. Поэтому для сокращения цикла испытаний следует применить комплексирование испытаний на устойчивость к разным видам сверхширокополосных импульсов.

Среди испытательных воздействий, предусмотренных действующей нормативно-технической документацией на обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС), электростатические разряды (ЭСР) обладают наиболее широкой полосой частотного спектра. Такая же полоса спектра у ЭИПВ. Энергия обоих типов импульсов концентрируется в малом промежутке времени и имеет большую величину. Неоднородность корпуса (отверстие, щель, болтовое соединение) при воздействии импульса ЭСР становится паразитной антенной, излучающей помеховое электромагнитное поле внутрь корпуса. Поэтому существующие стандарты в области электромагнитной совместимости требуют производить испытательные воздействия на все доступные паразитные антенны [12–15]. Испытания микроэлектронной и микропроцессорной аппаратуры СЖАТ на устойчивость к электростатическим разрядам обязательны, поэтому всегда имеются данные о параметрах импульсов ЭСР, вызывающих отказы и сбой этого средства автоматики.

Предполагается, что импульсы преднамеренного воздействия излучаются направленными антеннами и могут быть представлены в виде сферических или плоских электромагнитных волн. Эти волны незначительно затухают с расстоянием; среда распространения и конфигурации трассы также не вызывают значительного снижения амплитуды импульса и изменения его формы. Это предположение допустимо, т. к. воздействие генераторами ЭИПВ производится, как уже упоминалось, с близкого расстояния. При падении электромагнитной волны ЭИПВ на паразитную антенну образуется неоднородность, которая выделяет из фронта волны импульс и переизлучает его внутрь объема корпуса технического средства. Амплитуды напряженностей электрической составляющей электромагнитного поля, принимаемого и изучаемого импульсов связаны коэффициентом использования антенны [16–18]:

$$E_{\text{тизл}} = \sqrt{K_{\text{и}}} E_{\text{тприн}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{тизл}}$ – амплитуда напряженности электрического поля импульса, излучаемого внутрь корпуса, В/м; $E_{\text{тприн}}$ – амплитуда напряженности электрического поля импульса, принимаемого паразитной антенной, В/м; $K_{\text{и}}$ – коэффициент использования.

Напряжение на паразитной антенне и напряженность электрической составляющей поля в раскрыве если антенны связаны простыми соотношениями [16, 17, 19]. Так, для прямоугольного отверстия

$$E(t) = \frac{u(t)}{b}, \quad u(t) = E(t)b, \quad (2)$$

для круглого

$$u(t) = E(t)r, \quad E(t) = \frac{u(t)}{r}, \quad (3)$$

для узкой щели

$$E(t) = \frac{u(t)}{l}, \quad u(t) = E(t)l, \quad (4)$$

где $E(t)$ – напряженность поля, В/м; $u(t)$ – напряжение импульса, В; t – время, с; b – длина стороны отверстия, м; r – радиус круглого отверстия, м; l – длина щели, м.

Электростатический разряд характеризуется импульсом напряжения, который воздействует на неоднородность корпуса технического средства ЖАТ. Из (2–4) следует, что при этом в раскрыве паразитной антенны формируется импульс напряженности электрического поля, который создает помеховое излучение. Из (2–4) также следует, что для каждой неоднородности можно определить импульс напряжения, возникающий в ней под действием принятого ЭИПВ. Допустимо считать, что этот импульс создает излучаемый внутрь корпуса технического средства импульс напряженности поля в раскрыве антенны. Из вышеизложенного следует, что импульс напряжения от импульса преднамеренного воздействия имеет в общем случае выражение

$$u_{\text{изл}}(t) = xE_{\text{мизл}}A_{\text{ЭИПВ}}(t).$$

Если амплитуду напряженности излучаемого импульса выразить по (1), то окончательное выражение для напряжения излучаемого импульса примет вид

$$u_{\text{изл}}(t) = xE_{\text{мприн}}\sqrt{K_{\text{и}}}A_{\text{ЭИПВ}}(t), \quad (5)$$

где x – размерный коэффициент, м; $A_{\text{ЭИПВ}}(t)$ – временная функция формы импульса.

Очевидно, что амплитуда импульса напряжения равна $xE_{\text{мприн}}\sqrt{K_{\text{и}}}$, а форма совпадает с формой электромагнитного импульса преднамеренного воздействия, принятого паразитной антенной.

В статье базой для сопоставления принят импульс ЭСР и результаты испытаний микроэлектронных устройств ЖАТ на устойчивость к электростатическому разряду. Поэтому производится сопоставление импульса напряжения электростатического разряда и импульса напряжения от ЭИПВ. Допустимо полагать, что импульс напряжения от электромагнитного импульса преднамеренного воздействия, эквивалентный импульсу ЭСР соответствующей степени жесткости испытания, создаст в раскрыве паразитной антенны и в корпусе рецептора помеховое электромагнитное поле, вызывающее отказы и сбои рецептора.

Представляется, что эквивалентные импульсы должны обладать одинаковой энергией и иметь одинаковую активную полосу частот. От уровня энергии

зависят последствия воздействия помех на элементную базу. Следовательно, в паразитную антенну от разных импульсов должна поступать одинаковая энергия, которая затем передается в рецепторы при пренебрежимо малых потерях. Активная полоса частот определяет проникающую способность импульсов. Поэтому целесообразно использовать спектрально-энергетический способ вывода условий эквивалентности импульсов [19]

$$\begin{cases} W_1 = W_2 \\ \Delta f_1 = \Delta f_2 \end{cases}, \quad (6)$$

где W_1 и W_2 – энергии импульсов, Дж; Δf_1 и Δf_2 – активные полосы частот, Гц.

Все изложенное позволяет предложить следующую последовательность оценки параметров ЭИПВ, опасного для микроэлектронной аппаратуры систем железнодорожной автоматики.

1. Выбрать форму импульса преднамеренного воздействия.
2. Найти по (6) параметры импульса $u_{\text{изл}}(t)$, эквивалентного ЭСР той степени жесткости, для которой проведены испытания и который вызывает отказы и сбой рецептора.
3. Из (5) вычислить амплитуду ЭИПВ, принимаемого паразитной антенной.

Таким образом, может быть получена косвенная оценка воздействия ЭИПВ на технические средства ЖАТ по данным расчетного прогнозирования и экспериментальной проверки устойчивости тех же технических средств к электростатическому разряду.

Оценка позволяет определить параметры принимаемых паразитной антенной импульсов преднамеренного воздействия, вызывающие сбой или отказы микропроцессорных систем автоматики и телемеханики. Испытания на устойчивость к ЭСР являются обязательной составной частью обеспечения электромагнитной совместимости микроэлектронных СЖАТ; методы испытаний электростатическими разрядами достаточно хорошо апробированы [12–15]. Следовательно, таким способом можно получить достоверные данные об устойчивости к электромагнитному импульсу преднамеренного воздействия при сокращении числа испытаний.

3. Определение параметров импульсов спектрально-энергетическим способом

Для реализации приведенной выше методики требуется рассчитывать энергию и активную полосу частот импульсов различной формы. Расчет энергии импульса основывается на известной теореме Рэлея. Расчет активной полосы частот выполняется путем решения уравнения [20]

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{\Delta\omega} F^2(\omega) d\omega = \frac{0.95}{\pi} \int_0^{\infty} F^2(\omega) d\omega, \quad (7)$$

где $\Delta\omega$ – активная полоса частот, рад/с; ω – круговая частота, рад/с; $F(\omega)$ – модуль спектральной функции, В·с.

Также активная полоса частот может быть вычислена методом моментов [20]. В значительном числе случаев получить решение уравнения (7) крайне затруднительно, так как оно сводится к трансцендентному уравнению с неэлементарными функциями. Метод моментов не универсален и требует вычисления несобственных интегралов. Поэтому для решения уравнения (7) применяется графический метод. Он заключается в построении интегральной кривой распределения энергии $\gamma(f)$ в спектре по выражению

$$\gamma(f) = \frac{\frac{1}{\pi} \int_0^{\Delta 2\pi f} F^2(2\pi f) d2\pi f}{W}, \quad (8)$$

где W – энергия импульса, Дж.

По графику кривой находится значение активной полосы частот импульса, соответствующее значению $\gamma(f) = 0,95$. Активная полоса частот выражается через параметры импульса. Таким образом, графический метод является инженерным методом решения уравнения (7).

Далее рассматриваются особенности применения графического метода для импульса электростатического разряда и импульсов той же формы, что и ЭИПВ, применение которых можно прогнозировать.

Наиболее часто применяется представление ЭСР биэкспоненциальным импульсом. Электромагнитные импульсы преднамеренного воздействия также зачастую имеют биэкспоненциальную форму [21]. Математическое выражение такого импульса целесообразно представить в виде

$$u(t) = A \left(e^{-\gamma\beta_2 t} - e^{-\beta_2 t} \right) \beta_1 = \gamma\beta_2, \quad (9)$$

где A – амплитуда импульса, В; β_1, β_2 – характеристические числа импульса, 1/с; γ – отношение характеристических чисел.

Энергия биэкспоненциального импульса

$$W = A^2 \left[\frac{1}{2\gamma\beta_2} - \frac{2}{\beta_2(\gamma+1)} + \frac{1}{2\beta_2} \right]. \quad (10)$$

Квадрат модуля его спектральной функции [19]

$$F^2(\omega) = \frac{A^2 \beta_2^2 (1 - \gamma)^2}{(\gamma \beta_2^2)^2 + \omega^2 \beta_2^2 (1 + \gamma^2) + \omega^4}. \quad (11)$$

Подстановка (11) в (7) или (8) приведет к необходимости вычислить несобственный интеграл со сложной первообразной [22]. Поэтому интегральную кривую целесообразно строить методами компьютерной математики для диапазона частот $f \in \left(0, \dots, \frac{\beta_2}{5}, \dots, \frac{n\beta_2}{5}\right)$ где n – счетная переменная. Это объясняется тем, что длительность биэкспоненциального импульса принимается равной $\frac{5}{\beta_2}$ [23].

В настоящее время в качестве ЭИПВ используется модифицированный биэкспоненциальный импульс [24], который описывается выражением

$$u(t) = A \left(\frac{t}{\tau}\right)^n \left[M^{n-1} \exp\left(\frac{-Mt}{\tau}\right) - \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \right], \quad (12)$$

где τ – постоянная времени, с; M – параметр импульса.

Энергия данного импульса по [24]

$$W = A^2 \tau \Gamma(2n+1) \left[1 - \left(\frac{2\sqrt{M}}{M+1}\right)^{2n+2} \right], \quad (13)$$

где Γ – гамма-функция Эйлера.

В [24] приведено выражение для спектра импульса (12) на основании которого получено выражение для квадрата модуля спектральной функции

$$F^2(\omega) = A\tau\Gamma(n+1) \times \left[\frac{1}{\left(1 + \left(\frac{\omega\tau}{M}\right)^2\right)^{n+1}} + \frac{1}{(1 + (\omega\tau)^2)^{n+1}} + \frac{2 \cos(n+1) \left[\arctg\left(\frac{\omega\tau}{M}\right) + \arctg(\omega\tau) \right]}{\left[\left(1 + \left(\frac{\omega\tau}{M}\right)^2\right) (1 + (\omega\tau)^2) \right]^{\frac{n+1}{2}}} \right]. \quad (14)$$

Сложность этого выражения приводит к необходимости строить интегральную кривую с помощью программ компьютерной математики. Частота при построении кривой выбирается также, как и в случае биэкспоненциального импульса.

Гауссов импульс вида

$$u(t) = Ae^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2} \quad (15)$$

используется для описания ЭИПВ также часто, как и биэкспоненциальный [21].

Энергия гауссова импульса

$$W = A^2\tau\sqrt{\frac{\pi}{2}}. \quad (16)$$

Для гауссова импульса уравнение (7) имеет вид [25]

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\Phi\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) = 0,95, \quad (17)$$

где Φ – интеграл вероятности.

В нем имеется «неберущийся» интеграл («интеграл вероятности»), оценка которого по графикам и таблицам не дает высокой точности. Поэтому дополнительно использован метод вычисления активной полосы частот из [26]. В этом методе активная полоса частот выражается через моменты времени, которым соответствуют точки перегиба гауссовой кривой напряжения. Комбинация методов дает для гауссова импульса формулу активной полосы частот

$$\omega = \frac{3,5}{\tau}. \quad (18)$$

Иногда для описания ЭИПВ используются косинусный, косинус-кубический и косинусный колоколоподобный импульсы. В отношении этих импульсов существуют замкнутые выражения для интегральной кривой (8) [19]. Если задать частоту в диапазоне $f \in \left(0, \dots, \frac{1}{\tau}, \dots, \frac{n}{\tau}\right)$, то по интегральной кривой можно

найти активную полосу частот этих импульсов как функцию длительности импульса. Соответствующие расчетные соотношения представлены в [19].

Изложенный материал показывает, что метод построения интегральных кривых в сочетании с методами компьютерной математики позволяет решить задачу определения параметров эквивалентных импульсов и, в некоторых случаях, получить замкнутые выражения для активной полосы частот.

4. Энергетический подход к описанию электромагнитной обстановки, созданной ЭИПВ

Поскольку для анализа воздействия ЭИПВ на микроэлектронные СЖАТ целесообразен спектрально-энергетический способ вывода условий эквивалентности, то для описания электромагнитной обстановки, возникающей при наличии ЭИПВ, предпочтителен энергетический подход, основанный на рассмотрении спектра импульса преднамеренного воздействия [28]. В рамках этого подхода спектр принимаемого импульса, который распространяется в виде электромагнитной волны от источника к неоднородностям корпуса рецептора, имеет выражение

$$S(j\omega) = \frac{\sqrt{60PG}}{r} F(r, \omega) \int_{-\infty}^{+\infty} A_{\text{ЭИПВ}}(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (19)$$

где P – мощность генератора, Вт; G – коэффициент усиления передающей антенны; r – расстояние от источника до рецептора помех, м; F – коэффициент затухания.

В наиболее вероятном на практике случае, когда генератор преднамеренного воздействия размещен на диффузной поверхности (трава, почва, гравий) и на расстоянии прямой видимости до рецептора помех, коэффициент затухания рассчитывается по формуле [29–31]

$$F(r, \omega) = 1 \cdot e^{-\gamma r}, \quad (20)$$

где γ – коэффициент затухания в воздухе.

Тогда из (19) для амплитуды принимаемого ЭИПВ справедлива формула

$$P_{\text{отк},j,k} = 0. \quad (21)$$

Формула (21) – аналог известного уравнения силового подавления радиоэлектронных средств [32, 33]. Расчет по этой формуле тем точнее, чем выше частота спектральных составляющих ЭИПВ. Такие условия характерны для излучения радиолокаторов, которые зачастую используются при расчетах и экспериментах как аналоги генераторов электромагнитных импульсов преднамеренного воздействия [7, 29].

По уравнению силового подавления и его аналогу (21) можно решать различные задачи расчета воздействия ЭИПВ на микроэлектронную аппаратуру железнодорожной автоматики. В частности, найти мощность и коэффициент усиления антенны генератора, который расположен на заданном расстоянии от микропроцессорной аппаратуры ЖАТ и создает в паразитной антенне импульс, способный вызвать отказ или сбой. Другая задача – расчет расстояния

от генератора импульсов преднамеренного воздействия до рассматриваемой системы автоматики, на котором возможно вызвать сбой или отказ [33].

Из (19) может быть получено выражение для энергии принимаемого электромагнитного импульса преднамеренного воздействия [28]:

$$W = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S^2(j\omega) d\omega = \frac{60PG}{\pi r^2} F^2(r, \omega) \int_{-\infty}^{+\infty} A_{\text{ЭИПВ}}^2(t) e^{-j2\omega t} dt. \quad (22)$$

Величина

$$I = \frac{60PG}{\pi r^2} e^{-2\gamma r} \quad (23)$$

является интенсивностью помех и определяет вклад различных сверхширокополосных импульсных помех, в т. ч. ЭИПВ, в электромагнитной обстановке на месте эксплуатации микроэлектронной аппаратуры СЖАТ. Она служит для оценки электромагнитной обстановки и ее влияния на функциональную безопасность систем железнодорожной автоматики [28].

Заключение

В статье показано, что по результатам аналитического расчета и натурального моделирования воздействия электростатического разряда на технические средства СЖАТ возможна косвенная оценка формы и параметров ЭИПВ, опасных для исследуемой СЖАТ, а также прогнозирование устойчивости ее к этим импульсам.

Обосновано применение спектрально-энергетического способа вывода условий эквивалентности импульсов для косвенной оценки формы и параметров ЭИПВ. Расчет энергии импульсов выполняется по теореме Рэлея. Для расчета активной полосы частот установлено, что эта задача может быть решена путем построения интегральной кривой распределения энергии в спектре.

Для описания электромагнитной обстановки, созданной импульсами преднамеренного воздействия, необходимо применять энергетический подход. Приведен аналог уравнения силового подавления радиоэлектронных средств, который позволяет рассчитывать параметры генератора ЭИПВ и размеры зон подавления. Выведено выражение для интенсивности помех от ЭИПВ в составе электромагнитной обстановки на месте эксплуатации аппаратуры железнодорожной автоматики.

Достоинства предлагаемого метода – сокращение объема испытаний, снижение потребности в дорогостоящем и малодоступном оборудовании. Математический аппарат метода позволяет избежать математических трудностей решения трансцендентных уравнений, а в некоторых случаях – получить замкнутое

выражение для активной полосы частот. Немаловажным обстоятельством является и то, что исследование нового вида электромагнитных угроз – электромагнитных импульсов преднамеренного воздействия – ведется на основе уже достаточно изученного электростатического разряда.

К сожалению, графоаналитический метод оказывается довольно трудоемким и требует высокой аккуратности при выполнении графической части расчета.

Поэтому предлагаемый в статье комплексный анализ устойчивости к ЭИПВ можно считать полезным и востребованным для решения проблемы обеспечения киберзащищенности микропроцессорных СЖАТ, критичных к безопасности, на ранних этапах разработки и проектирования с учетом современных угроз. Эта проблема возникла сравнительно недавно, следовательно, предлагаемые в статье методы являются актуальными.

Библиографический список

1. *Розенберг М. Н.* Инновационные технологии интервального регулирования – основа системы управления движением на МЦК / М. Н. Розенберг // Автоматика, связь, информатика – 2019. – № 6. – С. 5–10.
2. *Рогачева И. Л.* Эксплуатационная надежность систем электрической централизации нового поколения / И. Л. Рогачева. – М.: Маршрут, 2006. – 220 с.
3. Системы железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. В 2-х ч. / под. ред. А. В. Горелика. – М.: ФГБОУ «Учебно-метод. центр по образованию на ж.-д. трансп., 2012. – 212 с.
4. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс. В 2-х т. / под. ред. И. П. Киселева. – М.: ФГБОУ «Учебно-метод. центр по образованию на ж.-д. трансп., 2014. – Т. 1. – 308 с.
5. *Ogunsola A.* Electromagnetic compatibility in railways: Analysis and Management / A. Ogunsola, A. Mariscotti. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. – 544 p.
6. *Flammini F.* Railway Safety, Reliability and Security: Technologies and System Engineering / F. Flammini. N. Y.: IGI Global, 2012. – 488 p.
7. Электромагнитный терроризм на рубеже тысячелетий / М. Бакстром; под ред. Т. Р. Газизова. – Томск: Изд-во Томского университета, 2002. – 206 с.
8. *Бочков К. А.* Развитие современных систем железнодорожной автоматики и телемеханики с учетом требований функциональной и информационной безопасности / К. А. Бочков, В. А. Гапанович, Д. В. Комнатный, Е. Н. Розенберг // Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте: Сборник докладов 9-й международной конференции / РГУПС, ОАО РЖД, Северокавказская ж. д. – Ростов-на-Дону, 2018. – С. 224–231.
9. *Торокин А. А.* Инженерно-техническая защита информации / А. А. Торокин. – М.: Гелиос АРВ, 2005. – 960 с.
10. *Schleger A.* Infrastructure Risk Assessment and Management / A. Schleger, C. A. Brebbia. – N. Y.: WIT Press, 2016. – 158 p.
11. *Wright D.* Surveillance in Europe / D. Wright, R. Kreissl. – L.: Routledge, 2015. – 415 p.

12. *Кечиев Л. Н.* Защита электронных средств от воздействия статического электричества / Л. Н. Кечиев, Е. А. Пожидаев. – М.: Издательский дом «Технологии», 2005. – 352 с.
13. *Voldman S. H.* ESD circuits and Devices / S. H. Vodman. – N. Y.: Wiley & Sons, 2015. – 544 p.
14. *Voldman S. H.* Electrical Overstress (EOS): Devices, Curcuits and Systems / S. H. Vodman. – N. Y.: Wiley & Sons, 2013. – 370 p.
15. *Vashchenko V.* System Level ESD Protection / V. Vashchenko, M. Scholz. – N. Y.: Springer International Publishing, 2014. – 331 p.
16. *Лавров А. С.* Антенно-фидерные устройства / А. С. Лавров, Г. Б. Резников. – М.: Советское радио, 1974. – 386 с.
17. *Stutzman W. L.* Antenna theory and design / W. L. Stutzman, G. A. Thiele. – N. Y.: Wiley&Sons, 2012. – 843 p.
18. *Handbook of Antenna Technologies* / Z. N. Chen, D. Liu, H. Nakano, X. Qing, T. Zwich (edit). – Singapore: Springer Singapore, 2016. – 3470 p.
19. *Бочков К. А.* Элементы моделирования электромагнитной совместимости устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / К. А. Бочков, Д. В. Комнатный. – Гомель: БелГУТ, 2013. – 185 с.
20. *Харкевич А. А.* Избранные труды: в 3 т. – М.: Наука, 1973. – Т. 2. Линейные и нелинейные системы. – 560 с.
21. *Гайнутдинов Р. Р.* Прогнозирование электромагнитных помех в межсоединениях печатных плат цифровых электронных средств при преднамеренном воздействии сверхширокополосного электромагнитного импульса / Р. Р. Гайнутдинов, З. М. Гизатуллин. – Технологии ЭМС. – 2010. – № 3 (39). – С. 44–52.
22. *Прудников А. П.* Интегралы и ряды / А. П. Прудников, Ю. А. Брычков, О. И. Маричев. – М.: Наука, 1981. – 800 с.
23. *Шебес М. Р.* Задачник по теории линейных электрических цепей / М. Р. Шебес, М. В. Каблукова. – М.: Высш. школа, 1990. – 544 с.
24. *Беличенко Н. П.* Сверхширокополосные импульсные радиосистемы / Н. П. Беличенко, Ю. И. Буюнов, В. И. Кошелев. – Новосибирск: Наука, 2015. – 475 с.
25. *Гоноровский И. С.* Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Радио и связь, 1986. – 511 с.
26. *Баскаков С. И.* Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Высшая школа, 2000. – 462 с.
27. *Ellingson S. W.* Radio Systems Engineering / S. W. Ellingson. – L.: Cambridge University Press, 2016. – 716 p.
28. *Иванов В. А.* Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств / В. А. Иванов, Л. Я. Ильницкий, М. И. Фузик. – Киев: Техника, 1983. – 189 с.
29. *Кравченко В. И.* Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / В. И. Кравченко, Е. А. Болотов, Н. И. Летунова. – М.: Радио и связь, 1987. – 255 с.
30. *Аполлонский С. М.* Расчеты электромагнитных полей / С. М. Аполлонский, А. Н. Горский. – М.: Маршрут, 2006. – 992 с.
31. *Sadiku M. T.* Elements of Electromagnetic / M. T. Sadiku. – Oxford: Oxford University Press, 2018. – 926 p.
32. *Комиссаров Ю. Я.* Помехоустойчивость и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств / Ю. Я. Комиссаров, С. С. Родионов. – Киев: Техника, 1978. – 208 с.
33. *Радиоэлектронная борьба. Силовое подавление радиоэлектронных систем* / В. Д. Добыкин, А. И. Куприянов, В. Г. Пономарев, Л. Н. Кустов, под ред. А. И. Куприянова. – М.: Вузовская книга, 2007. – 468 с.

D.V. Komnatny, PhD in Technical Sciences

*Department of Automation, Telemechanics and Communication,
Belarusian State University of Transport, Gomel (Belarus)*

**COMPREHENSIVE STABILITY ANALYSIS OF TRAIN
CONTROL SYSTEMS TO ULTRA-WIDEBAND ELECTROMAGNETIC
PULSES OF INTENTIONAL IMPACT**

The problem of ensuring the stability of microprocessor systems of railway automatics to ultra-wideband pulses of an electromagnetic field is considered. The vulnerability of modern microprocessor control systems and ensuring the safety of train traffic to electromagnetic impulses of deliberate influence is shown. The features of safety-critical microprocessor systems of railway automatics are highlighted, which determine the difference between the problem of ensuring the stability of these systems from the same problem with respect to information systems.

Electrostatic discharge has the widest frequency spectrum. They act on the same apertures in the housings of technical means of microprocessor systems of railway automation, as the impulses of deliberate action. When an electromagnetic wave of an intentional impulse is incident, the aperture releases this impulse and transmits it to the inside of the case. Therefore, an intentional impulse emitted into the housing and an electrostatic discharge impulse can be compared in shape and amplitude using the spectral-energy equivalence condition. The calculation of the energy and the active frequency band of the pulses most often used as deliberate pulses is considered. It is demonstrated that the calculation of the active frequency band in engineering practice is carried out by constructing an integral curve of the energy distribution in the spectrum. A technique has been developed for the indirect assessment of the impact of an electromagnetic pulse of deliberate action according to the calculated prediction of resistance to electrostatic discharges.

An analogue of the equation of power suppression of radio-electronic means is demonstrated in the article allowing finding the parameters of an electromagnetic pulses generator which creates pulses dangerous for microprocessor systems of railway automation. An expression is also given for the intensity of interference, which characterizes the contribution of deliberate electromagnetic pulses to the electromagnetic environment at the location of the microprocessor equipment of railway automation.

Microprocessor-based railway automation systems, deliberate electromagnetic pulse, noise immunity, cyber resistance, energy, electrostatic discharge, pulse equivalence, active frequency band, body heterogeneity, indirect impact assessment

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-3-379-394

References

1. *Rozenberg M. N. (2019) Innovatsionnyye tekhnologii interval'nogo regulirovaniya – osnova sistemy upravleniya dvizheniyem na MTSK [Innovative train spacing control technologies as a bases for the traffic management system at the Moscow central ring]. Avtomatika, svyaz, informatika [Automation, communication, informatics], no. 6, pp, 5–10. (In Russian)*
2. *Rogacheva I. L. (2006) Eksploatatsionnaya nadezhnost' sistem elektricheskoy tsentralizatsii novogo pokoleniya [Operational reliability of new generation electrical centralization systems]. Moscow, Marshrut Publ., 220 p.*
3. *Sistemy zheleznodorozhnoy avtomatiki, telemekhaniki i svyazi. V. 2-kh ch. pod. red. A. V. Gorelika [Railway automation, telemechanics and communication systems. In 2 parts. Under general*

- editorship of A. V. Gorelik]. Moscow, Federal State Budgetary Educational Institution of Further Professional Education “Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport”, 2012, 348 p. (In Russian)
4. *Vysokoskorostnoy zheleznodorozhnyy transport. Obshchiy kurs. V 2-kh t., pod. red. I. P. Kiseleva* [High speed rail transport. General course. In 2 volumes, under general editorship of I. P. Kiselev]. Moscow, Federal State Budgetary Educational Institution of Further Professional Education “Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport”, 2014, vol. 1, 308 p. (In Russian)
 5. *Ogunsola A., Mariscotti A.* (2013) Electromagnetic compatibility in railways: Analysis and Management. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 544 p.
 6. *Flammini F.* (2012) Railway Safety, Reliability and Security: Technologies and System Engineering. N. Y.: IGI Global, 488 p.
 7. *Elektromagnitnyy terrorizm na rubezhe tysyacheletiy. pod red. T. R. Gazizova* [Electromagnetic terrorism at the turn of the millennium. Under general editorship of T. R. Gazizov]. Tomsk: Tomsk University Publ., 2002, 206 p. (In Russian)
 8. *Bochkov K. A., Gapanovich V. A., Komnatny D. V., Rozenberg E. N.* (2018) Razvitiye sovremennykh sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki s uchetom trebovaniy funktsional'noy i informatsionnoy bezopasnosti [Development of modern systems of railway automation and remote control in view of the requirements of functional and information security]. *Avtomatika i telemekhanika na zheleznodorozhnom transporte: Sbornik dokladov 9-y mezhdunarodnoy konferentsii* [Automation and remote control on railway transport: collection of reports of the 9th international conference]. Rostov-on-Don, 224–231 pp. (In Russian)
 9. *Torokin A. A.* (2005) *Inzhenerno-tekhnicheskaya zashchita informatsii* [Engineering and technical protection of information]. Moscow, Helios ARV Publ., 960 p.
 10. *Schleger A., Brebbia C. A.* (2016) Infrastructure Risk Assessment and Management. N. Y.: WIT Press, 158 p.
 11. *Wright D., Kreissl R.* (2015) Surveillance in Europe. London: Routledge, 415 p.
 12. *Kechiyev L. N., Pozhidayev E. A.* (2005) Zashchita elektronnykh sredstv ot vozdeystviya staticheskogo elektrichestva [Protection of electronic devices from the effects of static electricity]. Moscow, publ. house “Technologies”, 352 p. (In Russian)
 13. *Voldman S. H.* (2015) ESD circuits and Devices. N. Y.: Wiley & Sons, 544 p.
 14. *Voldman S. H.* (2013) Electrical Overstress (EOS): Devices, Curcuits and Systems. N. Y.: Wiley & Sons, 370 p.
 15. *Vashchenko V., Scholz M.* (2014) System Level ESD Protection. N. Y: Springer International Publishing, 331 p.
 16. *Lavrov A. S, Reznikov G. B.* (1974) Antenno-fidernyye ustroystva [Antenna-feeder devices]. Moscow, Sovetskoye Radio Publ., 386 p. (In Russian)
 17. *Stutzman W. L., Thiele G. A.* (2012) Antenna theory and design. N. Y.: Wiley&Sons, 843 p.
 18. *Chen Z. N., Liu D., Nakano H., Qing X., Zwich T.* (2016) Handbook of Antenna Technologies. Singapore: Springer Singapore, 3470 p.
 19. *Bochkov K. A., Komnatny D. V.* (2013) *Elementy modelirovaniya elektromagnitnoy sovmostimosti ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki* [Elements of modeling electromagnetic compatibility of railway automation and remote control devices]. Gomel', Belorussian State University of Transport Publ., 185 p.
 20. *Kharkevich A. A.* (1973) *Izbrannyye trudy v 3kh t. T. 2. Lineynyye i nelineynyye sistemy.* [Selected works in 3 volumes Vol. 2. Linear and nonlinear systems]. Moscow, Nauka Publ., 560 p. (In Russian)

21. Gaynutdinov R. R., Gizatullin R. R. (2010) Prognozirovaniye elektromagnitnykh pomekh v mezhsoyedineniyakh pechatnykh plat tsifrovyykh elektronnykh sredstv pri prednamerennom vozdeystvii sverkhshirokopolosnogo elektromagnitnogo. [Prediction of electromagnetic interference in interconnections of printed circuit boards of digital electronic devices under the deliberate action of an ultra-wideband electromagnetic pulse]. *Tekhnologii EMS [EMC Technologies]*, no. 3(39), pp. 44–52. (In Russian)
22. Prudnikov A. P., Brychkov Yu. A., Marichev O. I. (1981) *Integraly i ryady [Integrals and series]*. Moscow, Nauka Publ., 800 p. (In Russian)
23. Shebes M. R., Kablukova M. V. (1990) *Zadachnik po teorii lineynykh elektricheskikh tsepey [Problem book on the theory of linear electric circuits]*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 544 p. (In Russian)
24. Belichenko N. P., Buyanov Yu. I., Koshelev V. I. (2015) *Sverkhshirokopolosnyye impul'snyye radiosistemy [Ultra-wideband impulse radio systems]*. Novosibirsk, Nauka Publ., 475 p. (In Russian)
25. Gonorovskiy I. S. (1986) *Radiotekhnicheskiye tsepi i signaly [Radiotechnical circuits and signals]*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 511 p. (In Russian)
26. Baskakov S. I. (2000) *Radiotekhnicheskiye tsepi i signaly [Radiotechnical circuits and signals]*. Moscow, Vysshaya shkola, 462 p. (In Russian)
27. Ellingson S. W. (2016) *Radio Systems Engineering*. London: Cambridge University Press, 716 p.
28. Ivanov V. A., Ilnitskiy L. Y., Fuzik M. I. (1983) *Elektromagnitnaya sovместimost' radioelektronnykh sredstv [Electromagnetic compatibility of radioelectronic devices]*. Kiev, Tekhnika Publ., 189 p. (In Russian)
29. Kravchenko V. I., Bolotov Y. A., Letunova N. I. (1987) *Radioelektronnyye sredstva i moshchnyye elektromagnitnyye pomekhi [Radioelectronic devices and powerful electromagnetic interference]*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 255 p. (In Russian)
30. Apollonsky S.M., Gorsky A.N. (2006) *Raschety elektromagnitnykh poley [Calculations of electromagnetic fields]*. Moscow, Marshrut Publ., 92 p. (In Russian)
31. Sadiku M. T. (2018) *Elements of Electromagnetic*. Oxford: Oxford University Press, 926 p.
32. Komissarov Yu. Ya., Rodionov S. S. (1978) *Pomekhoustoychivost' i elektromagnitnaya sovместimost' radioelektronnykh sredstv [Noise immunity and electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment]*. Kiev, Tekhnika Publ., 208 p. (In Russian)
33. Dobykin V. D., Kupriyanov A. I., Ponomarev V. G., Kustov L. N., under general editorship of Kupriyanov A. I. (2007) *Radioelektronnaya bor'ba. Silovoye podavleniye radioelektronnykh sistem [Electronic warfare. Power suppression of radio-electronic systems]*. Moscow, Vuzovskaya kniga Publ., 468 p. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии,
профессором К. А. Бочковым*

Поступила в редакцию 16.03.2021, принята к публикации 22.04.2021

КОМНАТНЫЙ Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» Белорусского государственного университета транспорта
toe4031@gstu.by

© Комнатный Д. В., 2021

УДК 656.256.3

В. И. Шаманов, докт. техн. наук

*Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»,
Российский университет транспорта (МИИТ), Москва*

ВЛИЯНИЕ ОТКАЗОВ В СИСТЕМАХ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ДВИЖЕНИЕ ПОЕЗДОВ ПО ДВУХПУТНЫМ УЧАСТКАМ

Уровень надежности систем интервального регулирования движения поездов непосредственно влияет на безопасность и бесперебойность их движения, на скорость и сроки доставки грузов и пассажиров, на трудоемкость и себестоимость перевозок, на расходы по эксплуатации этих систем. Если рассматривать участок железной дороги как сложную динамическую систему, то при относительно небольшом весе основных фондов технических средств, предназначенных для интервального регулирования движения поездов, отказы в них заметно влияют на выходной эффект такой системы.

На железных дорогах России применяются преимущественно системы интервального регулирования с использованием рельсовых цепей и разделением перегонов на блок-участки. Такие системы широко задействуются и на железных дорогах мира. Поэтому актуальна проблема количественного определения потерь в движении поездов от отказов устройств электрической централизации при сквозном пропуске поездов через станцию и от отказов устройств автоблокировки.

Величина потерь зависит от интенсивности отказов технических средств и времени восстановления их работоспособности, от интенсивности движения поездов, длины блок-участков, соотношения грузовых и пассажирских поездов на участке, скорости их движения по графику и степени уменьшения скорости из-за отказов рассматриваемых технических средств. По участкам железных дорог России движутся и грузовые и пассажирские поезда, скорости которых могут заметно различаться, что существенно влияет на потери в движении от таких отказов. При расчетах приходится использовать данные по пропускной способности перегонов и возможностям ускорения поездов.

Результаты расчетов обеспечивают возможность объективного выбора типа рассматриваемых систем и требований к ним при новом проектировании или при их реконструкции на участках железных дорог, а также возможность корректного распределения расходов на повышение надежности эксплуатируемых систем.

Системы интервального регулирования движения поездов, отказы, потери в поездной работе, незапланированные остановки, потери поездо-часов, расчеты, учитываемые параметры, результаты расчетов

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-3-395-413

Введение

В системах интервального регулирования движения поездов основной проблемой становится непрерывный контроль положения поезда на участке пути и скорости его движения. Поэтому данные системы различаются прежде всего методами и техническими средствами реализации такого контроля.

Наиболее широко используемыми техническими средствами обеспечения безопасного интервала между поездами при их движении на многих магистральных железных дорогах мира остаются различные системы с использованием рельсовых цепей (РЦ). Они обеспечивают контроль свободности участков железнодорожного пути и целостности рельсов, а также передачу этой информации на локомотивы и в аппаратуру телеконтроля.

Однако РЦ требуют относительно высоких вложений в инфраструктуру при строительстве, подвержены действию различных помех, а их эксплуатация дорога. Ведутся активные работы по их замене на железных дорогах мира другими устройствами.

Исследуется возможность применения для решения рассматриваемых задач счетчиков осей, волоконно-оптических кабелей, индуктивных шлейфов, ультразвуковых датчиков [1]. Начинает использоваться спутниковая навигация и евробализы. Цифровая радиосвязь позволяет реализовывать координатные системы интервального регулирования движением поездов [2–6].

Системы интервального регулирования движения поездов, работающие на новых принципах, характерны в основном для линий с высокоскоростным или очень интенсивным движением. На магистральных железных дорогах России, стран постсоветского пространства и развитых государств мира продолжается широкое использование РЦ [7–10].

В настоящее время на перегонах магистральных железных дорог РФ интервальное регулирование движения поездов обеспечивается прежде всего системами автоблокировки различных типов, а на станциях – релейными, релейно-процессорными и микропроцессорными системами электрической централизации (ЭЦ). Их отказы прямо влияют на безопасность и бесперебойность движения поездов.

При расчетах пропускной способности перегона влияние на нее уровня надежности технических средств учитывают использованием специального коэффициента [11]. Однако неясно, какую долю в этом уменьшающем пропускную способность коэффициенте занимают отказы технических средств автоблокировки и ЭЦ. Поэтому актуальна проблема объективной оценки влияния отказов этих средств на качество интервального регулирования движения поездов.

1. Задержки поездов при отказах аппаратуры сигнальной точки двухпутной автоблокировки

В перегонных устройствах кодовой автоблокировки более 80 % отказов приводит к смене показаний напольных светофоров с зеленого огня на красный. В соответствии с требованиями [12] машинист должен останавливать поезд перед проходным светофором как с красным огнем, так и с непонятным показанием или погасшим.

Если отказ не вызывает уплотнение поездопотока, то средние потери времени хода каждого поезда при ложном горении красного огня зависят от средней длины блок-участка, длины поезда и скорости движения поезда по графику; от продолжительности стоянки поезда перед красным огнем, ускорения и скорости после проследования красного сигнала [13–15].

Анализировать влияние отказа аппаратуры сигнальной точки автоблокировки на движение поездов по перегону удобно по исполненному графику движения поездов [16].

Фрагмент исполненного графика движения поездов по перегону при отказе одной сигнальной точки двухпутной автоблокировки приведен на рис. 1, на котором показаны координаты оси и выходного сигнала станции А, координата входного сигнала станции В и координаты сигнальных точек автоблокировки с номерами от 1 до 11.

Если отказов устройств автоблокировки нет, поезда движутся в соответствии с графиком, показанным на рисунке штриховыми линиями при времени хода по перегону равном t_x . Наиболее характерные отказы вызывают ложное горение красного огня одного светофора.

В рассматриваемом примере ложным красным огнем горит светофор сигнальной точки 7. Тогда светофор сигнальной точки 5 горит желтым огнем, поэтому

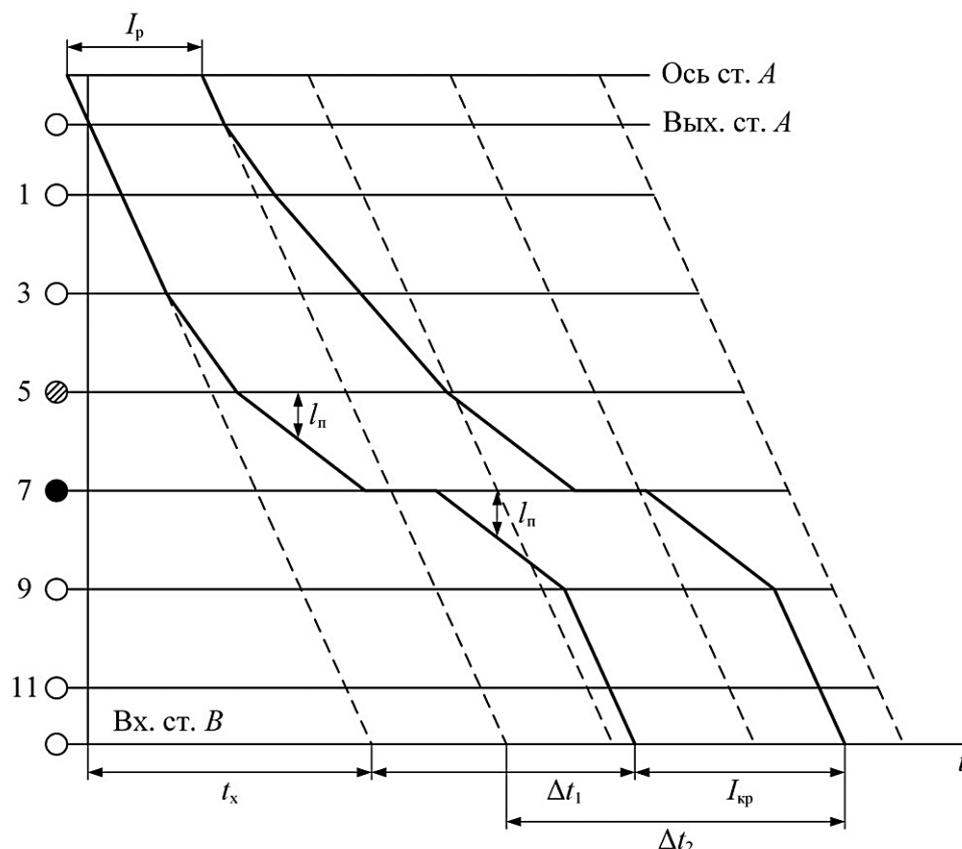


Рис. 1. Фрагмент исполненного графика движения поездов по перегону при отказе одной сигнальной точки двухпутной автоблокировки

скорость движения первого поезда, идущего по перегону после возникновения отказа сигнальной точки 7, начинает уменьшаться уже после проследования сигнальной точки 3. Скорость движения поезда становится еще меньше после проследования светофора 5 и движении на красный огонь светофора 7. Фактический (исполненный) график движения поездов для рассматриваемого случая показан на рис. 1 жирной линией.

После остановки поезда перед светофором 7 и выяснения того, что впереди на перегоне поездов нет, его движение начинается через время продолжительностью до 3 мин в зависимости от мощности компрессора локомотива. После проследования светофора 7 с горящим красным огнем поезд движется с пониженной скоростью не более 20 км/час. Только после освобождения блок-участка между сигнальными точками 7 и 9 поезд начинает двигаться с разрешенной по графику скоростью. В результате потери времени хода этим поездом между станциями А и Б составят Δt_1 .

Если поезд успевает освободить перегон до вступления на него следующего за ним поезда, то потери времени хода у этих поездов будут одинаковыми — равными Δt_1 .

Когда второй поезд отправляется со станции А с соблюдением указанного на рисунке расчетного интервала I_p , для него будут гореть желтым огнем также светофоры 1 и 3, вызывая дополнительное снижение его скорости движения. Потери времени хода второго поезда составляют Δt_2 . Межпоездной интервал между рассматриваемыми поездами на станции Б увеличится до $I_{кр}$. Потери времени хода у последующих поездов будут нарастать.

Если интервал попутного следования такой, что каждый из поездов будет следовать по перегону при ложном горении только светофоров 5 и 7, то потери времени хода каждого поезда будут такие же, как у первого поезда на рис. 1. В таком случае потери времени хода каждого поезда при наиболее характерном отказе автоблокировки, когда на светофоре с зеленым огнем ложно загорается красный огонь, можно рассчитать с учетом [17, 18], если не применяются защитные участки и при расчетах учитываются средние длины блок-участков l_{cp} , по формуле

$$\Delta t_{cp} = \frac{2l_{cp}}{V_{\Gamma} + V_{ж}} + \frac{2l_{cp}}{V_{ж}} + t_{ост} + \frac{V_{кр}}{\alpha_y} + \frac{l_{cp} + l_{п}}{V_{кр}} + \frac{V_{\Gamma} - V_{кр}}{\alpha_y} - \frac{3l_{cp} + l_{п}}{V_{\Gamma}}, \quad (1)$$

где $l_{п}$ — длина поезда, км; $t_{ост}$ — продолжительность стоянки поезда перед ложно горящим красным огнем светофором, мин; V_{Γ} — скорость движения поезда по графику, км/мин; $V_{ж}$ — допустимая скорость поезда после проезда светофора с желтым огнем, км/мин; $V_{кр}$ — скорость движения поезда после проследования напольного светофора с красным огнем (не больше 20 км/час = 0,33 км/мин); α_y — ускорение поезда, км/мин².

Последний элемент в формуле (1), по сути, расчетный интервал попутного следования между поездами I_p . При определении потерь времени хода для грузовых или пассажирских поездов в формуле (1) используются соответствующие численные значения ее элементов.

Ходовая скорость грузовых поездов в 0,6–0,8 раз меньше ходовой скорости пассажирских поездов, поэтому средние потери времени хода пассажирских поездов при отказах сигнальных точек больше, а средние потери времени хода пассажирских поездов и грузовых поездов рассчитываются отдельно.

2. Алгоритм расчета влияния отказов двухпутной автоблокировки на движение поездов

При отказе одной сигнальной точки автоблокировки потери в движении грузовых поездов содержат три составляющих: потери поездо-часов за время восстановления работоспособности сигнальной точки, дополнительные задержки поездов в течение периода восстановления графического ритма после устранения отказа и задержки грузовых поездов из-за дополнительных обгонов их пассажирскими поездами для ликвидации опозданий пассажирских поездов [20].

Если в потерях присутствуют все три составляющих, то зависимость потерь поездо-часов от времени восстановления работоспособности устройств сигнальной точки T_B нелинейная. Потери поездо-часов за время восстановления работоспособности сигнальной точки составляют [19]

$$\Delta t_{\text{гр}} = 0,5 \left[2\Delta t_{\text{сп}} + \left(\frac{T_B}{I_{\text{кр}}} - 1 \right) (I_{\text{кр}} - I_{\text{сп}}) \right] \frac{T_B}{I_{\text{сп}}}, \quad (2)$$

где $I_{\text{сп}}$ – средний интервал между поездами при их движении по графику, $I_{\text{кр}}$ – средний интервал после проследования светофора с ложно горящим красным огнем.

Следовательно, для расчета этой величины надо знать численные значения среднего интервала между поездами при их движении по графику и при движении после проследования светофора с ложно горящим красным огнем. При расчетах межпоездного интервала время на восприятие сигнала машинистом локомотив не учитывают ввиду малости его величины, составляющей около 0,005 мин.

Средний интервал между грузовыми поездами с учетом формулы для расчета коэффициента использования пропускной способности при автоблокировке [11]

$$I_{\text{сп.гр}} = \frac{(1440 - t_{\text{техн}}) \alpha_n k_{\text{п}} - \varepsilon_{\text{пс}} n_{\text{пс}} I_{\text{р.гр}}}{n_{\text{гр}}}, \quad (3)$$

где 1440 – количество минут в сутках; $t_{\text{техн}}$ – длительность технологического окна в графике движения поездов для работ по текущему содержанию пути, контактной сети и других устройств; α_n – коэффициент, учитывающий надежность работы технических средств; $k_{\text{п}}$ – число поездов (или пар поездов) в периоде графика; $n_{\text{гр}}$ – размеры движения грузовых поездов, пар; $n_{\text{пс}}$ – размеры движения пассажирских поездов, пар; $\varepsilon_{\text{пс}}$ – коэффициент съема пропускной способности пассажирскими поездами [20].

Фактическое движение поездов отличается неравномерностью и несинхронностью. Поэтому, строго говоря, в формуле (3) должны использоваться вероятностные характеристики потока поездов [21, 22].

Формула для вычисления предельного минимального интервала попутного следования, когда отказ сигнальной точки автоблокировки не вызывает уплотнения поездопотока и сохраняется линейная зависимость потерь в поездной работе от времени восстановления, приведена в [13]. Там же даны формулы для вычисления средней величины интервала $I_{\text{кр.гр}}$ между грузовыми поездами и минимальной величины межпоездного интервала $I_{\text{кр.мин}}$ после проследования светофора с ложно горящим красным огнем.

Если оперировать поездами, приведенными к грузовым поездам, то общее количество поездов, прошедших на красный огонь светофора за время восстановления соответственно при $I_{\text{кр.гр}} \geq I_{\text{ср.гр}}$ и при $I_{\text{кр.гр}} < I_{\text{ср.гр}}$

$$n_{\text{кр}} = \frac{T_{\text{в}}}{I_{\text{кр.гр}}}; \quad n_{\text{кр}} = \frac{T_{\text{в}}}{I_{\text{ср.гр}}}. \quad (4)$$

Из них грузовых и пассажирских поездов соответственно

$$n_{\text{кр.гр}} = \frac{n_{\text{кр}} n_{\text{гр}}}{n_{\text{гр}} + n_{\text{пс}}}; \quad n_{\text{кр.пс}} = n_{\text{кр}} - n_{\text{кр.гр}}. \quad (5)$$

Средние потери времени хода первого поезда при проследовании неисправной сигнальной точки с проходным светофором, горящим ложно красным огнем, с учетом (1) для грузовых поездов

$$\Delta t_{\text{ср.гр}} = 2l_{\text{ср}} \left(\frac{1}{V_{\text{г.гр}} + V_{\text{ж.гр}}} + \frac{1}{V_{\text{ж.гр}}} + \frac{1}{2V_{\text{кр}}} \right) + \frac{V_{\text{г.гр}}}{\alpha_y} + \frac{l_{\text{ср}} + l_{\text{гр}}}{V_{\text{кр}}} + t_{\text{ост}} - I_{\text{р.гр}}; \quad (6)$$

для пассажирских поездов

$$\Delta t_{\text{ср.пс}} = 2l_{\text{ср}} \left(\frac{1}{V_{\text{г.пс}} + V_{\text{ж.пс}}} + \frac{1}{V_{\text{ж.пс}}} + \frac{1}{2V_{\text{кр}}} \right) + \frac{V_{\text{г.пс}}}{2\alpha_y} + \frac{l_{\text{ср}} + l_{\text{пс}}}{V_{\text{кр}}} + t_{\text{ост}} - I_{\text{р.пс}}. \quad (7)$$

Продолжительность опоздания последнего поезда, прошедшего на красный огонь светофора, для грузовых поездов при $I_{кр.пр} > I_{ср.гр}$

$$t_{огр} = \Delta t_{ср.гр} + (n_{кр} - 1)(I_{кр.пр} - I_{ср.гр}); \quad (8)$$

для пассажирских поездов с учетом того, что вероятность их проследования будет в $n_{пс}/n_{гр}$ раз меньше, чем грузовых

$$t_{опс} = \Delta t_{ср.пс} + \left(n_{кр} \frac{n_{пс}}{n_{гр}} - 1 \right) (I_{кр.пр} - I_{ср.гр}). \quad (9)$$

Продолжительности опоздания при $I_{кр.пр} < I_{ср.гр}$ для грузовых поездов $t_{огр}$ и пассажирских поездов $t_{опс}$ берутся равными их значениям, вычисленными по формулам (6) и (7) соответственно.

Количество поездов, опаздывающих после устранения отказа до восстановления графического ритма, для грузовых поездов и пассажирских поездов соответственно

$$n_{огр} = \frac{t_{огр}}{I_{ср.гр} - I_{р.гр}}; \quad n_{опс} = \frac{t_{опс}}{I_{ср.гр} - I_{р.пс}}. \quad (10)$$

Продолжительность периода, в течение которого будут опаздывать грузовые поезда

$$T_{огр} = T_B + n_{огр} I_{р.гр}. \quad (11)$$

Потери поездо-часов за время восстановления устройств автоблокировки по грузовым поездам и по пассажирским поездам соответственно

$$T_{о1гр} = 0,5(\Delta t_{ср.гр} + t_{огр})n_{кр.гр}; \quad T_{о1пс} = 0,5(\Delta t_{ср.пс} + t_{опс})n_{кр.пс}. \quad (12)$$

Потери поездо-часов за период восстановления графического ритма после устранения отказа соответственно для грузовых поездов при $n_{огр} > 1$ и для пассажирских поездов при $n_{опс} > 1$

$$T_{о2гр} = 0,5t_{огр}(n_{огр} - 1); \quad T_{о2пс} = 0,5t_{опс}(n_{опс} - 1). \quad (13)$$

При или соответствующее значение $T_{о2}$ принимается равным нулю.

Среднее время опоздания за весь период нарушения графического ритма соответственно для грузовых поездов и пассажирских поездов

$$t_{\text{огр}}^{\text{ср}} = \frac{T_{\text{о1гр}} + T_{\text{о2гр}}}{n_{\text{кр.гр}} + n_{\text{огр}}}; \quad t_{\text{опс}}^{\text{ср}} = \frac{T_{\text{о1пс}} + T_{\text{о2пс}}}{n_{\text{кр.пс}} + n_{\text{опс}}}. \quad (14)$$

Задержки грузовых поездов из-за дополнительных их обгонов пассажирскими поездами, вызванные опозданием грузовых поездов на $T_{\text{о1гр}}$ и $T_{\text{о2гр}}$

$$T_{\text{о3гр}} = \frac{T_{\text{огр}} n_{\text{пс}} t_{\text{об}}}{1440 I_{\text{ср.гр}}} (t_{\text{огр}} - t_{\text{опс}}), \quad (15)$$

где $t_{\text{об}}$ — время, в течение которого осуществляются обгоны.

При $t_{\text{огр}} \leq t_{\text{опс}}$ эти задержки принимаются равными нулю.

Общее количество потерь поездо-часов грузовыми поездами и пассажирскими поездами соответственно

$$T_{\text{гр}} = T_{\text{о1гр}} + T_{\text{о2гр}} + T_{\text{о3гр}}; \quad T_{\text{пс}} = T_{\text{о1пс}} + T_{\text{о2пс}}. \quad (16)$$

Общее среднее число остановок грузовых и пассажирских поездов соответственно

$$n_{\text{ост.гр}} = n_{\text{кр.гр}} + \frac{T_{\text{о3гр}}}{t_{\text{об}}};$$

$$I_{\text{кр.гр}} = I_{\text{р.гр}} + 2 \left(\frac{l_{\text{ср}} + l_{\text{пр}} + L_{\text{вх}}}{3} + l_{\text{гр}} \right) \left(\frac{1}{V_{\text{ж.гр}}} - \frac{1}{V_{\text{г.гр}}} \right) + t_{\text{уст}}. \quad (17)$$

3. Результаты использования разработанной методики расчетов

По разработанному алгоритму была создана программа с использованием рассмотренных формул для проведения расчетов в компьютерной среде. Варьировались размеры и скорости движения грузовых и пассажирских поездов, длины блок-участков и поездов, возможности их ускорения, время восстановления работоспособности технических средств в рассматриваемых системах.

В качестве примера в табл. 1 представлены результаты расчетов. Зависимости получены при численных значениях параметров, приведенных в [13]. Верхний допустимый предел коэффициента заполнения пропускной способности для двухпутных участков был взят равным 0,91 [23].

Более полные результаты расчетов приведены в [24]. Их анализ показал, что в случаях, когда ложно горит красным огнем один проходной светофор двухпутной автоблокировки, рост средней длины блок-участков приводит к пропор-

Таблица 1. Количество задерживаемых поездов и поездо-часы задержек на двухпутных линиях, оборудованных автоблокировкой

Размеры движения, поездов		Время восстановления	Длина блок-участка 1,5 км				Длина блок-участка 2,0 км			
			Число задерживаемых поездов		Поездо-часы задержки		Число задерживаемых поездов		Поездо-часы задержки	
Груз.	Пасс.	ч	Груз.	Пасс.	Груз.	Пасс.	Груз.	Пасс.	Груз.	Пасс.
Скорость движения грузовых поездов 40 км/ч, пассажирских – 80 км/ч										
40	30	0,5	0,75	0,54	0,17	0,13	0,88	0,63	0,33	0,27
		1,0	1,50	1,09	0,34	0,26	1,75	1,27	0,57	0,45
		1,5	2,23	1,63	0,51	0,39	2,62	1,90	0,80	0,62
		2,0	2,96	2,18	0,68	0,52	3,48	2,54	1,03	0,80
		2,5	3,68	2,72	0,84	0,64	4,34	3,17	1,26	0,97
		3,0	4,40	3,27	1,01	0,77	5,19	3,81	1,50	1,15
		3,5	5,12	3,81	1,17	0,90	6,04	4,44	1,73	1,33
		4,0	5,84	4,35	1,33	1,03	6,88	5,08	1,96	1,50
		4,5	6,55	4,90	1,50	1,16	7,73	5,71	2,18	1,68
		5,0	7,27	5,44	1,66	1,29	8,57	6,35	2,41	1,85
		5,5	7,99	5,99	1,82	1,42	9,42	6,98	2,64	2,03
		6,0	8,71	6,53	1,99	1,55	10,26	7,62	2,87	2,20
80	25	0,5	1,91	0,56	0,66	0,38	2,62	0,45	4,20	1,93
		1,0	3,81	1,11	1,10	0,51	6,32	0,90	9,00	2,80
		1,5	5,70	1,67	1,54	0,64	11,10	1,35	15,52	3,81
		2,0	7,56	2,22	1,96	0,77	16,95	1,80	23,78	4,96
		2,5	9,40	2,78	2,38	0,91	23,89	2,25	33,76	6,25
		3,0	11,24	3,34	2,80	1,04	31,91	2,70	45,49	7,69
		3,5	13,06	3,89	3,22	1,17	41,02	3,14	58,94	9,27
		4,0	14,87	4,45	3,63	1,30	51,21	3,59	74,13	11,00
		4,5	16,67	5,01	4,05	1,43	62,50	4,04	91,05	12,9
		5,0	18,47	5,56	4,46	1,57	74,87	4,49	109,7	14,9
		5,5	20,26	6,12	4,87	1,70	88,34	4,94	130,1	17,0
		6,0	22,06	6,67	5,28	1,83	102,9	5,39	152,2	19,3

Окончание табл. 1

Размеры движения, поездов		Время восстановления	Длина блок-участка 1,5 км				Длина блок-участка 2,0 км			
			Число задерживаемых поездов		Поездо-часы задержки		Число задерживаемых поездов		Поездо-часы задержки	
Груз.	Пасс.	ч	Груз.	Пасс.	Груз.	Пасс.	Груз.	Пасс.	Груз.	Пасс.
Скорость движения грузовых поездов 60 км/ч, пассажирских – 120 км/ч										
40	30	0,5	0,64	0,46	0,15	0,12	0,70	0,50	0,19	0,14
		1,0	1,27	0,93	0,30	0,23	1,40	1,01	0,39	0,29
		1,5	1,89	1,39	0,45	0,35	2,09	1,51	0,58	0,43
		2,0	2,50	1,85	0,60	0,46	2,77	2,02	0,76	0,57
		2,5	3,11	2,32	0,74	0,58	3,44	2,52	0,95	0,72
		3,0	3,72	2,78	0,89	0,69	4,11	3,03	1,14	0,86
		3,5	4,33	3,24	1,03	0,81	4,78	3,53	1,32	1,00
		4,0	4,94	3,71	1,17	0,92	5,45	4,03	1,51	1,14
		4,5	5,56	4,17	1,32	1,04	6,12	4,54	1,69	1,29
		5,0	6,18	4,63	1,47	1,15	6,79	5,04	1,88	1,43
		5,5	6,80	5,10	1,62	1,27	7,45	5,55	2,06	1,57
6,0	7,41	5,56	1,76	1,38	8,12	6,05	2,24	1,72		

циональному увеличению потерь поездо-часов грузовыми поездами, практически не сказываясь на величине их дополнительных остановок. С увеличением количества грузовых поездов по отношению к количеству пассажирских потери в поездной работе растут вследствие приоритетного пропуска пассажирских поездов, приводящего к увеличению числа и времени стоянок грузовых поездов под обгоном. Потери для пассажирских поездов относительно невелики.

При величине коэффициента использования пропускной способности меньше 0,5 потери поездо-часов грузовыми поездами и количество их дополнительных остановок относительно невелики.

4. Алгоритм расчета влияния отказов устройств ЭЦ на движение поездов на промежуточных станциях

При сквозном пропуске поездов через станцию или при работе в режиме автодействия отказы системы ЭЦ промежуточных станций вызывают необходимость движения поездов при запрещающих или пригласительных огнях

светофоров, вносят помехи в поездопоток аналогично отказам проходных сигнальных точек автоблокировки. При работе в таких режимах станцию можно представить как своеобразный перегон.

Отказы устройств ЭЦ приводят к увеличению продолжительности трех операций: приготовления маршрута, открытия сигнала и проследования поездом маршрута приема и/или отправления. Кроме того, после обнаружения нарушения нормальной работы устройств ЭЦ до начала установки первого маршрута дежурный по станции должен выполнить ряд действий, чтобы лично убедиться в готовности маршрута для его использования. На выполнение таких операций уходит 0,16–0,33 часа в зависимости от конкретных условий на станции, и по существу это не что иное как «окно» [25].

На промежуточных станциях обычно отсутствуют другие работники службы движения, которые могли бы помочь дежурному по станции, продолжительность «окна» на них ближе к верхнему пределу.

Отказы устройств ЭЦ могут привести просто к увеличению времени на установку маршрутов на 3–5 минут, если при этом сохраняется возможность пропуска поездов при разрешающих показаниях светофоров. Однако примерно половина отказов вызывает необходимость перехода на пропуск поездов с использованием пригласительного сигнала, что приводит к дополнительным потерям времени хода поезда.

Время открытия сигнала растет, т. к. перед приемом или отправлением поезда при запрещающем показании соответствующего светофора дежурный по станции должен выполнить ряд дополнительных операций, чтобы лично убедиться в готовности маршрута для его использования.

Третья составляющая определяет потери поездочасов из-за увеличения времени хода поезда по станции и потери из-за дополнительных обгонов грузовых поездов пассажирскими поездами. При этом коэффициенты участковой скорости определяются по известным соотношениям [26].

Большинство поездов проходит промежуточные станции без плановой остановки. Поэтому при использовании пригласительного сигнала дополнительные потери поездочасов за время пропуска поездов при ручной установке и разделке маршрута (от момента окончания «окна» до окончания времени восстановления) можно рассчитывать в первом приближении по методике аналогичной той, что рассматривалась для устройств автоблокировки.

В исходных данных необходимо задавать дополнительно следующие параметры: сумма длин горловины и пути приема – $L_{вх}$, км; сумма длин горловины отправления и первого блок-участка – $L_{вых}$, км; длина блок-участка между предупредительным и входным светофорами – $l_{пр}$, км; время установки маршрута при нарушениях нормальной работы устройств ЭЦ – $t_{уст}$, ч; продолжительность «окна» – $t_{ок}$, ч.

Расчет влияния на движение поездов отказов устройств ЭЦ на промежуточных станциях двухпутных линий можно проводить следующим порядком.

Расчетный интервал попутного следования между грузовыми поездами находится с использованием формулы (1). Величина среднего интервала между грузовыми поездами вычисляется по формуле (3).

Интервал между грузовыми поездами после проследования станции при запрещающих показаниях входного светофора с учетом дополнительного времени $t_{уст}$ на установку маршрута

$$I_{кр.гр} = I_{р.гр} + 2 \left(\frac{l_{ср} + l_{пр} + L_{вх}}{3} + l_{гр} \right) \left(\frac{1}{V_{ж.гр}} - \frac{1}{V_{г.гр}} \right) + t_{уст}. \quad (18)$$

Этот интервал при запрещающих показаниях выходного светофора

$$I_{кр.гр} = I_{р.гр} + 2 \left(\frac{l_{ср} + L_{вх} + L_{вых}}{3} + l_{гр} \right) \left(\frac{1}{V_{ж.гр}} - \frac{1}{V_{г.гр}} \right) + t_{уст}. \quad (19)$$

Интервалы между пассажирскими поездами рассчитываются по подобным формулам с подстановкой в них численных значений средней длины пассажирского поезда и его соответствующих скоростей.

Общее количество поездов, прошедших станцию при запрещающих показаниях светофоров при $I_{кр.гр} \geq I_{ср.гр}$ или при $I_{кр.гр} < I_{ср.гр}$ соответственно

$$n_{кр} = \frac{T_B - t_{ок}}{I_{кр.гр}}, \quad n_{ср} = \frac{T_B - t_{ок}}{I_{ср.гр}}. \quad (20)$$

Из них количество грузовых и пассажирских находится по формулам (10).

Потери времени хода первого поезда при проследовании станции при запрещающих показаниях входного светофора для грузовых поездов:

$$\Delta t_{гр} = \frac{2l_{ср}}{V_{г.гр} + V_{ж.гр}} + \frac{2l_{пр}}{V_{ж.гр}} + \frac{L_{вх} + l_{гр}}{V_{пр}} + t_{ост} + \frac{V_{г.гр}^2 + V_{пр}^2}{2\alpha_y V_{г.гр}} - \frac{l_{ср} + l_{пр} + L_{вх}}{V_{г.гр}}; \quad (21)$$

для пассажирских поездов:

$$\Delta t_{пс} = \frac{2l_{ср}}{V_{г.пс} + V_{ж.пс}} + \frac{2l_{пр}}{V_{ж.пс}} + \frac{L_{вх} + l_{пс}}{V_{пр}} + t_{ост} + \frac{V_{г.пс}^2 + V_{пр}^2}{2\alpha_y V_{г.пс}} - \frac{l_{ср} + l_{пр} + L_{вх}}{V_{г.пс}}. \quad (22)$$

То же при запрещающих показаниях выходного светофора для грузовых поездов:

$$\Delta t_{гр} = \frac{2l_{пр}}{V_{г.гр} + V_{ж.гр}} + \frac{2L_{вх}}{V_{ж.гр}} + \frac{L_{вых}}{V_{пр}} + t_{ост} + \frac{V_{г.гр}^2 + V_{пр}^2}{2\alpha_y V_{г.гр}} - \frac{l_{пр} + L_{вх} + L_{вых}}{V_{гр}}; \quad (23)$$

для пассажирских поездов:

$$\Delta t_{\text{пс}} = \frac{2l_{\text{пр}}}{V_{\text{г.пс}} + V_{\text{ж.пс}}} + \frac{2L_{\text{вх}}}{V_{\text{ж.пс}}} + \frac{L_{\text{вых}}}{V_{\text{пр}}} + t_{\text{ост}} + \frac{V_{\text{г.пс}}^2 + V_{\text{пр}}^2}{2\alpha_{\text{у}} V_{\text{г.пс}}} - \frac{l_{\text{пр}} + L_{\text{вх}} + L_{\text{вых}}}{V_{\text{пс}}}. \quad (24)$$

Если время приготовления маршрута меньше интервала между поездами $I_{\text{кр}}$ и пригласительный сигнал на светофоре загорается до подхода к нему поезда, то в формулах (23) и (24) время $t_{\text{ост}}$ не учитывается.

Далее порядок расчета полностью совпадает с порядком расчета по определению потерь поездо-часов и количества остановок поездов при отказах устройств двухпутной автоблокировки.

Общее количество потерь поездо-часов грузовыми поездами:

$$T_{\text{гр}} = T_{\text{о1гр}} + T_{\text{о2гр}} + T_{\text{о3гр}} + T_{\text{ок}} \frac{T_{\text{огр}} + T_{\text{о2гр}} + T_{\text{о3гр}}}{T_{\text{о1гр}} + T_{\text{о2гр}} + T_{\text{о3гр}} + T_{\text{о1пс}} + T_{\text{о2пс}}}; \quad (25)$$

пассажирскими поездами:

$$T_{\text{пс}} = T_{\text{о1пс}} + T_{\text{о2пс}} + T_{\text{ок}} \frac{T_{\text{о1пс}} + T_{\text{о2пс}}}{T_{\text{о1гр}} + T_{\text{о2гр}} + T_{\text{о3гр}} + T_{\text{о1пс}} + T_{\text{о2пс}}}. \quad (26)$$

Общее среднее число остановок грузовых поездов:

$$n_{\text{ост.гр}} = n_{\text{кр.гр}} + \frac{T_{\text{огр}}}{t_{\text{об}}} + n_{\text{ок}} \frac{n_{\text{кр.гр}} t_{\text{об}} + T_{\text{о3гр}}}{n_{\text{кр.гр}} t_{\text{об}} + T_{\text{о3гр}}}; \quad (27)$$

пассажирских поездов:

$$n_{\text{ост.пс}} = n_{\text{кр.пс}} + n_{\text{ок}} \frac{n_{\text{кр.пс}} t_{\text{об}}}{n_{\text{кр.пс}} t_{\text{об}} + T_{\text{о3гр}}}. \quad (28)$$

Таким образом, при расчетах потерь в движении поездов через промежуточные станции от отказов устройств ЭЦ при их работе в режиме автодействия приходится учитывать некоторые параметры устройств автоблокировки на прилегающих к станции перегонах, а также особенности организации на станции работ при движении поезда по пригласительному огню на входном или выходном светофоре.

Ориентировочное количество задержанных поездов $n_{\text{ок}}$ и время простоя $T_{\text{ок}}$ для двухпутных линий в зависимости от времени перехода на ручное управле-

Таблица 2. Количество задержанных поездов и время их простоя при переходе на ручное управление централизованными стрелками на промежуточных станциях двухпутных линий

Размеры движения, пар поездов		Число задерживаемых поездов, $n_{ок}$			Поездо-часы задержки, $T_{ок}$		
Груз.	Пасс.	Продолжительность «окна», ч			Продолжительность «окна», ч		
		0,25	0,5	1,0	0,25	0,5	1,0
40	30	0,1	0,3	2,2	8,7	11,3	14,2
50	26	0,2	0,7	3,1	9,1	11,7	15,0
60	25	0,4	1,3	4,4	10,2	13,5	17,8
70	25	0,7	2,1	6,2	11,8	16,0	21,6
80	25	1,2	3,2	8,8	13,2	18,6	26,2
90	20	1,4	3,7	10,0	10,4	15,6	23,2
100	20	2,1	5,4	14,0	13,9	18,0	24,3

ние стрелками и сигналами на станциях можно брать из табл. 2, построенной на основе [11].

На эти показатели основное влияние оказывают интенсивность движения поездов, соотношение между грузовыми и пассажирскими поездами и продолжительность технологического «окна».

Заключение

Расчеты неплановых остановок и задержек поездов при отказах в системах интервального регулирования движения поездов относительно сложны вследствие необходимости учета многих факторов.

В статье изложены основные результаты разработки алгоритмов и расчетов величины потерь в движении грузовых и/или пассажирских поездов по двухпутным перегонам при ложном загорании красного огня проходного светофора автоблокировки, входных и/или выходных светофоров на промежуточных станциях при сквозном пропуске поездов. При разработке алгоритмов учтены результаты работы отечественных ученых.

При расчетах по разработанному алгоритму учитываются интенсивность отказов, продолжительность времени восстановления работоспособности устройств, продолжительность стоянки поезда перед ложно горящим красным огнем светофора и потери времени его хода, длины поездов, длины блок-участков на перегоне или горловин и приемоотправочных путей на станции. Принимается во внимание также интенсивность движения поездов, соотношение количества грузовых и пассажирских поездов на перегоне, их ускорения; скорости движения

по графику и при их ограничении; коэффициент съема пропускной способности пассажирскими поездами.

На станциях дополнительно учитываются потери времени из-за необходимости выполнения ряда операций для обеспечения безопасности движения поездов по пригласительным сигналам.

Расчеты легко программируются, что обеспечивает их реализацию в компьютерной среде. В статье приведены некоторые результаты расчетов неплановых остановок и задержек поездов для характерных условий при отказах в рассматриваемых системах интервального регулирования их движения.

Библиографический список

1. Гапанович В. А. Методы и технические средства определения местоположения подвижного состава / В. А. Гапанович, В. И. Головин, В. И. Астрахан // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 2. – С. 10–13.
2. Розенберг И. Н. Инновационные технологии интервального регулирования – основа системы управления движением на МЦК / И. Н. Розенберг, В. Г. Матюхин, А. Б. Шабунин, В. И. Уманский // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 6. – С. 5–10.
3. Шаманов В. И. Системы интервального регулирования движения поездов с цифровыми радиоканалами / В. И. Шаманов // Автоматика на транспорте. – 2018. – Т. 4. – № 2. – С. 223–240.
4. Büssmann F. Yu, Scheier B., Brinkmann F., Jäder B. Wirtschaftlichkeit eines satellitengestützten ERTMS für deutsche Regionalstrecken // Signal und Draht. – 2016. – В. 108. – № 10. – S. 6–11.
5. Sauer C. Gleisstromkreise – ein veraltetes oder aktuelles Mittel zur Gleisfreimtlung // Eisenbahningenieur. – 2014. – В. 65. – № 7. – S. 25–30.
6. Rosenbergen M., Pointer F. Hochverfügbarkeit: Definition, Einflussfaktoren und Lösungen // Signal und Draht. – 2015. – В. 107. – № 6. – S. 6–8.
7. Watanabe I., Takashige T. Moving Block System with Continuous Train Detection Utilizing Train Shutting Impedance of Track Circuit // Quarterly Reports of RTRI. – 1989. – № 4. – Pp. 9–11.
8. Vantuono W. Train control systems in the United States // Internationale Railway Journal, 2009. – № 10. – Pp. 32–34, 36.
9. Railway Operation and Control. 3rd edition // Washington: VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace. – 2014. – 284 p.
10. Розенберг Е. Н. Техничко-экономическая эффективность многоуровневой системы управления и обеспечения безопасности движения поездов / Е. Н. Розенберг, В. И. Талалаев, В. И. Шаманов. – М.: Изд-во ВНИИАС, 2004. – 121 с.
11. Кочнев Ф. П. Управление эксплуатационной работой железных дорог / Ф. П. Кочнев, И. В. Сотников. – М.: Транспорт, 1990. – 424 с.
12. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. – М.: ООО «Техинформ», ООО Центр «Транспорт», 2012. – 512 с.
13. Сапожников Вал. В. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: учеб. пособие / Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, В. И. Шаманов. – М.: ФГПУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017. – 318 с.

14. Абрамов В. М. Критерии эффективности функционирования автоблокировки с учетом ее надежности / В. М. Абрамов, А. А. Разгонов, Б. А. Давлетьяров // Вестник ВНИИЖТа. – 1977. – № 1. – С. 51–54.
15. Козлов В. Е. Пропускная способность железнодорожных линий и надежность технических устройств / В. Е. Козлов // Вестник ВНИИЖТа. – 1979. – № 4. – С. 1–6.
16. Каретников А. Д. График движения поездов / А. Д. Каретников, Н. А. Воробьев. – М.: Транспорт, 1979. – 301 с.
17. Козлов В. Е. Отказы устройств автоматики и телемеханики и их влияние на эксплуатационные показатели железных дорог / В. Е. Козлов, А. Ф. Михайлов, В. М. Абрамов, Б. А. Давлетьяров // Автоматика и связь / ЦНИИТЭИ МПС. – 1973. – Вып. 6. – 17 с.
18. Шишляков А. В. Эксплуатационная надежность устройств автоблокировки и АЛС / А. В. Шишляков, Ю. А. Кравцов, А. Ф. Михайлов. – М.: Транспорт. 1969. – 96 с.
19. Козлов В. Е. Техничко-экономическая оценка надежности устройств СЦБ на двухпутных линиях / В. Е. Козлов, Е. Г. Ефимова // Вестник ВНИИЖТа. – 1982. – № 7. – С. 21–24.
20. Инструкция по определению станционных и межпоездных интервалов № ЦД-361. – М.: Транспорт, 1995. – 31 с.
21. Угрюмов А. К. Неравномерность движения поездов / А. К. Угрюмов. – М.: Транспорт, 1968. – 112 с.
22. Shamanov V. Influence of train flow dynamics on quality of interval regulation // Scientific discussion. – 2020. – Vol. 1. – № 3. – Pp. 43–45.
23. Макаровичин А. М. Использование и развитие пропускной способности железных дорог / А. М. Макаровичин, Ю. В. Дьяков. – М.: Транспорт, 1981. – 287 с.
24. Шаманов В. И. Методика расчета эффективности технических мероприятий по повышению надежности действующих устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) / В. И. Шаманов, Б. М. Ведерников. – М.: МПС СССР, 1990. – 79 с.
25. Инструкции по движению поездов и маневровой работе на железных дорогах Российской Федерации № 1362р от 10 июля 2012 г. – М.: «ТРАНСИНФО ЛТД», 2012. – 441 с.
26. Баранов А. М. Рациональная загрузка железнодорожных линий / А. М. Баранов, В. Е. Козлов, А. Д. Чернюгов // Сборник научных трудов ВНИИЖТ. – 1988. – Вып. 361. – 208 с.

V.I. Shamanov, Doctor of Technical Sciences

*Department of Automation, remote control and communication on railway transport,
Russian University of Transport (MIIT), Moscow*

THE EFFECT OF FAILURES IN INTERVAL CONTROL SYSTEMS ON THE MOVEMENT OF TRAINS ON DOUBLE-TRACK SECTIONS

The level of reliability of systems for train traffic train separation directly affects the safety and continuity of their movement, the speed and timing of delivery of goods and passengers, the labor intensity and cost of transportation, and the costs of operating these systems.

If we consider a section of a railway as a complex dynamic system, then with a relatively small weight of fixed assets of technical means intended for interval regulation of train traffic, failures in them significantly affect the system output.

On the railways of Russia, the systems of interval regulation are mainly used with the use of track circuits and the division of hauls into block. Such systems are widely used on the world's railways. Therefore, the problem of quantifying losses in train movement from failures of electric interlocking devices while through-working and from failures of automatic blocking devices is relevant.

The amount of loss depends on the intensity of failures of technical means and the time to restore their operability, on the intensity of train traffic, the length of block sections, the ratio of freight and passenger trains on the section, the speed of their movement according to the schedule and the degree of speed reduction due to failures of the considered technical means. ... Both freight and passenger trains move along sections of the Russian railways, the speeds of which can differ significantly, which also significantly affects the traffic loss from such failures. When calculating, one has to use data on block crossing capacity and the capability of accelerating trains.

The calculation results provide the possibility of an objective choice of the type of systems under consideration and the requirements for them in a new design or during their reconstruction on railway sections, as well as the possibility of correct distribution of costs to increase the reliability of the operated systems.

train separation systems, failures, losses in train operation, unscheduled break in traffic of trains, losses of train hours, calculations, parameters taken into account, calculation results

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-3-395-413

References

1. *Gapanovich V. A., Golovin V. I., Astrakhan V. I.* (2019) Metody i tekhnicheskiye sredstva opredeleniya mestopolozheniya podvizhnogo sostava [Methods and technical means for rolling stock positioning]. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, communication, informatics], no. 2, pp. 10–13. (In Russian)
2. *Rozenberg I. N., Matyukhin V. G., Shabunin A. B., Umanskiy V. I.* (2019) Innovatsionnyye tekhnologii interval'nogo regulirovaniya – osnova sistemy upravleniya dvizheniyem na MTSK [Innovative train spacing control technologies as a bases for traffic management system at the Moscow Central Ring]. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, communication, informatics], no. 6, pp. 5–10. (In Russian)
3. *Shamanov V. I.* (2018) Sistemy interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov s cifrovymi radiokanalami [Systems interval regulation of traffic trains with digital radio channels]. *Avtomatika na transporte* [Automation on transport], vol. 4, no. 2, pp. 223–239. (In Russian)
4. *Büssmann F., Scheier B., Brinkmann F., Jäder B.* (2016) Wirtschaftlichkeit eines satellitenge stützten ERTMS für deutsche Regionalstrecken. *Signal und Draht*, b. 108, h. 10, s. 6–11.
5. *Sauer C.* (2014) Gleisstromkreise – ein veraltetes oder aktuelles Mittel zur Gleisfreimtlung. *Eisenbahningenieur*, b. 65, h. 7, s. 25–30.
6. *Rosenbergen M., Pointer F.* (2015) Hochverfügbarkeit: Definition, Einflussfaktoren und Lösungen. *Signal und Draht*, b. 107, h. 6, s. 6–8.
7. *Watanabe I., Takashige T.* (1989) Moving Block System with Continuous Train Detection Utilizing Train Shutting Impedance of Track Circuit. *Quarterly Reports of RTRI*, no. 4, pp. 9–11.
8. *Vantuono W.* (2009) Train control systems in the United States. *International Railway Journal*, no. 10, pp. 32–34, 36.
9. *Railway Operation and Control*. 3rd edition. Washington: VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace, 2014, 284 p.
10. *Rosenberg E. N., Talalaev V. I., Shamanov V. I.* (2004) *Tekhniko-ekonomicheskaya effektivnost' mnogourovnevoy sistemy upravleniya i obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poyezdov* [Tech-

- nical and economic efficiency of a multi-level control system and ensuring the safety of train traffic]. Moscow, JSC NIIAS Publ., 121 p. (In Russian)
11. Kochnev F. P., Sotnikov I. V. (1990) *Upravleniye ekspluatatsionnoy rabotoy zheleznykh dorog* [Management of operational work of railways]. Moscow, Transport Publ., 424 p. (In Russian)
 12. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznykh dorog Rossiyskoy Federatsii* [Rules of technical operation of the railways of the Russian Federation]. Moscow, LLC Tekhinform, LLC Center Transport, 2012, 512 p. (In Russian)
 13. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V., Shamanov V. I. (2017) *Nadezhnost sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki, telemekhaniki i svyazi: uchebnoye posobiye* [Reliability of systems of railway automation, telemechanics and communication: learning guide]. Moscow, Federal Government Budgetary Institution for further vocational education Publ., p. 318. (In Russian)
 14. Abramov V. M., Razgonov A. A., Davletyarov B. A. (1977) Kriterii effektivnosti funktsionirovaniya avtoblokirovki s uchedom yeye nadezhnosti [Criteria for the effectiveness of the functioning of automatic blocking taking into account its reliability]. *Vestnik VNIIZHTa* [Bulletin of the Railway research institute of JSC Russian railways], no. 1, pp. 51–54. (In Russian)
 15. Kozlov V. Y. (1979) Propusknaya sposobnost zheleznodorozhnykh liniy i nadezhnost tekhnicheskikh ustroystv [Capacity of railway lines and reliability of technical devices]. *Vestnik VNIIZHTa* [Bulletin of the Railway research institute of JSC Russian railways], no. 4, pp. 1–6. (In Russian)
 16. Karetnikov A. D., Vorobyev N. A. (1979) *Grafik dvizheniya poyezdov* [Train traffic schedule]. Moscow, Transport Publ., 301 p. (In Russian)
 17. Kozlov V. E., Mikhailov A. F., Abramov V. M., Davletyarov B. A. (1973) Otkazy ustroystv avtomatiki i telemekhaniki i ikh vliyanie na ekspluatatsionnyye pokazateli zheleznykh dorog [Failures of automation and telemechanics devices and their impact on the performance of railways]. *Avtomatika i svyaz* [Automation and communication]. Central Research Institute of Information and Technical and Economic Research of Railway Transport of the Ministry of Railways of Russia. Iss. 6, 17 p. (In Russian)
 18. Shishlyakov A. V., Kravtsov Y. A., Mikhailov A. F. (1969) *Ekspluatatsionnaya nadezhnost ustroystv avtoblokirovki i ALS* [Operational reliability of automatic blocking devices and Automatic Locomotive Signalling System]. Moscow, Transport Publ., 96 p. (In Russian)
 19. Kozlov V. E., Efimova E. G. (1982) Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka nadezhnosti ustroystv STSB na dvukhputnykh liniyakh [Technical and economic assessment of the reliability of signaling devices on double-track lines]. *Vestnik VNIIZHTa* [Bulletin of the Railway research institute of JSC Russian railways], no. 7, pp. 21–24. (In Russian)
 20. *Instruktsii po opredeleniyu stantsionnykh i mezhpoyezdnykh intervalov*, [Instructions for determining station and inter-train intervals]. Utv. MPS Rossii 16 iyunya 1995. № TSD-361. Approved by the Ministry of Railways of Russia on June 16, 1995 no. Central Directorate-361.], 31 p. (In Russian)
 21. Ugryumov A. K. (1968) *Neravnomernost dvizheniya poyezdov* [Uneven movement of trains]. Moscow, Transport Publ., 112 p. (In Russian)
 22. Shamanov V. (2020) Influence of train flow dynamics on quality of interval regulation. *Scientific discussion*, vol. 1, no. 3, pp. 43–45.
 23. Makarochkin A. M., Dyakov Y. V. (1981) *Ispolzovaniye i razvitiye propusknoy sposobnosti zheleznykh dorog* [Use and development of the capacity of railways]. Moscow, Transport Publ., 287 p. (In Russian)

24. *Shamanov V. I., Vedernikov B. M. (1990) Metodika rascheta effektivnosti tekhnicheskikh meropriyatiy po povysheniyu nadezhnosti deystvuyushchikh ustroystv signalizatsii, tsentralizatsii i blokirovki (STSB) [Methodology for calculating the effectiveness of technical measures to improve the reliability of operating signaling, centralization and blocking devices (signals and interlocking)]. Moscow, Ministry of Railways of the USSR, 79 p. (In Russian)*
25. *Instruktsii po dvizheniyu poyezdov i manevrovoy rabote na zheleznykh dorogakh Rossiyskoy Federatsii № 1362r ot 10 iyulya 2012 [Instructions for the movement of trains and shunting work on the railways of the Russian Federation No. 1362r dated July 10, 2012]. Moscow, "TRANSINFO LTD", 2012, 441 p. (In Russian)*
26. *Baranov A. M., Kozlov V. Y., Chernyugov A. D. (1988) Ratsionalnaya zagruzka zheleznodorozhnykh liniy [Rational loading of railway lines]. Sbornik nauchnykh trudov VNIIZHT [Collection of scientific papers of the Railway research institute of JSC Russian railways], iss. 361, 208 p. (In Russian)*

*Статья представлена к публикации членом редколлегии
профессором А. Б. Никитиным*

Поступила в редакцию 04.03.2021, принята к публикации 30.03.2021

ШАМАНОВ Виктор Иннокентьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта
shamanov_vi@mail.ru

© Шаманов В. И., 2021

УДК 681.518.3

Д. С. Кокорев

В. Г. Сидоренко, докт. техн. наук

С. К. Хромов

*Кафедра «Управление и защита информации»,
Российский университет транспорта, Москва*

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ СЛУЖБЫ ПОДДЕРЖКИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В статье рассмотрен способ автоматизации организации работы службы поддержки пользователей автоматизированных систем управления (АСУ) транспортных предприятий. В условиях цифровизации, постоянного совершенствования, расширения функциональных возможностей таких АСУ, роста числа их пользователей актуальность проблемы не вызывает сомнений. Работа службы поддержки пользователей АСУ транспортных предприятий представлена как система массового обслуживания. Проанализирована возможность применения различных методов для решения поставленной задачи. Дано описание работы службы поддержки, способы формирования ее отделов. Классифицированы инциденты, которыми она занимается. Разработан алгоритм формирования отделов службы поддержки. Решить поставленную задачу предлагается с помощью генетического алгоритма. Алгоритм и понятия, характеризующие его, адаптированы для достижения заявленной в статье цели. Представлены варианты кроссинговера, которые могут использоваться генетическим алгоритмом при решении различных классов задач. С помощью разработанного программного обеспечения проведено моделирование организации работы службы поддержки с применением алгоритма распределения сотрудников. Выполнен сравнительный анализ результатов моделирования работы отделов при различных способах их формирования, в т. ч. полученных с использованием генетического алгоритма. Анализ показал эффективность применения генетического алгоритма при планировании работы соответствующих подразделений. Продемонстрирована возможность адаптации разработанного алгоритма для планирования работы персонала, задействованного в техническом содержании инфраструктуры городских рельсовых транспортных систем. Эта задача аналогична рассмотренной в данной статье, т. к. во многих случаях возникает необходимость или возможность использования сотрудников с различными компетенциями для выполнения только одного вида работ.

Планирование работы, служба поддержки, обработка инцидентов, автоматизированная система управления, информационная система, генетический алгоритм, кроссинговер, транспортная система
DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-3-414-437

Введение

В современном мире становится всё больше информации, обрабатываемой с помощью средств вычислительной техники. В Российской Федерации взят курс на цифровизацию [1–3].

С развитием цифровых технологий множатся информационные и автоматизированные системы управления (ИС и АСУ). Растет число бизнес-процессов, задействующих программное обеспечение (ПО). Пользователям приходится работать в разнообразных ИС и АСУ. Их сложность и разнообразие приводят к увеличению количества инцидентов (терминология ИТIL [4]), которыми занимается служба поддержки (СП) пользователей. Служба должна своевременно реагировать на поступающие запросы. Регламентные сроки описаны в *SLA (Service Level Agreement – соглашение об уровне услуг)* и *OLA (Operational Level Agreement – соглашение операционного уровня)* [4]. Для сохранения качества услуг необходимо либо расширять штат работников, либо менять технологии сопровождения.

Транспортные предприятия России работают в круглосуточном режиме, без праздников и выходных. При этом сотрудники могут работать по любому из разрешенных Трудовым кодексом графику рабочего времени [5]. Специфичным для части транспортных предприятий, например, ОАО «РЖД», является распределение сотрудников по часовым поясам. При этом следует понимать, что часть систем приходится сопровождать в круглосуточном режиме, поскольку от них зависят основные бизнес-процессы компании.

Однако переизбыток сотрудников СП для компании влечет дополнительные издержки. Значит, необходимо выбрать оптимальный состав работников СП и их график работы.

Средством решения этой задачи может стать внедрение (либо модернизация) программных средств управления персоналом. В статье описывается алгоритм, позволяющий автоматизировать организацию работы СП. В соответствии с алгоритмом распределения подбирается состав отделов (групп) службы.

1. Состояние вопроса

Сопровождение – неотъемлемая часть жизненного цикла любого программного обеспечения [6]. Один из этапов сопровождения – помощь пользователю в работе с ПО [7]. На транспортных предприятиях поддержка пользователей осуществляется самостоятельно (подрядчиком) либо совмещением обоих нижеприведенных вариантов:

1) пользователь звонит в СП, и ему отвечают сразу (в соответствии с моделью работы контакт-центра) [8, 9];

2) пользователь звонит в СП и оставляет заявку (так называемый инцидент) на обратную связь. Сотрудник СП связывается с пользователем, когда освобождается.

В статье анализируется второй вариант.

Российские компании широко освоили относительно простые и базовые цифровые технологии, но лишь немногие провели глубокую цифровизацию и реструктурировали бизнес-процессы [10].

На рынке представлено множество систем управления персоналом, обладающих различным функционалом [11]. Это, в частности:

- расчет заработной платы, командировочных расходов, премий и т. д.;
- составление штатного расписания, кадровой отчетности;
- анализ эффективности работы сотрудников, аттестация и оценка профессиональной пригодности, планирование кадровых перестановок.

При разработке собственного программного модуля для существующей системы *ERP (Enterprise Resource Planning* – планирование ресурсов предприятия) можно учесть все ее особенности и избежать сложностей внедрения самостоятельной системы управления персоналом.

Внедрение собственного программного модуля для автоматизации управления СП пользователей позволит увеличить скорость обработки инцидентов, равномерно распределить нагрузку на сотрудников и провести оценку эффективности работы сотрудников, определить приемлемый график работы и отпусков.

2. Постановка задачи по организации работы службы поддержки

Рассматриваемое в статье предприятие с развитой ИТ-инфраструктурой реализует множество бизнес-процессов, которые можно разделить на ключевые, управленческие и поддерживающие. Процессы формирования групп сотрудников СП и анализа методов оптимизации работы в группах являются поддерживающими бизнес-процессами, необходимыми для работы СП.

Рассматриваемая Служба поддержки включает несколько основных отделов (групп) – технической поддержки, поддержки юридических лиц, поддержки физических лиц, поддержки сотрудников. В СП также включены небольшие группы, состоящие из сотрудников отделов, которые участвуют в конференциях, совещаниях или обрабатывают особые поручения вне своих отделов. Каждая из групп работает с соответствующим типом инцидентов. Сортировать элементы по типам может система аналогичная описанной в статье [12].

3. Классификация обрабатываемых инцидентов

Поступающие на вход инциденты различаются по типу, сложности обработки и интенсивности их поступления.

В первые четыре группы входят инциденты четырех типов, поступающие с высокой интенсивностью (50–200 в день). Они направляются в четыре соответствующих отдела службы поддержки пользователей. Для обработки инцидентов этих типов может требоваться (в зависимости от сложности) 15, 30, 45, 60, 75 или 90 минут.

Для инцидентов двух остальных типов требуется большее время обработки, а интенсивность их поступления ниже (1–5 инцидентов в день). Для обработки

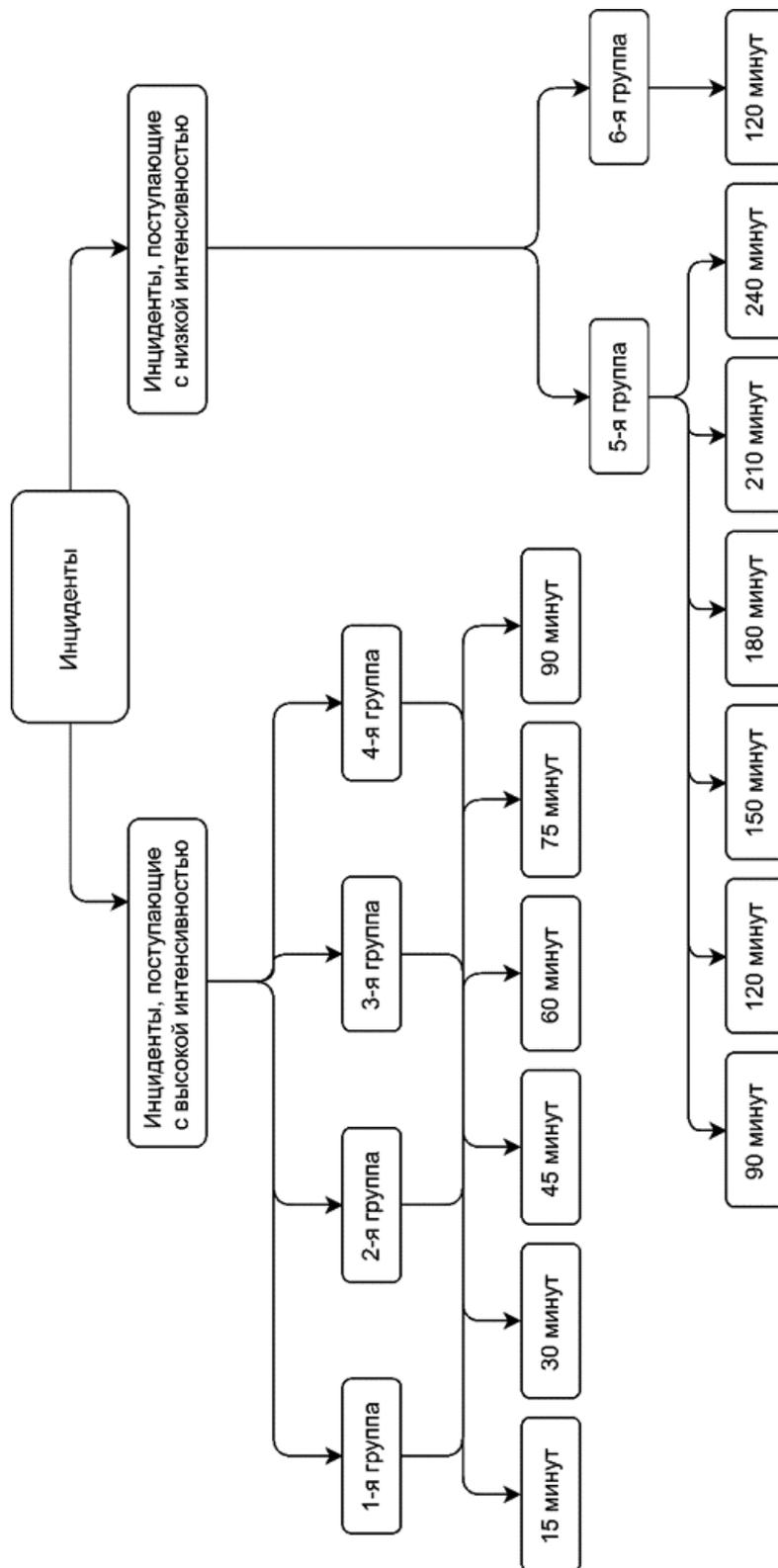


Рис. 1. Классификация инцидентов

инцидентов пятой группы требуется 90, 120, 150, 180, 210 или 240 минут, также в зависимости от сложности. Это различные поручения для сотрудников СП. На обработку инцидентов шестой группы всегда требуется одно и то же время – 120 минут. Сотрудники шестой группы принимают участие в совещаниях, конференциях и т. п. Классификация представлена на рис. 1.

4. Формирование групп сотрудников службы поддержки

Каждый из сотрудников обязательно должен входить в одну и только одну группу по обработке инцидентов, поступающих с высокой интенсивностью, и может дополнительно входить еще в одну группу по обработке инцидентов, поступающих с низкой интенсивностью. В каждую из групп должен входить хотя бы один сотрудник.

Пусть x_{ij} – принадлежность i -го сотрудника j -й группе, $x_{i,j} = \{0,1\}$, тогда перечисленные условия формализуются следующим образом:

$$\sum_{j=1}^{J_h} x_{i,j} = 1, i = 1..I, \quad (1)$$

$$\sum_{j=J_h+1}^{J_h+J_l} x_{i,j} \leq 1, i = 1..I, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{i,j} \geq 1, j = 1..(J_h + J_l), \quad (3)$$

где J_h – количество групп по обработке инцидентов, поступающих с высокой интенсивностью, эти группы имеют номера с 1 до J_h , в нашем случае, $J_h = 4$; J_l – количество групп по обработке инцидентов, поступающих с низкой интенсивностью, эти группы имеют номера с $J_h + 1$ до $J_h + J_l$, в нашем случае, $J_l = 2$; I – количество сотрудников, обрабатывающих инциденты.

Количество сотрудников в каждой из групп задается следующим условием:

$$\sum_{i=1}^I x_{i,j} = N_j, j = 1..J_h + J_l, \quad (4)$$

где N_j – заданное количество человек в j -й группе. В нашем случае для групп по обработке инцидентов, поступающих с высокой интенсивностью: $N_1 = N_2 = N_3 = N_4 = 10$, для групп по обработке инцидентов, поступающих с низкой интенсивностью: $N_5 = N_6 = 5$.

Сотрудники СП могут обладать различными навыками по обработке различных инцидентов.

Для расчета инцидентов будем использовать понятие «единичный инцидент» (ЕДИ). Будем считать единичным инцидентом простейший инцидент в нашей

системе. Сложность остальных инцидентов оценивается по отношению к единичному.

Пусть $s_{i,j} \left[\frac{\text{ЕдИ}}{15 \text{ мин}} \right]$ – интенсивность обработки инцидентов, отнесенных к j -й группе, i -м сотрудником.

Пусть $S = 1 \frac{\text{ЕдИ}}{15 \text{ мин}}$ – единичная интенсивность обработки инцидентов (1 единичный инцидент за 15 мин).

Целью реализации процесса формирования групп сотрудников СП является обеспечение такого состава групп, который позволит обработать все поступившие в течение рабочего дня инциденты, то есть мощность каждой из групп должна быть не меньше, чем потребность, представляющая собой инциденты, которые необходимо обработать. Формализуем это условие:

$$\sum_{i=1}^I \tau_{i,j} s_{i,j} x_{i,j} \geq A_j, j = 1..(J_h + J_l), \quad (5)$$

где $\tau_{i,j}$ – рабочее время, которую i -й сотрудник уделяет обработке инцидентов, отнесенных к j -й группе. Если i -й сотрудник включен только в j -ю группу, то интервал времени $\tau_{i,j}$ равен продолжительности рабочего дня $T = 480$ мин. Если i -й сотрудник включен в две группы, то сумма $\tau_{i,j_1} + \tau_{i,j_2}$ равна продолжительности рабочего дня T для $j_1 = 1..J_h, j_2 = (J_h + 1)..(J_h + J_l)$.

В нашем случае, интервалы времени $\tau_{i,5}$ и $\tau_{i,6}$ соответственно равны $\tau_5 = 150$ мин и $\tau_6 = 120$ мин.

Для сотрудников, работающих в двух группах $\tau_{i,j_1} = T - \tau_{j_2}$ для $j_1 = 1..J_h, j_2 = (J_h + 1)..(J_h + J_l)$.

A_j – потребность в обслуживании инцидентов, которую необходимо удовлетворить j -й группе в течение дня.

Расчет потребности A_j , которую необходимо удовлетворить j -й группе в течение дня, производится по следующей формуле:

$$A_j = \sum_{m=1}^{M_j} \theta_{m,j} q_{m,j}, j = 1..(J_h + J_l), \quad (6)$$

где $\theta_{m,j}$ [мин] – время, затрачиваемое на обработку инцидента m -го подтипа в j -й группе; $q_{m,j} \left[\frac{\text{ЕдИ}}{15 \text{ мин}} \right]$ – количество инцидентов m -го подтипа в j -й группе; M_j –

количество вариантов времен обработки инцидентов в j -й группе.

Используя методики, подобные данной [13–14], можно более точно определить потребности в условиях конкретного предприятия.

Пусть для нашей системы время, затрачиваемое на обработку инцидентов m -го подтипа в j -й группе, для групп по обработке инцидентов, поступающих с высокой интенсивностью, вычисляется следующим образом:

$$\theta_{m,j} = 15m, j = 1..J_h. \quad (7)$$

Время, затрачиваемое на обработку инцидентов m -го подтипа в 5-й группе, для групп по обработке инцидентов, поступающих с низкой интенсивностью, вычисляется следующим образом:

$$\theta_{m,5} = 15 (4 + 2m). \quad (8)$$

Время, затрачиваемое на обработку инцидентов m -го подтипа в 6-й группе, для групп по обработке инцидентов, поступающих с низкой интенсивностью постоянно:

$$\theta_{m,6} = 120. \quad (9)$$

Оптимальность найденного решения будем определять по заработной плате сотрудников:

$$W = \sum_{i=1}^I w_i \rightarrow \min. \quad (10)$$

Если условие (5) не выполняется, то к заработной плате, вычисляемой по формуле (10), добавляется штрафное значение, равное размеру оплаты труда общего числа сотрудников, у каждого из которых интенсивность обработки инцидентов во всех группах максимальна $s_{i,j} = 2 \frac{\text{ЕдИ}}{15 \text{ мин}}, i = 1..I, j = 1..(J_h + J_l)$. Вычислив по формулам (10–17), получим, что в этом случае оплата труда равна 312 000 руб.

Заработная плата формируется из оклада и премии. Размер заработной платы определяется по формуле:

$$w_i = w_{o,i} + w_{n,i}, i = 1..I. \quad (11)$$

Тарифная ставка оклада L_o – фиксированный размер оплаты труда сотрудника за исполнение трудовых обязанностей за день, у которого все интенсивности обработки инцидентов единичные:

$$L_o = 2100 \text{ руб.} \quad (12)$$

Коэффициент тарифной ставки оклада α_i прямо пропорционален интенсивности обработки инцидентов $s_{i,j}$ и от времени обработки инцидентов в группе τ_j :

$$\alpha_i = \frac{1}{S} \sum_{j=1}^{J_h+J_l} \frac{\tau_j}{\sum_{j=1}^{J_h+J_l} \tau_j} s_{i,j}, i = 1..I. \quad (13)$$

Оклад, фиксированный размер оплаты труда сотрудника за исполнение трудовых обязанностей за день без учета дополнительных выплат, $w_{o,i}$, составляет:

$$w_{o,i} = \alpha_i L_o, i = 1..I. \quad (14)$$

Тарифная ставка премии L_n – размер премиальной оплаты труда сотрудника, у которого все интенсивности, с которыми происходила обработка инцидентов в течение дня, единичные:

$$L_n = 1800 \text{ руб.} \quad (15)$$

Коэффициент тарифной ставки премии β_i прямо пропорционален интенсивности обработки инцидентов $s_{i,j}$ и от времени обработки инцидентов в группе $\tau_{i,j}$:

$$\beta_i = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^{J_h+J_l} \tau_{i,j} s_{i,j}, i = 1..I. \quad (16)$$

Размер премии, поощрительной выплаты за выполненную работу в течение дня, составляет:

$$w_{n,i} = \beta_i L_n, i = 1..I. \quad (17)$$

5. Подходы к решению задачи по организации работы службы поддержки

Задача, поставленная в статье, является *NP*-полной. Ее можно свести к задаче дискретной оптимизации, имеющей конечное множество допустимых решений, которые теоретически можно перебрать и выбрать наилучшее [15–16]. В нашем случае, как и во многих других, этот процесс займет слишком много времени.

Один из способов решения – метод ветвей и границ. Это является аналогом полного перебора. Его преимущество – исключение подмножеств допустимых решений, о которых заранее известно, что они не содержат оптимальных [17]. Метод ветвей и границ имеет смысл применять, если заранее известно, что среди множества решений будет лишь несколько подходящих, например, при поступлении очень большого количества инцидентов. Скорее всего, большин-

ство неверных решений будет исключено уже на первом шаге. В нашем случае подходящих вариантов слишком много, поэтому следует использовать эвристический алгоритм нахождения решения.

Задача, поставленная в статье, подобна задаче о назначении целей (комбинаторная оптимизация). Основное отличие заключается в том, что не используется вероятностный подход. Вместо вероятностей эффективность назначения оценивается значением интенсивности обработки инцидентов каждым сотрудником индивидуально.

Эту задачу можно изучить с точки зрения теории систем массового обслуживания (СМО). СП является СМО с ожиданием или системой без потерь, потому что при отсутствии свободных сотрудников инциденты образуют очередь. Рассматриваемую систему можно исследовать как состоящую из шести одноканальных СМО, т. к. каждый инцидент, поступающий на вход, может быть обработан только одной соответствующей группой. Рассматриваемая в статье система является открытой (обработанные инциденты выходят из системы) и однофазной (обработка состоит из одного этапа).

Поток инцидентов, поступающий на вход СП, характеризуется интенсивностями поступления каждого из типов инцидентов в определенный день k :

$$\lambda_{1,k}, \dots, \lambda_{J_h,k}, \lambda_{J_h+1,k}, \dots, \lambda_{J_h+J_l,k}; k = 1..K. \quad (18)$$

Интенсивности обработки инцидентов каждой из групп в определенный день будут равны:

$$\mu_{1,k}, \dots, \mu_{J_h,k}, \mu_{J_h+1,k}, \dots, \mu_{J_h+J_l,k}; k = 1..K. \quad (19)$$

Количество состояний СМО не ограничено, т. к. очередь в нашей системе не ограничена. Схема рассматриваемой системы представлена на рис. 2.

Отношение интенсивности поступления инцидентов $\lambda_{j,k}$ и интенсивности обработки инцидентов $\mu_{j,k}$ называется приведенной интенсивностью потока инцидентов, или интенсивностью нагрузки [18]:

$$\rho_{j,k} = \frac{\lambda_{j,k}}{\mu_{j,k}}. \quad (20)$$

Приведенная интенсивность потока инцидентов выражает среднее число инцидентов, приходящих за среднее время обслуживания одного инцидента.

Если $\lambda_{j,k} \geq \mu_{j,k}$ ($\rho_{j,k} \geq 1$), т. е. среднее число инцидентов, поступивших в систему за единицу времени, больше среднего числа обслуживаемых инцидентов, то очередь неограниченно растет, предельный режим не устанавливается и предельных вероятностей не существует.

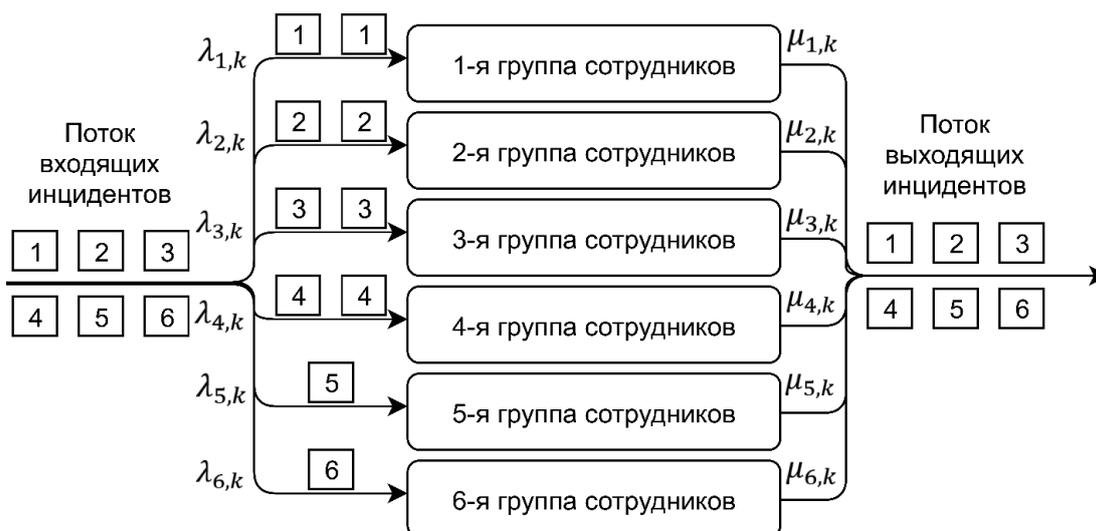


Рис. 2. Обработка инцидентов СМО

Поэтому предельные вероятности можно установить только при $\lambda_{j,k} < \mu_{j,k}$ ($\rho_{j,k} < 1$). При выполнении этого условия с течением времени устанавливается предельный режим.

Каждый инцидент, поступивший в СМО, будет обслужен, т. к. отсутствуют ограничения на очередь. Поэтому вероятность отказа равна нулю:

$$P_{\text{отк},j,k} = 0. \quad (21)$$

Относительная пропускная способность канала – вероятность принятия поступившего инцидента в систему равна единице:

$$Q_{j,k} = 1 - P_{\text{отк},j,k} = 1. \quad (22)$$

Абсолютная пропускная способность канала – среднее число инцидентов, обрабатываемых в единицу времени:

$$A_{j,k} = \lambda_{j,k} \cdot Q_{j,k} = \lambda_{j,k}. \quad (23)$$

Среднее число инцидентов в очереди:

$$L_{\text{оч},j,k} = \frac{\rho_{j,k}^2}{1 - \rho_{j,k}}. \quad (24)$$

Среднее время ожидания инцидента в очереди:

$$T_{\text{оч},j,k} = \frac{L_{\text{оч},j,k}}{\lambda_{j,k}} = \frac{\rho_{j,k}^2}{\lambda_{j,k}(1 - \rho_{j,k})} = \frac{\rho_{j,k}}{\mu_{j,k}(1 - \rho_{j,k})}. \quad (25)$$

Среднее время пребывания инцидента в СМО $T_{\text{СМО},j,k}$ складывается из среднего времени инцидента в очереди $T_{\text{оч},j,k}$ и среднего времени обработки инцидента $T_{\text{об},j,k}$:

$$T_{\text{СМО},j,k} = T_{\text{оч},j,k} + T_{\text{об},j,k} = \frac{\rho_{j,k}}{\mu_{j,k}(1-\rho_{j,k})} + \frac{1}{\mu_{j,k}} = \frac{1}{\mu_{j,k}(1-\rho_{j,k})} = \frac{\rho_{j,k}}{\lambda_{j,k}(1-\rho_{j,k})}. \quad (26)$$

На основе представленных выше критериев качества можно сформировать более релевантные оценки качества работы СП. Поскольку нас интересуют не обобщенные характеристики работы СП, а поиск конкретного рационального распределения сотрудников, рассмотрим решение поставленной задачи с использованием генетического алгоритма.

6. Решение задачи распределения сотрудников с применением генетического алгоритма

Широкое применение для решения задач, подобных той, что рассматривается в статье, получил генетический алгоритм. Его применяют и к другой задаче дискретной оптимизации – «задаче коммивояжера» [19]. В работе [20] исследована возможность использования генетических алгоритмов для планирования технического обслуживания подвижного состава.

В [21] также рассмотрено распределение трудовых ресурсов. Специфика задачи, рассмотренной в данной статье, связана с ограниченным размером рабочих групп.

Генетический алгоритм является эвристическим, т. е. имеет эмпирическое условие, упрощающее или ограничивающее перебор вариантов.

При описании генетического алгоритма используется терминология, принятая в биологии [22].

Ген – это атомарный элемент генотипа и, в частности, хромосомы. В нашей задаче геном является x_{ij} – принадлежность i -го сотрудника j -й группе.

Хромосома – это упорядоченная последовательность генов для каждого сотрудника:

$$\{x_{i,1}, \dots, x_{i,J_h}, x_{i,J_h+1}, \dots, x_{i,J_h+J_l}\}, i = 1..I. \quad (27)$$

Генотип (структура) – это набор хромосом данной особи:

$$\bigcup_{i=1}^I \{x_{i,1}, \dots, x_{i,J_h}, x_{i,J_h+1}, \dots, x_{i,J_h+J_l}\}. \quad (28)$$

Аллель – это значение конкретного гена $x_{i,j} = \{0, 1\}$.

Фенотип – набор значений данного генотипа, т. е. какое-то решение задачи.

Локус (позиция) – место размещения данного гена в хромосоме.

Особь – это набор хромосом с закодированными в них параметрами задачи. Особь определяется фенотипом.

Популяция – совокупность особей, каждую из которых задает ее фенотип.

Селекция – отбор наиболее приспособленных особей с помощью функции приспособленности.

Функция приспособленности, или фитнес-функция (fitness function), показывает меру приспособленности данной особи в популяции. Другими словами, насколько данная особь близка к оптимальному по выбранному критерию решению задачи. В нашем случае функция приспособленности рассчитывается по формуле (10).

Родитель – особь, которая участвует в формировании следующей популяции (потомков).

Потомок – особь, полученная в результате кроссинговера и входящая в новую популяцию.

Кроссинговер – операция получения потомков, при которой потомки формируются из хромосом родителей.

Мутация – операция, при которой потомки подвергаются случайным изменениям.

На первом шаге алгоритма создается популяция η случайных особей.

Пусть r – номер особи в популяции, тогда η_r – r -я особь в популяции. Для каждой особи η_r вычисляется значение фитнес-функции f_r по формуле (10).

Для проведения отбора потомков выполним сортировку особей по возрастанию значений фитнес-функции. Родителями выбирается первая половина особей:

$$\bigcup_{r=1}^{\frac{\eta}{2}} \{x_{i,1}, \dots, x_{i,J_h}, x_{i,J_h+1}, \dots, x_{i,J_h+J_l}\}. \quad (29)$$

7. Кроссинговер

Для получения новой популяции (потомков) среди родителей нужно провести операцию кроссинговера (скрещивания) [23].

При одноточечном кроссинговере определяется точка кроссинговера, расположенная между двумя определенными генами родителей. Части, на которые разделяются родители, будут являться составляющими потомков [24]. (рис. 3, а)

При двухточечном кроссинговере выбираются две точки кроссинговера между генами родителей. Каждый из родителей делится на три части, которые являются составляющими потомков [25] (рис. 3, б). При кроссинговере может выбираться и большее число точек. Такой алгоритм кроссинговера называется равномерным [26] (рис. 3, в).

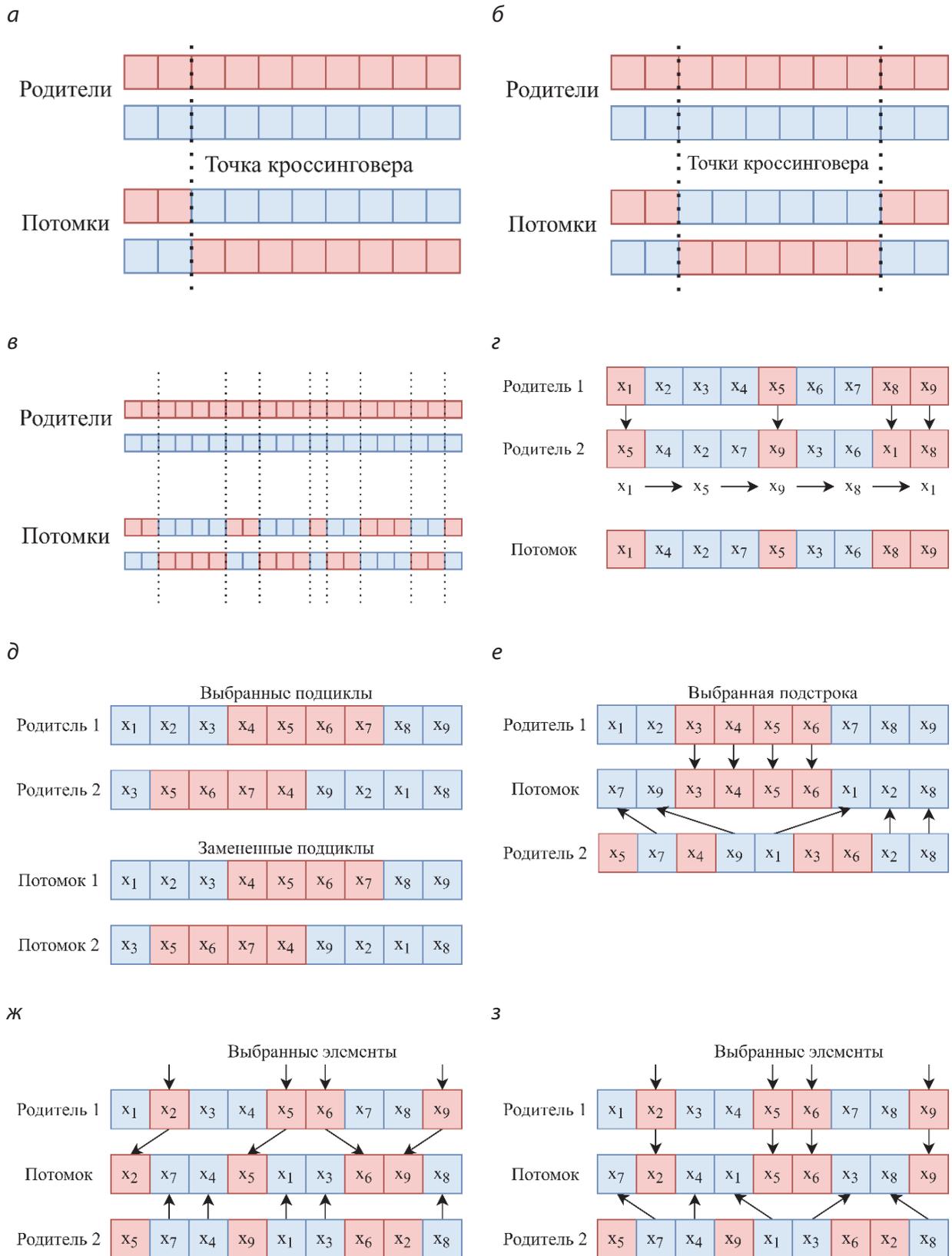


Рис. 3. Виды кроссинговера: а – одноточечный, б – двухточечный, в – равномерный, г – циклический, д – замена подциклов, е – принудительный с наследованием подгруппы, ж – принудительный с наследованием выбранных генов на свободные позиции, з – принудительный с наследованием выбранных генов на те же позиции

Для циклического кроссинговера требуется выбрать у родителей группы генов с одинаковым набором значений генов, расположенных на одинаковой группе позиций.

Гены у одного родителя меняются в соответствии со значениями на тех же позициях у другого родителя [27] (рис. 3, г).

Если у родителей имеются группы из одинаковых элементов, можно произвести кроссинговер замены подгрупп. Одинаковые группы элементов заменяются между собой, и образуются новые потомки [28] (рис. 3, д).

При принудительном кроссинговере выбранные гены одного из родителей наследуются потомком в том же порядке. Кроссинговер может производиться с выбранной подгруппой (рис. 3, е). Выбранные гены могут перемещаться на свободные позиции в том же порядке, как и в родителе (рис. 3, ж). Гены могут сохранять в потомке на тех же позициях, на которых они находились в родителе (рис. 3, з) [29].

В работе [20] показан вариант адаптации традиционных методов кроссинговера (например, арифметического, эвристического и промежуточного) для решения задачи построения графика оборота электроподвижного состава с учетом того, что аллель может представлять собой кортеж, компоненты которого имеют разную природу, например, время и место.

Из-за особенностей строения особи в задаче, представленной в статье, требуется использовать особый вид кроссинговера. Запишем, что операция кроссинговера происходит между двумя родителями η_1 и η_2 , выбранными случайно, и хромосомы в них скрещиваются следующим образом:

гены хромосомы i_1 особи η_1 с 1-го по J_h совпадали с генами хромосомы i_2 особи η_2 с 1-го по J_h ;

гены хромосомы i_1 особи η_2 с 1-го по J_h совпадали с генами хромосомы i_2 особи η_1 с 1-го по J_h .

В проведении кроссинговера участвуют хромосомы с наилучшими значениями фитнес-функции, объединяемые в пары родителей случайным образом.

При проведении кроссинговера (рис. 4):

гены хромосомы i_1 особи η_1 с 1-го по J_h занимают места генов хромосомы i_1 особи η_2 с 1-го по J_h , и наоборот;

гены хромосомы i_2 особи η_1 с 1-го по J_h занимают места генов хромосомы i_2 особи η_2 с 1-го по J_h , и наоборот.

Каждая хромосома может лишь раз участвовать в кроссинговере. Скрещивание проводится только для генов с 1-го по J_h . Когда больше невозможно найти такие пары, операция скрещивания между двумя родителями прекращается.

Каждый родитель участвует в кроссинговере один раз. Каждая пара родителей формирует пару потомков. Соответственно, новая популяция из η особей формируется из $\frac{\eta}{2}$ родителей и $\frac{\eta}{2}$ их потомков.

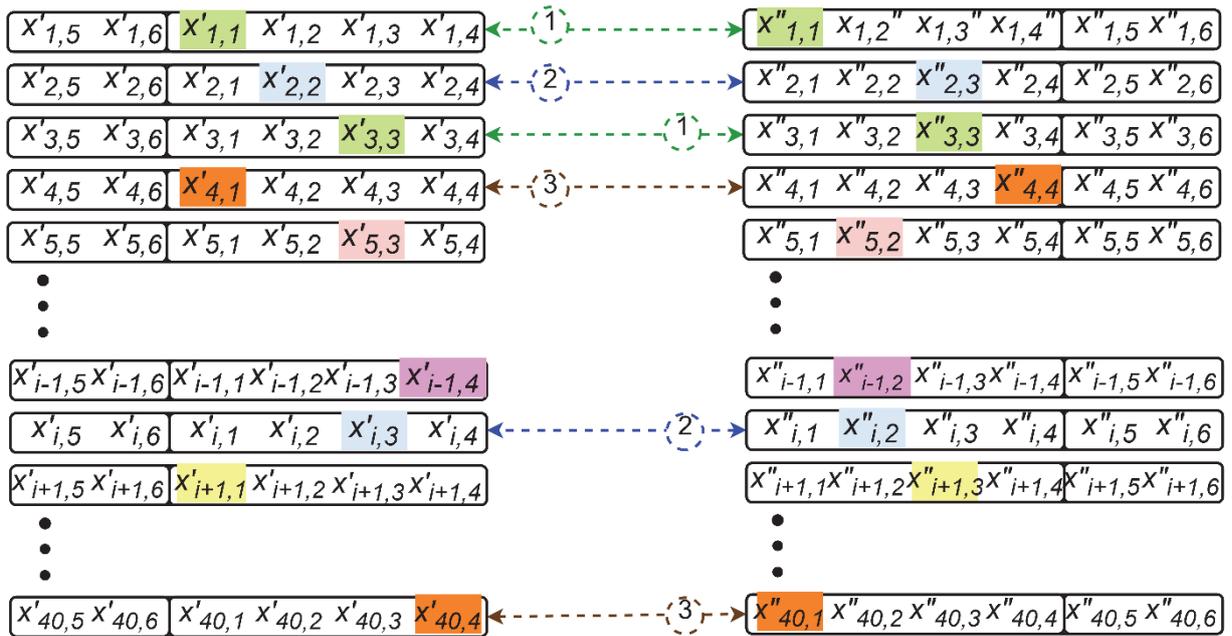


Рис. 4. Кроссинговер двух особей

8. Мутация

Операция мутации (рис. 5) производится с периодичностью γ , в нашем случае $\gamma = 5$. Производится для случайной выборки особей и для случайных хромосом. Мутации производятся у $\frac{\eta}{2}$ особей популяции. Количество мутаций у особи равно $\frac{I}{2}$.

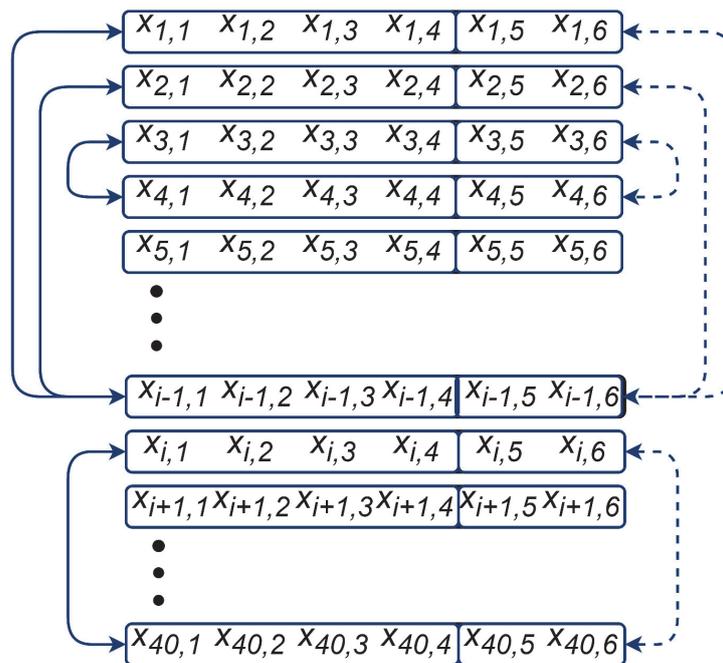


Рис. 5. Мутация особи

Для выполнения операции мутации особи следует поменять местами гены с 1-го по J_h у двух случайных хромосом:

$$x_{i_3,j} \leftrightarrow x_{i_4,j}, j = 1..J_h. \quad (30)$$

где i_3 и i_4 – номера хромосом, выбранные случайным образом.

Если у этих двух хромосом среди генов $x_{i_3,J_h+1}, \dots, x_{i_3,J_h+J_l}$ и $x_{i_4,J_h+1}, \dots, x_{i_4,J_h+J_l}$ присутствуют ненулевые, то случайным образом принимается решение об их замене. При мутации этих генов заменяются гены под соответствующими номерами:

$$x_{i_3,j} \leftrightarrow x_{i_4,j}, j = J_h + 1..J_h + J_l. \quad (31)$$

После выполнения μ -итераций генетического алгоритма выполнение алгоритма останавливается. В конце из оставшихся потомков выбирается наилучший, имеющий наименьшее значение функции приспособленности. Выбранная особь и будет являться решением задачи.

9. Моделирование организации работы службы поддержки

Для моделирования организации работы групп СП реализован программный комплекс на основе разработанного алгоритма оптимизации. Комплекс позволяет проанализировать эффективность разработанного алгоритма на тестовых входных данных.

Было произведено моделирование на тестовых данных и сравнение результатов организации работы СП с группами, распределенными пользователем, и с группами, полученными в результате применения генетического алгоритма.

Затраты за рабочий период моделирования с применением групп, распределенных пользователем, составили 8,4 млн рублей, что превысило затраты за тот же период моделирования с применением генетического алгоритма – 6,7 млн рублей. Мощность групп, сформированных пользователем, значительно превышала потребность в обработке инцидентов, в связи с чем были понесены чрезмерные затраты на оплату труда. Результаты моделирования с помощью генетического алгоритма представлены на рис. 6. Моделирование показало, что применение генетического алгоритма экономит трудовые ресурсы и сокращает расходы на оплату труда.

По результатам применения генетического алгоритма для подбора состава групп за период моделирования можно увидеть:

– искомое распределение сотрудников по группам представлено в левой части окна интерфейса программы. Шестью цветами (красным, желтым, зеленым, голубым, синим и сиреневым) обозначены группы, в которые входит каждый из сотрудников, и интенсивность обработки инцидентов в выбранной группе. Каждый цвет соответствует одной из шести групп;

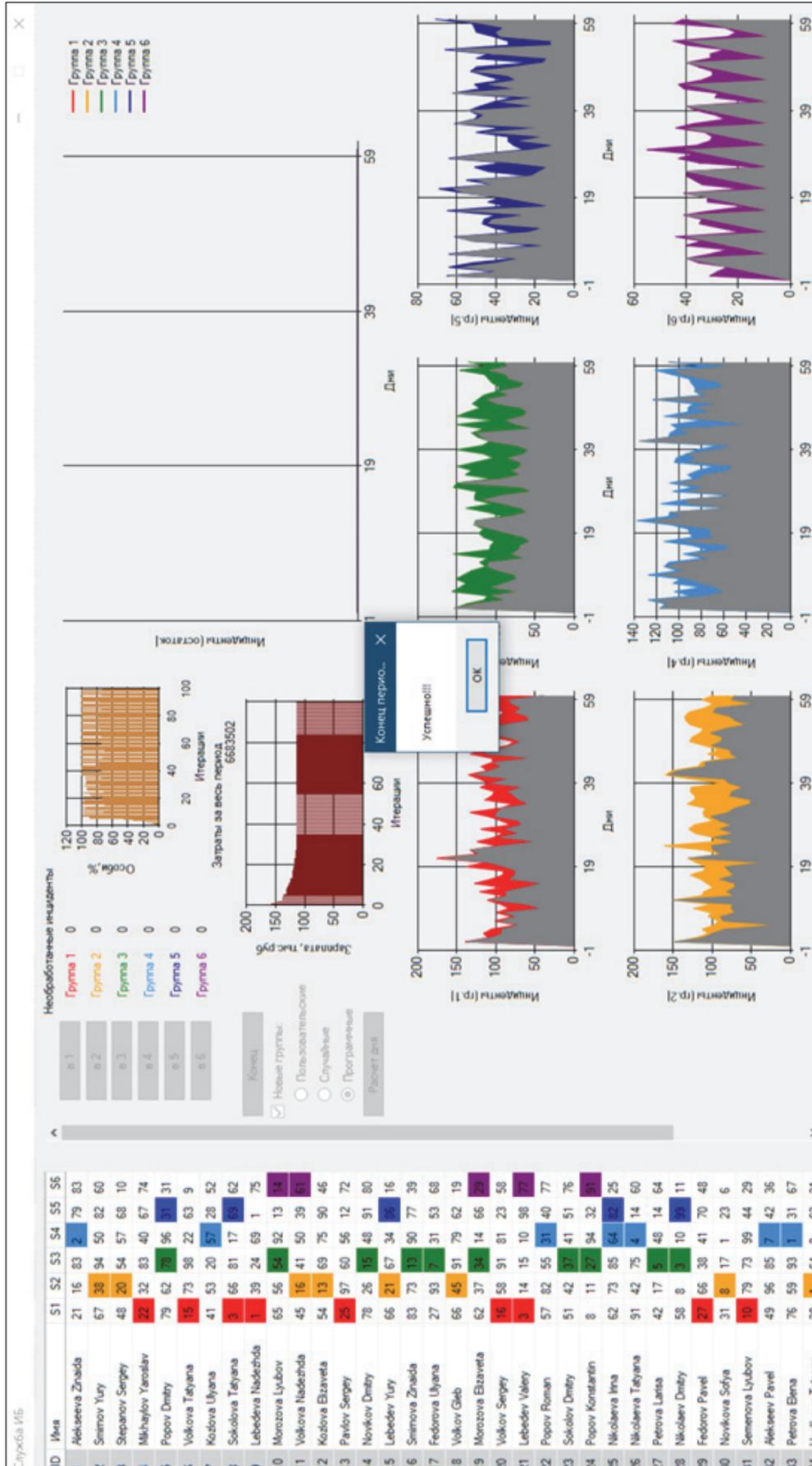


Рис. 6. Результаты моделирования с группами, полученными с помощью генетического алгоритма

– график количества необработанных инцидентов в верхней правой части окна интерфейса программы (рис. 6) отображает тот факт, что в каждый из моделируемых дней группы удовлетворили потребности в обработке инцидентов;

– уже на 40-м шаге эволюции изменение значений на графике зависимости процента особей в популяции, удовлетворяющих условию (5), от числа выполненных итераций генетического алгоритма принимает периодический характер. График расположен в верхней центральной части окна интерфейса программы (рис. 6). Процент уменьшается на итерациях, на которых происходит мутация;

– на графике зависимости заработной платы от номера итерации генетического алгоритма в верхней части окна интерфейса программы (рис. 6) можно увидеть, что уже на 40-м шаге эволюции наилучшее значение фитнес-функции не изменяется (или изменяется незначительно), т. е. стремится к установившемуся значению.

В нижней правой части окна интерфейса программы расположены графики мощностей и потребностей всех шести групп, полученных с помощью генетического алгоритма (рис. 6). На каждом графике красным, желтым, зеленым, голубым, синим или сиреневым цветом показана мощность соответствующей группы сотрудников, а серым – потребность группы в каждый из дней моделирования. Мощность незначительно превышает потребность в обработке инцидентов. Анализ графиков показывает, что группы успешно удовлетворяют потребности в обработке инцидентов. Учитывая, что затраты составили 6,7 млн рублей, можем сделать следующий вывод: способ формирования групп с использованием генетического алгоритма наиболее выгоден и формирует самые подходящие группы сотрудников.

Заключение

В результате проведенных исследований было определено, что для поставленной задачи применение генетического алгоритма целесообразнее на 30 % по сравнению с распределением сотрудников вручную. Разработанное программное обеспечение позволяет компании экономить на содержании СП без снижения качества оказываемых услуг.

Формирование подразделений СП с помощью программного комплекса, созданного на базе разработанного алгоритма, дает возможность своевременно обрабатывать инциденты, поступающие к СП без нарушения *SLA* и *OLA*, не привлекая дополнительные ресурсы.

Моделирование выполнялось для обобщенных данных, сформированных на основе фактических данных входного потока инцидентов одного из подразделений СП ОАО «РЖД» по решению инцидентов от пользователей. Следующим этапом исследования станет получение релевантной информации о фак-

тической производительности действующих сотрудников СП и формирование на этом основании графика работы и отпусков, формирование математической модели почасовой работы СП для решения задачи формирования рабочих графиков сотрудников с учетом работы в нескольких часовых поясах. Такие данные можно сформировать на основе сведений о прошлых рабочих периодах решения инцидентов.

Во многих подразделениях транспортных предприятий имеется необходимость или возможность использования сотрудников, обладающих различными компетенциями, для выполнения только одного вида работ, т. е. существует необходимость решения задачи, родственной рассмотренной в статье. Алгоритм можно адаптировать для планирования работы персонала, задействованного в техническом содержании инфраструктуры городских рельсовых транспортных систем. Исследования в этом направлении являются развитием работ кафедры «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ) в направлении анализа влияния человеческого фактора на безопасность движения [30].

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и образовательного фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-37-51001.

Библиографический список

1. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года. – Указ Президента РФ от 07.05.2018 № 204.
2. Паспорт федерального проекта «Информационная безопасность». – Утвержден президиумом Правительственной комиссии по цифровому развитию, использованию информационных технологий для улучшения качества жизни и условий ведения предпринимательской деятельности (протокол от 28.05.2019 № 9).
3. Паспорт национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации». – Утвержден Президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам (протокол от 24.12.2018 № 16).
4. ITIL Foundation: ITIL 4 edition. – Norwich: TSO, 2019. – 222 с.
5. Трудовой кодекс РФ. № 197-ФЗ. Принят Государственной Думой 21.12.2001.
6. ГОСТ Р ИСО/МЭК 14764–2002. Информационная технология. Сопровождение программных средств. – Принят постановлением Госстандарта России от 25.06.2002 г. № 248-ст.
7. ГОСТ Р 51904–2002. Программное обеспечение встроенных систем. Общие требования к разработке и документированию. – Утвержден постановлением Госстандарта России от 25.06.2002 г. № 247-ст.
8. Носова М. Г. Построение и анализ модели контакт-центра как системы массового обслуживания с многоуровневым IVR и нетерпеливыми запросами / М. Г. Носова, М. В. Дегтярева // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2019. – № 9 (1). – С. 101–106.
9. Ретивин А. Г. Гарантийная сервисная служба как система массового обслуживания / А. Г. Ретивин, А. И. Пестряков, К. А. Павлычев // Вестник НГИЭИ. – 2014. – № 4 (35). – С. 107–112.

10. *Абдрахманова Г. И.* Что такое цифровая экономика? Тренды, компетенции, измерение / Г. И. Абдрахманова, К. О. Вишнеvский, Л. М. Гохберг, Ю. Я. Дранев, Т. С. Зинина, Г. Г. Ковалева, А. С. Лавриненко, Ю. В. Мильшина, А. А. Назаренко, П. Б. Рудник, А. В. Соколов, А. Б. Суслон, М. С. Токарева, Ю. В. Туровец, Д. А. Филатова, С. В. Черногорцева, Н. А. Шматко, М. А. Гершмана, Т. Е. Кузнецова, И. И. Кучина // XX апрельская международная научная конференция по проблемам развития экономики и общества. – М.: Издательский дом Высшей школы экономики, 2019. – С. 4–11.
11. *Деулина С. А.* Анализ программного обеспечения CRM-систем для управления клиентами и персоналом / С. А. Деулина, И. А. Ромашова, Н. Л. Синева, Е. В. Яшкова // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. – 2018. – № 5 (31). – С. 36–42.
12. *Хромов С. К.* Автоматизация сопровождения пользователей информационных и автоматизированных систем на базе искусственного интеллекта / С. К. Хромов, М. А. Кулагин // Информатизация образования и науки. – 2019. – № 3 (43). – С. 50–59.
13. *Хромов С. К.* Предложения по модификации «Методики определения трудозатрат на услуги в области информационных технологий» / С. К. Хромов // Экономика железных дорог. – 2017. – № 5 – С. 70–73.
14. *Хромов С. К.* Методика определения трудозатрат на услуги в области информационных технологий / С. К. Хромов // Наука и техника транспорта. – 2019. – № 2. – С. 84–89.
15. *Корбут А. А.* Дискретное программирование / А. А. Корбут, Ю. Ю. Финкельштейн. – М.: Наука, 1969. – 368 с.
16. *Пападимитриу Х.* Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность / Х. Пападимитриу, К. Стайглиц. – М.: Мир, 1985. – 512 с.
17. *Гончаров Е. Н.* Исследование операций. Примеры и задачи: учебное пособие / Е. Н. Гончаров, А. И. Ерзин, В. В. Залюбовский. – Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2005. – 74 с.
18. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
19. *Гладков Л. А.* Решение задачи коммивояжера на основе нечеткого генетического алгоритма / Л. А. Гладков, Н. В. Гладкова // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2008. – № 86 (9). – С. 31–35.
20. *Sidorenko V.G.* The application of genetic algorithms for the scheduling of electric rolling stock maintenance / V.G. Sidorenko, M.A. Kyaw, V.G. Buchirin, A. I. Safronov // 2019 IEEE Conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering (EICon-Rus). – С. 2148–2151.
21. *Маркевич А. В.* Автоматизация управления распределением трудовых ресурсов с использованием генетического алгоритма / А. В. Маркевич, В. Г. Сидоренко // Информатизация образования и науки. – 2019. – № 3 (43). – С. 36–49.
22. *Mitchell M.* An introduction to genetic algorithms / M. Mitchell. – L.: The MIT Press, 1999. – 162 с.
23. *Holland J. H.* Adaptation in natural and artificial systems / J. H. Holland. – Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975. – 228 с.
24. *Herrera F.* Hybrid crossover operators for real-coded genetic algorithms: an experimental study / F. Herrera, M. Lozano, A. Sanchez // Soft Computing. – 2005. – № 9. – Pp. 280–298.
25. *Eshelman L.* Biases in the Crossover Landscape / L. Eshelman, R. Caruana, J. Schaffer // Proceedings of the 3rd international conference on genetic algorithms. – Virginia: George Mason University, 1989. – Pp. 10–19.
26. *Chaudhry I. A.* Integrated process planning and scheduling using genetic algorithms / I. A. Chaudhry // Technical gazette. – 2017. – № 24 (5). – Pp. 1401–1409.

27. *Larranaga P.* Genetic algorithms for the travelling salesman problem: A review of representations and operators / P. Larranaga, C. Kuijpers, R. Murga, I. Inza, S. Dizdarevic // *Artificial intelligence review*. – 1999. – № 13 (2). – Pp. 129–170.
28. *Katayama K.* An efficiency of hybrid mutation genetic algorithm for the traveling salesman problem / K. Katayama, H. Sakamoto, H. Narihisa // *Mathematical and computer modeling*. – 2000. – № 31 (10–12). – Pp. 197–203.
29. *Moraglio A.* Geometric crossover for the permutation representation / A. Moraglio, R. Poli // *Intelligenza Artificiale*. – 2011. – № 5. – Pp. 49–63.
30. *Сидоренко В. Г.* Влияние человеческого фактора на безопасность движения поездов / В. Г. Сидоренко, М. А. Кулагин, А. В. Маркевич // XXVII международная научная конференция «Проблемы управления безопасностью сложных систем». – М.: РГГУ. – 2019. – С. 265–270.

D. S. Kokorev

V. G. Sidorenko, Doctor of Technical Sciences

S. K. Khromov

*Department of Information Management and Protection,
Russian University of Transport, Moscow*

AUTOMATION OF WORK ORGANIZATION SUPPORT SERVICES FOR USERS OF AUTOMATED MANAGEMENT SYSTEMS OF TRANSPORTATION COMPANIES

The article discusses a way to automate the organization of the work of the support service for users of automated control systems (ACS) of transport enterprises. In the context of digitalization, constant improvement, expanding the functionality of such automated control systems, and an increase in the number of their users, the urgency of the problem is beyond doubt. The work of the support service for users of the automated control system of transport enterprises is presented as a queuing system. The possibility of using various methods to solve the problem is analyzed. A description of the work of the support service, methods of forming its departments are given. The incidents she deals with are classified. An algorithm for the formation of support service departments has been developed. It is proposed to solve this problem using a genetic algorithm. The algorithm and the concepts that characterize it are adapted to achieve the goal stated in the article. Crossover variants are presented that can be used by the genetic algorithm to solve various classes of problems. With the help of the developed software, modeling of the organization of the work of the support service was carried out using the algorithm for the distribution of employees. A comparative analysis of the results of modeling the work of departments with various methods of their formation, including those obtained using a genetic algorithm, has been carried out. The analysis showed the effectiveness of the use of the genetic algorithm when planning the work of the relevant departments. The possibility of adapting the developed algorithm for planning the work of personnel involved in the technical maintenance of the infrastructure of urban rail transport systems has been demonstrated. This task is similar to that considered in this article, since in many cases it becomes necessary or possible to use employees with different competencies to perform only one type of work.

work planning, support service, incident handling, automated control system, information system, genetic algorithm, crossing over, transport system

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-3-414-437

References

1. *O natsiona'nykh tselyakh i strategicheskikh zadachakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2024 goda.* [On the national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024]. Ukaz Prezidenta RF ot 07.05.2018 № 204 [Decree of the President of the Russian Federation of 05/07/2018 No. 204]. (In Russian)
2. *Pasport federalnogo proyekta «Informatsionnaya bezopasnost».* Utverzhden prezidiumom Pravitel'stvennoy komissii po tsifrovomu razvitiyu, ispolzovaniyu informatsionnykh tekhnologiy dlya uluchsheniya kachestva zhizni i usloviy vedeniya predprinimatelskoy deyatelnosti (protokol ot 28.05.2019 № 9) [*Passport of the federal project "Information Security"*]. Approved by the Presidium of the Government Commission on Digital Development, the Use of Information Technologies to Improve the Quality of Life and Conditions for Doing Business (Minutes No. 9 dated May 28, 2019).] (In Russian)
3. *Pasport natsionalnoy programmy «Tsifrovaya ekonomika Rossiyskoy Federatsii».* Utverzhden Prezidiumom Soveta pri Prezidente Rossiyskoy Federatsii po strategicheskomu razvitiyu i natsional'nym proyektam (protokol ot 24.12.2018 № 16). [*Passport of the national program "Digital Economy of the Russian Federation"*]. Approved by the Presidium of the Council under the President of the Russian Federation for Strategic Development and National Projects (Minutes No. 16 dated 12.24.2018).] (In Russian)
4. *ITIL Foundation: ITIL 4 edition.* Norwich: TSO, 2019, 222 p.
5. *Trudovoy kodeks RF. № 197-FZ.* Prinyat Gosudarstvennoy Dumoy 21.12.2001 [*Labor Code of the Russian Federation. No. 197-FZ.* Adopted by the State Duma on December 21, 2001]. (In Russian)
6. *GOST R ISO/MEK 14764–2002. Informatsionnaya tekhnologiya. Soprovozhdeniye programmnykh sredstv.* Prinyat postanovleniyem Gosstandarta Rossii ot 25.06.2002 g. № 248-st. [*GOST R ISO/IEC 14764–2002. Information technology. Maintenance of software tools.* Adopted by the decree of the State Standard of Russia dated June 25, 2002, No. 248-st]. (In Russian)
7. *GOSTR 51904–2002. Programmnoye obespecheniye vstroyennykh sistem. Obshchiye trebovaniya k razrabotke i dokumentirovaniyu.* Utverzhden postanovleniyem Gosstandarta Rossii ot 25.06.2002 g. № 247-st. [*GOSTR 51904–2002. Embedded systems software. General requirements for development and documentation.* Approved by the Resolution of the State Standard of Russia dated June 25, 2002, No. 247-st]. (In Russian)
8. Nosova M. G., Degtyareva M. V. (2019) Postroyeniye i analiz modeli kontakt-tsentra kak sistemy massovogo obsluzhivaniya s mnogourovnevnyim IVR i neterpelivymi zaprosami [Building and analysis of the contact center model as a queuing system with multi-level ivr and impatient applications]. *Vestnik Altayskoy akademii ekonomiki i prava* [*Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*], no. 9 (1), pp. 101–106. (In Russian)
9. Retivin A. G., Pstryakov A. I., Pavlychev K. A. (2014) Garantiynaya servisnaya sluzhba kak sistema massovogo obsluzhivaniya [Guarantee service as the system of mass service]. *Vestnik NGIEI* [*Bulletin NGIEI*], no. 4 (35), pp. 107–112. (In Russian)
10. Abdrakhmanova G. I., Vishnevsky K. O., Gokhberg L. M., Dranev Y. Y., Zinina T. S. and others (2019) Chto takoye tsifrovaya ekonomika? Trendy, kompetentsii, izmereniye [What is the digital economy? Trends, competencies, measurement]. *XX aprel'skaya mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya po problemam razvitiya ekonomiki i obshchestva* [20th April international scientific conference on the problems of economic and social development]. Moscow, Higher School of Economics Publishing House, pp. 4–11. (In Russian)
11. Deulina S. A., Romashova I. A., Sineva N. L., Yashkova E. V. (2018) Analiz programmnoy obespecheniya CRM-sistem dlya upravleniya kliyentami i personalom [Analysis of CRM-

- systems software for customer and personnel management]. *Innovatsionnaya ekonomika: perspektivy razvitiya i sovershenstvovaniya* [Innovative economy: prospects for development and improvement], no. 5 (31), pp. 36–42. (In Russian)
12. Khromov S. K., Kulagin M. A. (2019) Avtomatizatsiya soprovozhdeniya pol'zovateley informatsionnykh i avtomatizirovannykh sistem na baze iskusstvennogo intellekta [Automation of maintenance of users of information and automated systems based on artificial intelligence]. *Informatizatsiya obrazovaniya i nauki* [Informatization of education and science.], no. 3 (43), pp. 50–59. (In Russian)
 13. Khromov S. K. (2017) Predlozheniya po modifikatsii “Metodiki opredeleniya trudozatrata na uslugi v oblasti informatsionnykh tekhnologiy” [Proposals for modification of the “Methodology for determining labor costs for services in the field of information technology”]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [The Railway Economics], no. 5, pp. 70–73. (In Russian)
 14. Khromov S. K. (2019) Metodika opredeleniya trudozatrata na uslugi v oblasti informatsionnykh tekhnologiy [Methods of determining labour costs for information technology services]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology in Transport], no. 2, pp. 84–89. (In Russian)
 15. Korbut A. A., Finkelstein Y. Y. (1969) *Diskretnoye programmirovaniye* [Discrete programming]. Moscow, Nauka Publ., 368 p. (In Russian)
 16. Papadimitriou C. H., Steiglitz K. (1982) *Combinatorial optimization*. Englewood Cliffs, N. J. (Russ. ed. Papadimitriou C. H., Steiglitz K. Moscow, Mir Publ., 1985, 510 p.)
 17. Goncharov E. N., Erzin A. I., Zalyubovskiy V. V. (2005) *Issledovaniye operatsiy. Primery i zadachi. Uchebnoye posobiye* [Research of operations. Examples and tasks. Textbook]. Novosibirsk, Novosibirsk State University Publ., 74 p. (In Russian)
 18. Wentzel E. S. (1969) *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, Nauka Publ., 576 p. (In Russian)
 19. Gladkov L. A., Gladkova N. V. (2008) Resheniye zadachi kommutirovaniya na osnove nechetkogo geneticheskogo algoritma [The decision of dynamic vehicle routing problems on the basis of hybrid intellectual methods and models]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [Bulletin of the Southern Federal University. Technical science], no. 86 (9), pp. 31–35. (In Russian)
 20. Sidorenko V. G., Kyaw M. A., Buchirin V. G., Safronov A. I. (2019) The application of genetic algorithms for the scheduling of electric rolling stock maintenance. *2019 IEEE Conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering (EIConRus)*, pp. 2148–2151.
 21. Markvich A. V., Sidorenko V. G. (2019) Avtomatizatsiya upravleniya raspredeleniyem trudovykh resursov s ispol'zovaniyem geneticheskogo algoritma [Automation control allocation of labor resources using genetic algorithm]. *Informatizatsiya obrazovaniya i nauki* [Informatization of education and science], no. 3 (43), pp. 36–49. (In Russian)
 22. Mitchell M. (1999) *An introduction to genetic algorithms*. London, The MIT Press Publ., 162 p.
 23. Holland J. H. (1975) *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor, University of Michigan Press, 228 p.
 24. Herrera F., Lozano M., Sanchez A. (2005) Hybrid crossover operators for real-coded genetic algorithms: an experimental study. *Soft Computing*, no. 9, pp. 280–298.
 25. Eshelman L., Caruana R., Schaffer J. (1989) Biases in the Crossover Landscape. *Proceedings of the 3rd international conference on genetic algorithms*. Virginia, George Mason University, pp. 10–19.
 26. Chaudhry I. A. (2017) Integrated process planning and scheduling using genetic algorithms. *Technical gazette*, no. 24 (5), pp. 1401–1409.

27. Larranaga P., Kuijpers C., Murga R., Inza I., Dizdarevic S. (1999) Genetic algorithms for the travelling salesman problem: A review of representations and operators. *Artificial intelligence review*, no. 13 (2), pp. 129–170.
28. Katayama K., Sakamoto H., Narihisa H. (2000) An efficiency of hybrid mutation genetic algorithm for the traveling salesman problem. *Mathematical and computer modelling*, no. 31 (10–12), pp. 197–203.
29. Moraglio A., Poli R. (2011) Geometric crossover for the permutation representation. *Intelligenza Artificiale*, no. 5, pp. 49–63.
30. Sidorenko V. G., Kulagin M. A., Markevich A. V. (2019) Vliyaniye chelovecheskogo faktora na bezopasnost' dvizheniya poyezdov [Influence of the human factor on the safety of train traffic]. *XXVII international scientific conference "Problems of safety management of complex systems."* Moscow, Russian State University for the Humanities Publ., pp. 265–270. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии
профессором Л. А. Барановым*

Поступила в редакцию 04.02.2021, принята к публикации 11.03.2021

КОКОРЕВ Денис Сергеевич – аспирант кафедры «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ)
d31v12@yandex.ru

СИДОРЕНКО Валентина Геннадьевна – доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ), профессор Департамента бизнес-информатики Высшей школы бизнеса НИУ ВШЭ
valenfalk@mail.ru

ХРОМОВ Сергей Константинович – аспирант кафедры «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ)
sk.khromov@gmail.com

© Кокорев Д. С., Сидоренко В. Г., Хромов С. К., 2021

УДК 625.1:004.94

И. М. Кокурин, докт. техн. наук

*Лаборатория проблем организации транспортных систем,
Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук,
Санкт-Петербург*

РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИНТЕРВАЛЬНОГО РАЗГРАНИЧЕНИЯ ПОЕЗДОВ

В статье обоснованы технологические и технические решения, расширяющие применение норм проектирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики, регламентирующих разработку и эксплуатацию систем интервального регулирования движения поездов (СИРДП). На основе анализа способов расстановки светофоров автоблокировки и сигнальных знаков автоматической локомотивной сигнализации (АЛС), применяемой как самостоятельное средство сигнализации и связи при движении поездов (АЛСО), доказано, что определение длин блок-участков по задаваемым межпоездным интервалам снижает пропускную способность перегонов. Установлено, что существенное повышение пропускной способности перегонов достигается при определении длин «фиксированных» блок-участков с помощью расчета максимальных тормозных путей поездов на каждом перегоне, а длин «подвижных» блок-участков – на основе оперативно рассчитываемых тормозных путей каждого поезда, проходящего по данному перегону. Особое внимание уделяется применению когнитивного (исследовательского) метода использования знаний и опыта взаимодействующих специалистов железнодорожного транспорта в области создания, проектирования и эксплуатации СИРДП. Определены направления развития программного обеспечения существующих и создаваемых информационных систем, которые обслуживают графистов-технологов, поездных диспетчеров и машинистов. Показано, что использование метода имитационного моделирования движения поездов увязывает моменты времени прибытия и отправления поездов с началом и окончанием станционных технологических операций, что расширяет возможности учета влияния технических и организационных факторов на оценку пропускной и перерабатывающей способности технических станций. Предложено дополнение программного обеспечения метода набором алгоритмов, которые определяют требуемую пропускную способность железнодорожных перегонов, станций, участков, линий и направлений при задаваемых количествах поездов различных скоростных категорий, с учетом перспективы предоставления «окон» для ремонтных работ в зависимости от планируемых объемов перевозок.

Автоблокировка, автоматическая локомотивная сигнализация, определение длин «фиксированных» и «подвижных» блок-участков, межпоездные расстояния и интервалы, тормозные пути поездов, повышение пропускной способности

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-3-438-451

Введение

Интервальное разграничение поездов – важная составляющая функций обеспечения безопасности и регулирования скоростей, выполняемых системами интервального регулирования движения поездов (СИРДП). При всем разнообразии этих систем их основной задачей по-прежнему остается создание межпоездных интервалов, надежно исключающих опасное сближение поездов

посредством разделения перегонов на блок-участки. В соответствии с нормой [1] блок-участок «фиксированной» длины определяется как часть железнодорожного перегона, которая может ограничиваться путевыми светофорами или сигнальными знаками. При использовании «подвижных» блок-участков эти устройства не требуются и длины блок-участков оперативно рассчитываются и указываются между путевыми координатами точек достижения величин снижаемой скорости [2–7].

1. Анализ способов расстановки перегонных светофоров автоблокировки и сигнальных знаков

Для повышения пропускной способности перегонов и устойчивого движения поездов при зеленом сигнальном показании путевых и локомотивных светофоров руководящие документы [9, 10] разрешают расставлять светофоры автоблокировки (АБ) и сигнальные знаки системы автоматической локомотивной сигнализации (АЛС), используемой как самостоятельное средство сигнализации и связи при движении поездов (АЛСО). При этом исходят из расчетных тормозных путей при максимальных скоростях, достигаемых поездами в данных местах пути, но только на двухпутных грузонапряженных линиях. В других условиях использования этих систем нормы [8, 9] рекомендуют два способа расстановки, которые основаны на применении задаваемых заказчиками проектов наибольших минимальных (расчетных) межпоездных интервалов между расчетными парами поездов на проектируемых участках.

При первом способе длины блок-участков (БУ), определяющие координаты установки светофоров и сигнальных знаков, рассчитывают посредством наложения расчетного межпоездного интервала на кривую скорости расчетного поезда с засечками времени. Другой способ предполагает, что кривую времени хода головы второго поезда расчетной пары сдвигают на этот интервал относительно кривой времени движения хвоста первого поезда. Оба способа используют деление интервала между хвостом первого поезда и головой второго на равные промежутки времени, по которым определяют длины БУ, межпоездные интервалы и пропускную способность перегонов и участков, учитывая скорости расчетных поездов.

Разработчики обоих способов полагают, что таким образом создают условия для движения второго поезда расчетной пары при зеленом огне АЛС, если после сближения на расчетные межпоездные интервалы поезда проходят каждый БУ всего проектируемого участка $\forall L_{\text{бу}}^y$ за постоянный промежуток времени $\tau_{\text{бук}}$:

$$\tau_{\text{бук}} = I_{\text{мпхг}}/k = \text{const}, \forall L_{\text{бу}}^y, \quad (1)$$

где $I_{\text{мпхг}}$ — наибольший из минимальных межпоездных интервалов на проектируемом участке между хвостом первого расчетного поезда и головой второго;

k – количество БУ в этом межпоездном интервале, необходимое для движения второго расчетного поезда при зеленом сигнальном показании АЛС.

Количество БУ в минимальном межпоездном расстоянии между центрами тяжести расчетной пары поездов, необходимом для движения второго расчетного поезда при зеленом огне АЛС, изменяется от трех до пяти в зависимости от значности АБ и АЛС, способов кодирования БУ и наличия защитных участков [8, 9].

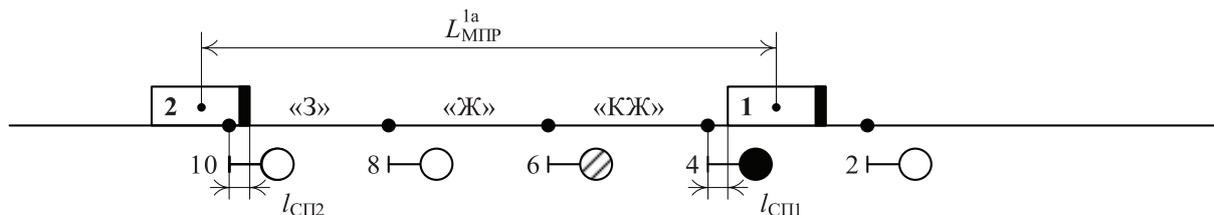
После расстановки светофоров и сигнальных знаков длины БУ становятся постоянными («фиксированными») величинами, а минимальные межпоездные интервалы поездов, движущихся с более высокими скоростями, получаются меньше, чем у расчетных поездов. Поэтому, расставлять светофоры и сигнальные знаки требуется по наибольшему минимальному расчетному межпоездному интервалу, который способны выдерживать самые медленные (расчетные) поезда на участке [8, 9]. Такая расстановка завышает межпоездные расстояния и интервалы для более быстрых поездов, уменьшая пропускную способность перегонов.

Для выполнения условия (1) поезда расчетной пары после сближения на минимальные межпоездные расстояния должны двигаться с одинаково изменяющейся скоростью, которая использовалась при расстановке светофоров или сигнальных знаков. В процессе эксплуатации и модернизации инфраструктуры и подвижного состава установленные скорости поездов всех скоростных категорий корректируются и утверждаются. Поэтому нормативные графики движения графисты-технологи разрабатывают ежегодно, корректируя межпоездные интервалы, что обусловлено изменениями установленных скоростей. В свою очередь, по графикам составляют расписания движения поездов, которыми руководствуются поездные машинисты. Во время ремонта объектов инфраструктуры выдаются предупреждения о временных или длительных изменениях установленных скоростей.

Тяжеловесные поезда снижают скорость на подъемах пути; на станциях остановки, обгона или скрещения – в большей степени при движении по стрелочным переводам на боковые пути. Поездные диспетчеры изменяют станции обгона и скрещения при существенных отклонениях от расписания поездов всех категорий. Возникает необходимость обгона грузовых поездов поездами разных и одинаковых скоростных категорий при уменьшении приоритетов их пропуска по участку. Это происходит в условиях задержки приема поездов на технические станции или на соседние диспетчерские участки, при малой длительности оставшегося времени непрерывной работы локомотивных бригад и т. п.

В процессе проектирования АБ или АЛСО расчетные координаты расстановки светофоров или сигнальных знаков приходится изменять в зависимости от условий их видимости, расположения переездов, искусственных сооружений, пассажирских платформ, особенностей конструкций пути и контактной сети.

Следовательно, отклонения скоростей поездов от величин, которые использовались в процессе расстановки светофоров и сигнальных знаков, и коррек-



- Граница блок-участка

Рис. 1. Схема разграничения попутной пары поездов при односторонней трехзначной автоблокировке и АЛСН

тировка рассчитываемых длин БУ нередко исключают соблюдение заданных межпоездных интервалов даже для расчетных пар поездов. Для пар попутных поездов более высоких и разных скоростных категорий выполнить условие (1) тоже невозможно, т. к. они не движутся с расчетными скоростями.

Поскольку любой способ определения длин БУ не гарантирует выполнение условия (1), предлагается рассмотреть определение условия, необходимого для движения второго поезда попутной пары при зеленом сигнальном показании АЛСН на примере трехзначной АБ (рис. 1).

Минимальное межпоездное расстояние между центрами тяжести попутной пары поездов 1 и 2 принимается равным трем БУ и составляет:

$$L_{МПР}^{1a} = \sum_{k=1}^3 L_{\text{бу}3}^k + 0,5(L_{п1} + L_{п2}) + l_{сп1} - l_{сп2},$$

где $L_{\text{бу}3}^k$ — длины каждого из трех БУ при трехблочном разграничении расчетной пары поездов; $L_{п1}$ и $L_{п2}$ — длины поездов 1 и 2 попутной пары; $l_{сп1}$ — расстояние проходимое хвостом поезда 1 в интервале времени от освобождения БУ за светофором 6 до смены сигнальных показаний светофоров и кодов АЛСН за поездом 1; $l_{сп2}$ — расстояние проходимое головой поезда 2 за промежуток времени от занятия БУ за светофором 10 с зеленым огнем до окончания проверки системой АЛСН сохранения зеленого сигнального показания.

Условие (2) сохранения зеленого огня АЛСН поезда 2 требует, чтобы этот поезд, удаленный от поезда 1 попутной пары на минимальное межпоездное расстояние, не занимал БУ за светофором с зеленым огнем (10) ранее поступления в этот БУ кода зеленого огня:

$$t_{\text{бу}10}^{32} + \tau_{\text{с}30}^{32} \geq t_{\text{бу}4}^{\text{ox}} + \tau_{\text{сн}к}^{x1}, \quad \forall L_{\text{бу}}^y, \quad (2)$$

где $t_{\text{бу}10}^{32}$ — момент времени занятия вторым поездом БУ за очередным светофором (10) с зеленым огнем; $\tau_{\text{с}30}^{32}$ — затраты времени на проверку системой АЛСН сохранения зеленого огня на локомотивном светофоре второго поезда; $t_{\text{бу}4}^{\text{ox}}$ — время освобождения первым поездом БУ перед очередным светофором с крас-

ным огнем (4); $\tau_{снк}^{x1}$ – затраты времени на смену сигнальных показаний светофоров и кодов АЛСН в блок-участках между первым поездом и вторым.

В случае появления желтого сигнального показания АЛСН машинист второго поезда попутной пары, зная о дальнейшем движении без остановки в этом месте пути, снижает скорость до величины, при которой желтый огонь меняется на зеленый, а затем повышает скорость до установленных значений. При этом создаются межпоездные расстояния, которые включают количества БУ, необходимые для движения поезда 2 при зеленом сигнальном показании АЛСН.

Элементы технологий расстановок светофоров и сигнальных знаков по максимальным тормозным путям и кривой скорости с засечками времени (рис. 2) можно проиллюстрировать на примере двухпутного перегона с односторонней трехзначной АБ и АЛСН. Максимальная скорость пассажирских поездов составляет 120 км/ч, а грузовых – 80 км/ч. В результате тяговых расчетов установлено, что максимальные тормозные пути, определившие длины блок-участков, требуются пассажирскому поезду для экстренного торможения от устройств АЛСН.

Наибольший из минимальных межпоездных интервалов для расчетных грузовых поездов при расстановке светофоров или сигнальных знаков по максимальным тормозным путям включает три БУ» (Ч2-12, 12-10 и 10-8). Максимальный для перегона межпоездной интервал между центрами тяжести поездов $I_{мпит}$ рассчитан по линии времени хода расчетного грузового поезда $t_{хпрг}$ путем добавления половины длины поезда ($L_{пг}/2$) к координате светофора (8») и составляет $I_{мпит} = 4,74$ мин. Округленный до 5 мин этот межпоездной интервал является расчетным для данного перегона.

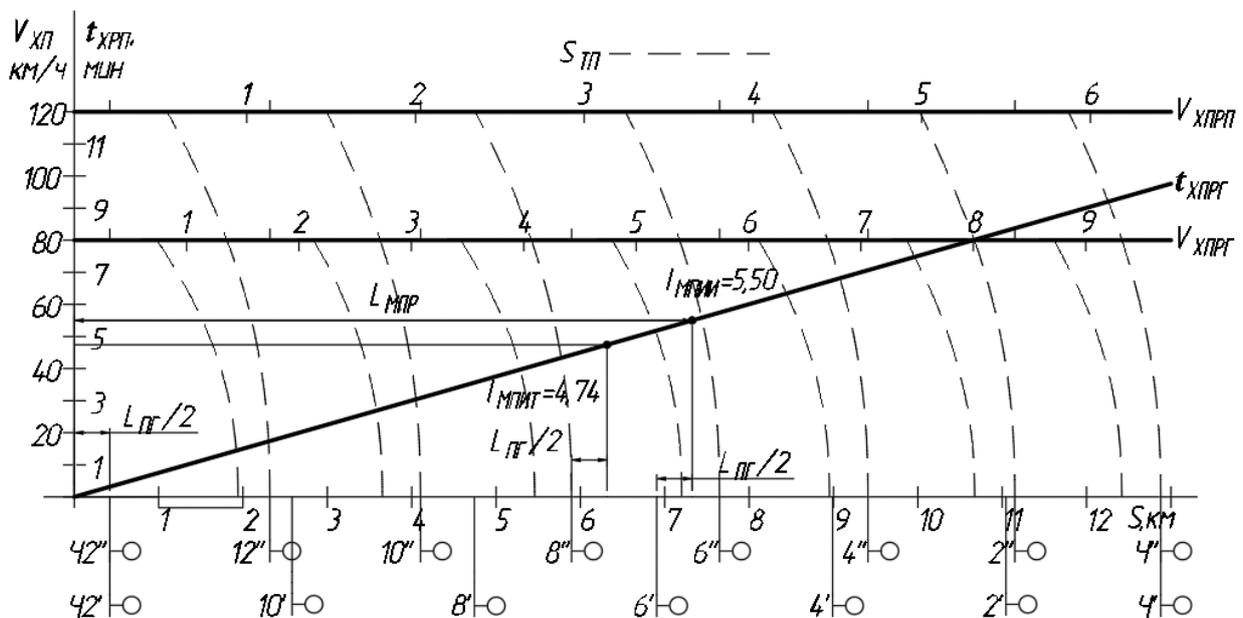


Рис. 2. Расстановка светофоров по тормозным путям (») и по кривой скорости с засечками времени (')

Наибольший из минимальных межпоездных интервалов для расчетных грузовых поездов при расстановке светофоров по заданному межпоездному интервалу равному $I_{\text{мпии}} = 5,5$ мин включает три БУ' (Ч2-10, 10-8 и 8-6). Расчеты показывают, что при увеличении заданного межпоездного интервала до 6 мин. значительно возрастают длины БУ и затруднения с их размещением в границах перегона. Для определения длин БУ при заданном интервале $I_{\text{мпии}} = 5,5$ мин на линии времени хода расчетного грузового поезда $t_{\text{хпрг}}$ вычитаем на оси абсцисс проходимое половиной длины поезда расстояние ($L_{\text{пр}}/2, = 425$ м) и получаем координату установки третьего светофора (6'), а также время его проследования хвостом первого поезда $5,5 - 0,32 = 5,18$ мин. Разность моментов времени проследования мест расстановки светофоров Ч2' и 6' на линии $t_{\text{хпрг}}$ определяет величину промежутка времени $I_{\text{мпхг}} = 5,18 - 0,32 = 4,86$ мин между хвостом первого поезда и головой второго. Деление этого промежутка времени на три равные части $4,86/3 = 1,62$ мин (2160 м) определяет длины БУ и координаты расстановки соответствующих светофоров или сигнальных знаков (см. рис. 2).

Расстановка светофоров или сигнальных знаков по максимальным тормозным путям для рассматриваемого перегона увеличила их количество на одну сигнальную установку – с пяти до шести.

2. Преимущества определения длин блок-участков на основе расчетов тормозных путей поездов

Сравнительный расчет (рис. 3) показывает, что минимальные межпоездные интервалы для грузового и пассажирского поездов при расстановке светофоров трехзначной АБ или сигнальных знаков АЛСО на участке пути Ч2–Ч по макси-

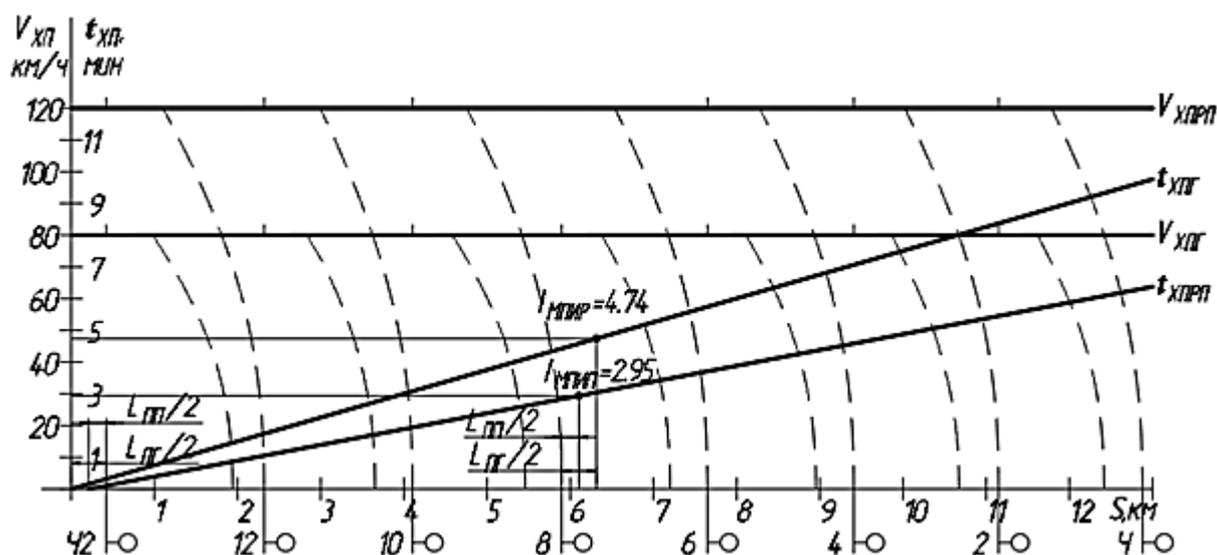


Рис. 3. Межпоездные интервалы для грузового и пассажирского поездов при расстановке светофоров трехзначной АБ или сигнальных знаков АЛСО по тормозным путям

мальным тормозным путям соответственно равны 4,74 и 2,95 мин. Рекомендуемые графистам-технологам межпоездные интервалы для грузовых и пассажирских поездов составляют 5 и 3 мин.

Пропускная способность одного пути двухпутного перегона в час при автоблокировке определяется [10] по формуле:

$$N_{\text{нал}}^{\text{ч}} = (1440 - t_{\text{тех}}) \alpha_{\text{н}} / 24 I_{\text{мпр}}, \quad (3)$$

где $I_{\text{мпр}}$ – наибольший минимальный для перегона или проектируемого участка (расчетный) межпоездной интервал между центрами тяжести поездов, для которых рассчитывается пропускная способность; $t_{\text{тех}}$ – затраты времени в сутки на ремонтно-восстановительные работы (150 мин); $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент надежности технических средств (0,95).

Расчеты по формуле (3) показывают, что при расстановке светофоров по максимальным тормозным путям расчетный межпоездной интервал грузовых поездов составляет 5 мин, пропускная способность перегона 10 поездов в час. В условиях расстановки светофоров по заданному интервалу грузовых поездов 5,5 мин пропускная способность перегона составит 9 поездов в час.

Длины БУ, определяемые по расчетному межпоездному интервалу, не учитывают все условия, необходимые для движения второго поезда попутной пары при зеленом огне локомотивного светофора. Поэтому этот интервал задается исходя из увеличенного значения максимальных тормозных путей поездов на участке. Это ведет к увеличению межпоездных интервалов всех поездов, которое снижает пропускную способность перегонов. Длины БУ, устанавливаемые по максимальным тормозным путям поездов, определяются с помощью тяговых расчетов с использованием тормозных характеристик и скорости поездов, плана и профиля пути предстоящего торможения. По условиям обеспечения безопасности движения максимальный тормозной путь для поездов на участке не превышает длины одного БУ либо суммарной длины двух или трех БУ в зависимости от значности АБ и АЛС, а также от способа кодирования блок-участков.

Определенные по максимальным тормозным путям минимальные по длине блок-участки поезда всех скоростных категорий проходят за разные, но уменьшенные интервалы времени. Использование этих интервалов при разработке графиков движения поездов создает резервы наличной пропускной способности. Они необходимы в условиях пропуска по участку дополнительных поездов, которые обходят ремонтируемые диспетчерские участки, и при движении с пониженными скоростями. Это требуется при двухстороннем движении поездов по одному пути двухпутного перегона в период проведения ремонтных работ на другом пути, после окончания ремонта на данном пути и до момента разрешения движения с установленной скоростью, а также при выдаче предупреждений о временном или длительном снижении установленных скоростей.

Экономическую эффективность установки дополнительных светофоров или сигнальных знаков следует оценивать исходя из количества поездо-часов, затрачиваемых на проследование участков в обычных условиях движения и при выполнении ремонтных работ на проектируемом участке и соседних с ним.

Следовательно, расставлять светофоры АБ и сигнальные знаки АЛСО целесообразно только исходя из значений максимальных тормозных путей.

Длины «плавающих» БУ (при которых перегонные светофоры и сигнальные знаки не требуются), определенные по максимальным тормозным путям пассажирских поездов, не подлежат уменьшению. У грузовых поездов (см. рис. 3) со скоростью 80 км/ч максимальные тормозные пути меньше, чем у пассажирских со скоростью 120 км/ч. Поэтому длины «подвижных» БУ для грузовых поездов могут быть уменьшены. Длительность межпоездного интервала, необходимого при проследовании центром тяжести расчетного грузового поезда длины поезда и трех его тормозных путей, составит: $I_{\text{митг}} = 0,32 + 1,14 + 1,00 + 1,02 + 0,32 = 3,8$ мин. При определении длин «подвижных» БУ грузовых поездов по их тормозным путям межпоездной интервал сокращается с 4,74 (5) мин до 3,8 (4) мин, а пропускная способность перегона повышается с 10 до 12 поездов в час.

При двухсторонней автоблокировке возникают затраты на строительство и техническое обслуживание СИРДП, обусловленные несовпадением мест расстановки светофоров встречных направлений движения. Установка этих светофоров на одной ординате (спаривание) увеличивает длины блок-участков, что снижает пропускную способность перегонов. При односторонней автоблокировке на двухпутных перегонах для организации движения по неправильному пути используются сигнальные показания АЛС, а границами блок-участков служат светофоры правильного пути. Для движения по неправильному пути на спусках образуются блок-участки, длины которых меньше расчетных тормозных путей. Это приводит к затратам на технические и организационные решения, включая снижение установленной скорости поездов [11]. В условиях применения «подвижных» БУ необходимость в перегонных светофорах отпадает, что исключает указанные затраты.

Необходимость увеличения тормозных путей поездов при модернизации инфраструктуры и подвижного состава будет возможно учитывать автоматически, посредством ввода новой информации в базы данных автоматизированных систем управления движением поездов, способных оперативно рассчитывать длины «подвижных» БУ, прогнозировать и передавать информацию о задаваемых скоростях на локомотивные устройства.

Использование параллельных графиков движения в безобгонных зонах ведет к снижению скорости всех поездов до уровня скоростей самых медленных поездов на участке. Применение непараллельных графиков движения пакетов поездов одинаковых скоростных категорий (конфигураций) [12] повышает скорости пакетов поездов. Возникают резервы времени, стабилизирующие выполнение

нормативных графиков, и увеличивается пропускная способность. Определение длин блок-участков по тормозным путям в этих условиях уменьшит межпоездные интервалы в конфигурациях поездов всех скоростных категорий, что дополнительно повысит пропускную способность безобгонных зон.

3. Перспективы автоматизации определения межпоездных и станционных интервалов и пропускной способности

В процессе ежегодных тяговых расчетов специалисты определяют только перегонные времена хода и дополнительные затраты времени на разгон и замедление всех категорий поездов, обращающихся по диспетчерским участкам. Многочисленные межпоездные и станционные интервалы, необходимые для разработки нормативных графиков движения поездов, рассчитывают графисты-технологи. Для этого требуется информация о количествах поездов, пропускаемых по участку в разное время суток, дни недели, рабочие и нерабочие дни, зимой и летом, а также о координатах расстановки светофоров или сигнальных знаков, длинах БУ и скоростях поездов в зависимости от координат пути.

В периоды увеличения интенсивности движения межпоездные интервалы на нормативных графиках нужно уменьшать до величин, допускаемых условиями разграничения поездов. При малом количестве поездов в час межпоездные интервалы увеличиваются до разностей моментов времени попутного отправления поездов. Межпоездные интервалы необходимо увеличивать, когда графиковое сближение поездов влечет снижение скоростей. Это требуется не для всех поездов, а только в условиях движения за поездом, прибывающим на станцию с остановкой, за пригородным поездом, имеющим остановку у пассажирской платформы, за тяжеловесным поездом на подъемах и т. д. В условиях сближения поездов межпоездные интервалы зависят в большей степени от изменений скорости идущих впереди поездов.

Получать всю эту информацию и рассчитывать изменяющиеся в широких пределах межпоездные интервалы в зависимости от планируемых условий пропуска поездов по участку возможно только в процессе разработки графиков движения графистами-технологами и при корректировке графиков поездными диспетчерами в случаях отклонений поездов от расписания. Из-за сложности реализации этой задачи методика определения расчетных межпоездных интервалов отсутствует и нормами не регламентируется. Поэтому заказчики проектов АБ в заданиях на проектирование указывают только межпоездные интервалы для самой медленной (расчетной) пары поездов, которые используются для расчетов длин БУ.

Для определения графистами-технологами и поездными диспетчерами станционных и межпоездных интервалов между взаимодействующими поездами

различных категорий и приоритетов существует инструкция [13], которая содержит статистические данные о длительностях станционных технологических операций и рекомендации по использованию тяговых расчетов. Методики их выполнения нет. Поэтому определять станционные и межпоездные интервалы, выбирать станции обгона и скрещения по критерию минимизации стоянок поездов предлагается с помощью комплекса компьютерных программ [14], объединяющего тяговые расчеты с математической обработкой статистических данных о моментах времени занятия и освобождения поездами блок-участков и станционных изолированных секций. Эти данные можно получать от систем диспетчерской и электрической централизаций, а также от устройств диспетчерского контроля и автоматизированных систем диагностики.

Для оценки пропускной способности железнодорожных технических станций, участков, линий и направлений целесообразно использовать метод имитационного моделирования движения поездов [15] всех используемых категорий. Метод основан на применении тяговых расчетов для определения скоростей и времени хода поездов в зависимости от их параметров, условий пропуска по участкам и технических характеристик СИРДП перегонов и станций.

Уникальной особенностью программного обеспечения метода имитационного моделирования является увязка графиковых моментов времени прибытия поездов на технические станции с последующими технологическими операциями. Очередности и длительности их выполнения задаются алгоритмическим описанием технологии работы станции с прибывающими поездами; принимаются во внимание количество путей приема, длительность их занятия и затраты времени на выполнение маневровых передвижений.

Моменты времени отправления поездов с технических станций определяет алгоритм подготовки поездов к отправлению, который задает последовательности и длительности выполнения технологических операций с учетом особенностей путевого развития, технологий, технического оснащения и текущего времени работы станций.

В результате имитационного моделирования рассчитываются и разрабатываются варианты графики движения максимальных количеств поездов задаваемых категорий за сутки, месяцы и годы, без использования коэффициентов съема. Достоинство метода – определение возможности освоения планируемых объемов пассажирских и грузовых перевозок с учетом необходимости предоставления «окон» для ремонтов инфраструктуры. Длительности и годы предоставления «окон» на задаваемые сроки рассчитываются на основе определения пропущенного тоннажа и норм назначения ремонтов.

Заключение

В статье доказано, что определение длин блок-участков на основе задаваемых межпоездных интервалов снижает пропускную способность железнодорож-

ных перегонов и участков. Поэтому разрешенное правилами проектирования определение длин блок-участков на основе максимальных тормозных путей поездов только на двухпутных грузонапряженных линиях следует применять при проектировании систем интервального регулирования движения поездов во всех случаях использования блок-участков. При этом определять длины «фиксированных» блок-участков следует на основе максимальных тормозных путей поездов, а длины «подвижных» блок-участков – на основе оперативно рассчитываемых тормозных путей каждого поезда, проходящего по участку.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 53431–2009. Автоматика и телемеханика железнодорожная. Термины и определения. Дата введения в действие 01.01.2009.
2. Розенберг Е. Н., Шухина Е. Е., Озеров А. В., Малинов В. М. Современные системы управления движением поездов: Отечественный и зарубежный опыт. – 2020. – 210 с.
3. Кокурин И. М. Построение интеллектуальной системы управления движением поездов на основе автоматизации диспетчерского регулирования и центрального автоведения // Автоматика на транспорте. – 2018. – Т. 4. – № 3. – С. 303–312.
4. Кокурин И. М., Ефанов Д. В. Технологические основы инновационной системы автоматического управления движением поездов // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 5. – С. 19–23.
5. Pachl J. Deadlock Avoidance in Railroad Operations Simulations, Textfassung eines Vortrages auf dem 90th Annual Meeting des Transportation Research Board in Washington DC, 23–27 Jan 2011, Paper No. 11–0175.
6. Hall C. “Modern Signalling: 5th edition”, UK, Shepperton: Ian Allan Ltd, 2016. – 144 p.
7. Theeg, and S. Vlasenko “Railway Signaling & Interlocking: 2nd Edition”, Germany, Hamburg: PMC Media House GmbH, 2018. – 458 p.
8. Свод правил. Железнодорожная автоматика и телемеханика. Правила проектирования. Утвержден приказом Минтранса России № 205 от 06.07.2015. Министерство транспорта Российской Федерации. – М., 2015. – 176 с.
9. Руководящие указания по расстановке светофоров автоблокировки и определению длин блок-участков на линиях с АЛСО. 660301 (Гипротранссигналсвязь). – СПб., 2003. – 32 с.
10. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог. – М., 2010. – 124 с.
11. Воронин В. А. Защитный участок: элемент безопасности или пережиток прошлого? // Железнодорожный транспорт. – 2019. – № 3. – С. 25–27.
12. Котенко А. Г., Грачев А. А., Шманёв Т. М. Регулирование движения поездов на пригородных участках // Бюллетень результатов научных исследований. – 2017. – № 3. – С. 149–150.
13. Инструкции по определению станционных и межпоездных интервалов, утверждена МПС России 16 июня 1995 г. № ЦД-361.
14. Кокурин И. М., Белозеров В. Л. Комплекс методов мониторинга продвижения поездов и имитационного моделирования процессов перевозок // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2012. – Вып. 2 (31). – С. 27–31.

15. Кокурин И. М., Тимченко В. С. Метод оценки вероятности обеспечения потребной пропускной способности железнодорожной линии, используемой для перевозок грузов морского порта, с учетом предоставления «окон» // Транспорт Урала. – 2016. – № 2. – С. 81–86.

I. M. Kokurin, Doctor of Technical Sciences

N. S. Solomenko Institute for Transportation Problems, Russian academy of sciences

SOLUTION OF PROBLEMS FOR INTERVAL TRAIN SEPARATION

The article substantiates technological and technical solutions that expand the application of design standards for railway automation and remote control systems, regulating the development and operation of systems for interval control of train traffic. Based on the analysis of the methods for arranging automatic block signal system and signal signs of automatic train control, used as an independent signaling and communication device during train movement, it has been proved that determining the lengths of block sections at specified train-to-train and intervals reduces the carrying capacity of the hauls. It has been established that a significant increase in the working capacity of the hauls is achieved when determining the lengths of “fixed” block sections by calculating the maximum stopping distances of trains on each haul, and the lengths of the “running” blocks - on the basis of the operatively calculated stopping distances of each ride, passing along the given section. Particular attention is paid to the application of the cognitive (research) method of using the knowledge and experience of interacting railway transport specialists in the field of creation, design and operation of the systems for interval control of train traffic. The directions of development of software for existing and created information systems that serve graphists-technologists, field dispatchers and machinists have been determined. It is shown that the use of the method of simulation modeling of train movement links the times of arrival and departure of trains with the beginning and end of station technological operations, which expands the possibilities of taking into account the influence of technical and organizational factors on the assessment of the working capacity and processing capacity of train stations. It is proposed to supplement the software of the method with a set of algorithms that determine the required working capacity of railway lines, stations, sections, lines and directions for a given number of trains of various high-speed categories, taking into account the prospect of providing possessions for repair work, depending on the planned volumes transportation.

Automatic block signal system, automatic train control, determination of the lengths of “fixed” and “running” blocks, train-to-train distances and intervals, train stopping distances, working capacity increase

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-3-438-451

References

1. *GOST R 53431-2009. Avtomatika i telemekhanika zheleznodorozhnaya. Terminy i opredeleniya. [Railway automation and telemechanics. Terms and Definitions]. Data vvedeniya v deystviye. Effective date 01.01.2009. (In Russian)*
2. *Rosenberg E. N., Shukhina E. E., Ozerov A. V., Malinov V. M. (2020) Sovremennyye sistemy upravleniya dvizheniyem poyezdov: Otechestvennyy i zarubezhnyy opyt [Modern train traffic control systems: Domestic and foreign experience]. 210 p. (In Russian)*

3. Kokurin I. M. (2018) Postroyeniye intellektualnoy sistemy upravleniya dvizheniyem poyezdov na osnove avtomatizatsii dispetcherskogo regulirovaniya i tsentral'nogo avtovedeniya [Construction of an intelligent train control system based on the automation of dispatch control and central automatic train operation]. *Avtomatika na transporte [Automation on Transport]*, vol. 4, no. 3, pp. 305–314. (In Russian)
4. Kokurin I. M., Efanov D. V. (2019) Tekhnologicheskiye osnovy innovatsionnoy sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniyem poyezdov [Technological foundations of innovatory trains control automatic system]. *Avtomatika, svyaz, informatika [Automation, communication, informatics]*, no. 5, pp. 19–23. (In Russian)
5. Jörn Pachl (2011) Deadlock Avoidance in Railroad Operations Simulations. *Textfassung eines Vortrages auf dem 90th Annual Meeting des Transportation Research Board in Washington DC*, 23–27 January, 2011, pp. 11–0175.
6. Hall C. (2016) *Modern Signalling: 5th edition*. UK, Shepperton: Ian Allan Ltd, 144 p.
7. Theeg G., Vlasenko S. (2018) *Railway Signaling & Interlocking: 2nd Edition*. Germany, Hamburg: PMC Media House GmbH, 458 p.
8. *Svod pravil. Zheleznodorozhnaya avtomatika i telemekhanika. Pravila proyektirovaniya [Set of rules. Railway automatics and telemechanics. Design rules]*. Utv. prikazom Mintransa Rossii № 205 ot 06.07.2015. Ministerstvo transporta Rossiyskoy Federatsii. Approved by order of the Ministry of Transport of Russia No. 205 dated 06.07.2015. Moscow, 2015, 176 p. (In Russian)
9. *Rukovodyashchiye ukazaniya po rasstanovke svetoforov avtoblokirovki i opredeleniyu dlin blok-uchastkov na liniyakh s ALSO. 660301 [Guidelines for the placement of auto-blocking traffic lights and determining the lengths of block sections on lines with automatic cab signaling. 660301]*. Saint Petersburg, Giprottranssignalsvyaz Publ., 2003, 32 p. (In Russian)
10. *Instruktsiya po raschetu nalichnoy propusknoy sposobnosti zheleznykh dorog [Instructions for calculating the available capacity of railways]*. Moscow, 2010, 124 p. (In Russian)
11. Voronin V. A. (2019) Zashchitnyy uchastok: element bezopasnosti ili perezhitok proshlogo? [Protective area: security element or a relic of the past?] *Zheleznodorozhnyy transport [Railway transport]*, no. 3, pp. 25–27. (In Russian)
12. Kotenko A. G., Grachev A. A., Shmanev T. M. (2017) Regulirovaniye dvizheniya poyezdov na prigorodnykh uchastkakh [Train traffic control at suburban sections]. *Byulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy [Bulletin of scientific research results]*, no. 3, pp. 149–150. (In Russian)
13. *Instruktsii po opredeleniyu stantsionnykh i mezhpoyezdnykh intervalov, [Instructions for determining station and inter-train intervals]*. Utv. MPS Rossii 16 iyunya 1995. № TSD-361. Approved by the Ministry of Railways of Russia on June 16, 1995 no. Central Directorate-361.]
14. Kokurin I. M., Belozyorov V. L. (2012) Kompleks metodov monitoringa prodvizheniya poyezdov i imitatsionnogo modelirovaniya protsessov perevozok [The complex of methods for monitoring train movement and imitation modeling of transportation processes]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Bulletin of the Petersburg University of Railways]*, iss. 2(31), pp. 27–31. (In Russian)
15. Kokurin I. M., Timchenko V. S. (2016) Metod otsenki veroyatnosti obespecheniya potrebnoy propusknoy sposobnosti zheleznodorozhnoy linii, ispol'zuyemoy dlya perevozok gruzov morskogo porta, s uchetom predostavleniya "okon" [Method for estimating the probability of ensuring the required capacity of the track used for transportation of seaport cargo with regard to the provision of "gaps"]. *Transport Urala [Transport of the Urals]*, no. 2, pp. 81–86. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии
профессором А. Б. Никитиным
Поступила в редакцию 05.03.2021, принята к публикации 08.04.2021*

КОКУРИН Иосиф Михайлович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории проблем организации транспортных систем ФГБУН Института проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук
kokyrinim@mail.ru

© Кокурин И. М., 2021

УДК 004.052.32

Р. Б. Абдуллаев

*Кафедра «Автоматика и телемеханика»,
Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент*

СИНТЕЗ ПОЛНОСТЬЮ САМОПРОВЕРЯЕМЫХ СХЕМ ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ КОДОВ ДЛЯ КОМБИНАЦИОННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

В статье исследуются способы синтеза систем функционального контроля логических комбинационных схем с полным обнаружением любых одиночных неисправностей с помощью свойств обнаружения ошибок полиномиальных кодов. Предложена классификация специальных образующих полиномов, формирующих коды с небольшим значением длины контрольного вектора и полной идентификацией ошибок определенного вида или кратностей. Предложен метод построения системы функционального контроля с полной идентификацией одиночных неисправностей на основе свойства полного обнаружения трехкратных ошибок полиномиальными кодами. Разработаны алгоритмы поиска и формирования контролепригодных Н1-, Н2- и Н3- групп выходов схем с учетом свойств полиномиальных кодов. Перечислены виды функциональной зависимости рабочих выходов комбинационных схем, при которых могут возникать ошибки разного вида. На основе свойства обнаружения любых симметричных и асимметричных ошибок полиномиальными кодами предложен метод построения систем функционального контроля с полной идентификацией этого вида ошибок. Для примерной схемы приводится разработка системы функционального контроля на основе предлагаемых методов.

Рабочее диагностирование, неисправность логических схем, кратность ошибки, вид ошибки, полиномиальные коды, классификация образующих полиномов

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-3-452-476

Введение

С появлением помехоустойчивых кодов в значительной мере была решена проблема надежности каналов связи, методов обработки и хранения данных. Помехоустойчивое кодирование стало широко применяться при построении высоконадежных систем управления и контроля, например, при реализации задач функционального диагностирования [1–4] отдельных блоков, узлов или схем, а также в системах функционального контроля (СФК) для сокращения аппаратных затрат таких систем. Известны работы [5] об использовании кодов

Бергера [6] и его модификаций, кодов Хэмминга [7] и равновесных кодов при построении систем функционального контроля логических схем. В таких задачах часто учитываются свойства кодов по обнаружению ошибок. Эти свойства лежат в основе системы диагностирования для идентификации наибольшего количества, а при возможности и полного множества ошибок на выходах контролируемых устройств. С помощью кодов Бергера можно идентифицировать все однонаправленные ошибки типа $0 \rightarrow 1$ или $1 \rightarrow 0$, с учетом этого свойства приводятся методы построения СФК с полной идентификацией ошибок на выходах диагностируемых схем с проявлением только однонаправленных ошибок [8, 9]. Таким образом, свойства кодов позволяют с использованием специальных методов строить системы с полной идентификацией ошибок.

Ошибки на выходах устройств подразделяются на одиночные – при кратности (число искаженных разрядов в информационном векторе длиной m) ошибки $d=1$, и многократные – при кратности $d>1$. Многократные ошибки подразделяются на однонаправленные, или монотонные, и разнонаправленные. Разнонаправленные ошибки делятся на симметричные, возникающие при равном числе искажений $0 \rightarrow 1$ и $1 \rightarrow 0$, и асимметричные, которые появляются при неравном числе искажений $0 \rightarrow 1$ и $1 \rightarrow 0$ и имеют кратность $d \geq 3$ [10].

Проявление того или иного вида ошибок на выходах диагностируемых схем диктует их топология. Поэтому для построения систем функционального контроля с полным обнаружением ошибок требуется тщательный анализ самого устройства и использования в основе такой системы соответствующего кода, который бы мог находить все ошибки на выходах устройства. Свойства обнаружения ошибок вышеперечисленных кодов ограничиваются идентификацией только определенного вида или кратности ошибок. Так, коды Бергера хоть и хорошо находят монотонные и асимметричные ошибки, но полностью не обнаруживают симметричные ошибки; модификации данного кода позволяют отыскивать только часть симметричных ошибок либо полностью – ошибки кратностью $d=2$. Коды Хэмминга помогают обнаруживать полностью только двукратные ошибки, равновесные коды полностью не обнаруживают симметричные ошибки, и т. д.

Эти обстоятельства подталкивают к поиску новых кодов со специфическими свойствами в основе системы функционального контроля, в частности полиномиальных кодов [11]. Многие работы [12, 13] посвящены использованию полиномиальных кодов в создании систем встроенного контроля логических устройств. В тех же работах приводятся итоги исследований свойств кодов находить ошибки. По их результатам установлены новые свойства полного обнаружения ошибок определенного вида и кратностей. Учет этих свойств при синтезе СФК способствует построению систем с полным обнаружением.

Цель работы заключается в исследовании методов построения СФК логических устройств на основе полиномиальных кодов с полной идентификацией ошибок на выходах диагностируемых устройств.

1. Классификация полиномиальных кодов по их свойствам

Свойства обнаружения ошибок полиномиальных кодов задаются характеристиками образующих полиномов [11]. В ходе исследований были выявлены ранее не известные свойства обнаружения ошибок полиномиальными кодами. Например, установлены условия построения полиномиальных кодов, полностью идентифицирующие двукратные и трехкратные ошибки, а также ошибки больших кратностей, и свойства полного обнаружения симметричных и асимметричных ошибок в информационных векторах.

Установленные свойства и условия построения полиномиальных кодов с конкретными обнаруживающими характеристиками могут быть очень полезны при проектировании СФК логических устройств.

На основе свойств обнаружения ошибок полиномиальными кодами с небольшим значением длины контрольного разряда – k , $k \in [2; 5]$ в таблице 1 приводится классификация образующих полиномов, формирующих коды с определенными обнаруживающими характеристиками.

Образующие полиномы, формирующие коды с полным обнаружением симметричных ошибок (*Symmetrical Error Detection – SED*) и асимметричных ошибок (*Asymmetrical Error Detection – AED*), названы соответственно *SED*- и *AED*-полиномами.

Для удобства описаний введем условное обозначение образующих полиномов как PN полинома, где P означает принадлежность к полиномиальному коду, а N – десятичный эквивалент числа двоичных коэффициентов полинома. Допустим, полином $x^3+x^1+x^0$ имеет коэффициенты 1011, что в десятичной форме равно числу 11, следовательно, полином обозначим как $P11$. Обозначим код, сформированный $P11$ полиномом, как $P11(m,k)$ -кодом, где m и k – длины соответственно информационного и контрольного вектора полиномиального кода.

2. Метод синтеза СФК логических устройств на основе полиномиальных кодов с полной идентификацией ошибок определенных кратностей на рабочих выходах

Виды и кратность ошибок на выходах логических устройств зависят от их топологии. Сложная структура диагностируемых устройств часто затрудняет идентификацию всех возможных ошибок на рабочих выходах с помощью помехозащищенных кодов. К примеру, на рис. 1 приводится комбинационная схема со структурно независимыми и зависимыми рабочими выходами.

Определение 1. Структурно независимыми выходами называются выходы логического устройства, не имеющие внутренней структурной связи с остальными выходами устройства, а значит, подобные выходы реализуются отдельными подсхемами логического устройства (выходы f_1 и f_2 на рис. 1) [14–17].

Таблица 1. Классификация специальных образующих полиномов по их свойствам

Число контрольных разрядов k			
2	3	4	5
Полиномы, образующие коды с полным обнаружением ошибок нечетных кратностей, оптимальные коды с проверкой на четность			
x^2+x^0 x^2+x^1	x^3+x^0 x^3+x^2 $x^3+x^2+x^1+x^0$	x^4+x^0 x^4+x^1 x^4+x^2 $x^4+x^2+x^1+x^0$ x^4+x^3 $x^4+x^3+x^1+x^0$ $x^4+x^3+x^2+x^0$ $x^4+x^3+x^2+x^1$	x^5+x^0 x^5+x^1 x^5+x^2 $x^5+x^2+x^1+x^0$ x^5+x^3 $x^5+x^3+x^1+x^0$ $x^5+x^3+x^2+x^0$ и т. д.
Полиномы, образующие коды с обнаружением любых двукратных ошибок			
$x^2+x^1+x^0$	$x^3+x^1+x^0$ $x^3+x^2+x^0$	$x^4+x^1+x^0$ $x^4+x^3+x^0$	$x^5+x^1+x^0$ $x^5+x^4+x^0$
Полиномы, образующие коды с обнаружением любых трехкратных ошибок			
—	$x^3+x^2+x^1+x^0$	$x^4+x^2+x^1+x^0$ $x^4+x^3+x^2+x^0$	$x^5+x^3+x^1+x^0$ $x^5+x^4+x^2+x^0$ $x^5+x^2+x^1+x^0$ $x^5+x^4+x^3+x^0$
Полиномы, образующие коды с обнаружением любых ошибок $d < m$			
$x^2+x^1+x^0$	$x^3+x^2+x^1+x^0$	$x^4+x^3+x^2+x^1+x^0$	$x^5+x^4+x^3+x^2+x^1+x^0$
<i>SED</i> -полиномы			
$x^2+x^1+x^0$	$x^3+x^1+x^0$ $x^3+x^2+x^0$	$x^4+x^1+x^0$ $x^4+x^2+x^0$ $x^4+x^3+x^0$ $x^4+x^3+x^2+x^1+x^0$	$x^5+x^1+x^0$ $x^5+x^2+x^0$ $x^5+x^3+x^0$ $x^5+x^3+x^2+x^1+x^0$ $x^5+x^4+x^0$ $x^5+x^4+x^2+x^1+x^0$ $x^5+x^4+x^3+x^1+x^0$ $x^5+x^4+x^3+x^2+x^0$
<i>AED</i> -полиномы			
x^2+x^0	x^3+x^0	x^4+x^0	x^5+x^0

Наличие общих внутренних точек рабочих выходов f_3 и f_n , комбинационной схемы на рис. 1 говорит о **структурной зависимости** этих выходов, т. к. они связаны путями с выходом одного и того же логического элемента. При возникновении неисправности до общей точки H^* на этих выходах могут одновременно проявляться ошибки. Если на данных выходах исключено одновременное проявление ошибок, они называются функционально независимыми.

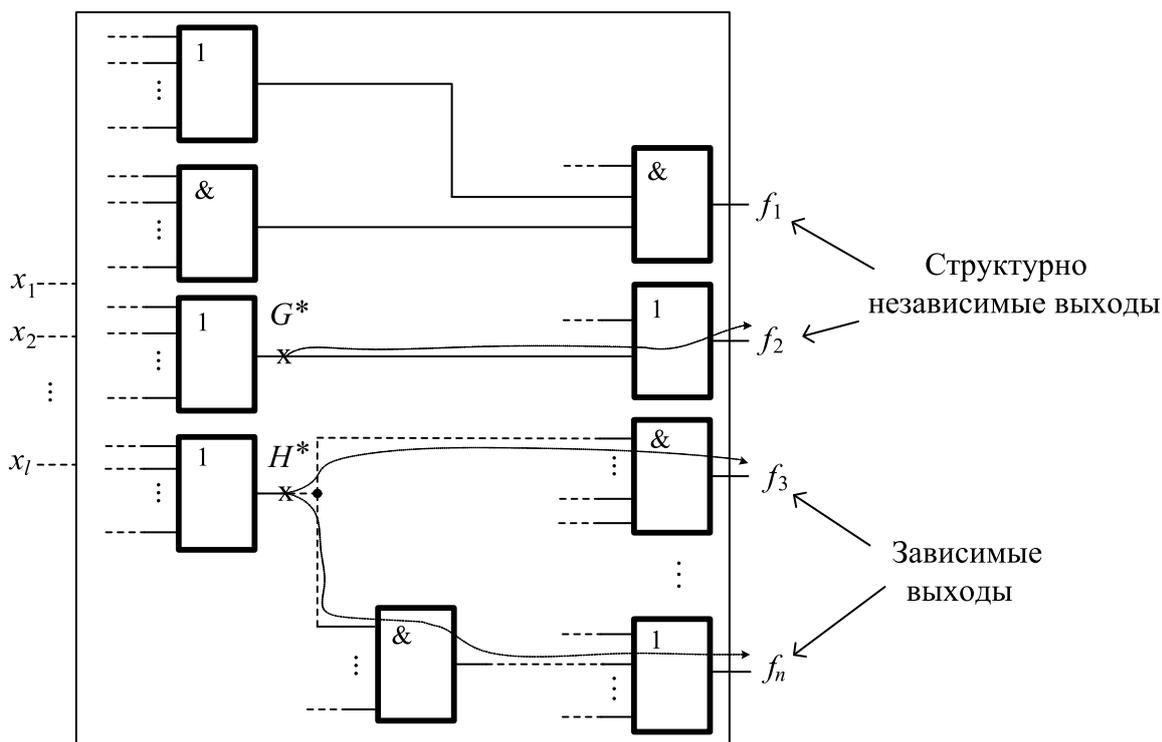


Рис. 1. Структурно независимые и зависимые выходы логической комбинационной схемы

Определение 2. Множество выходов логического устройства называется **функционально независимым**, если неисправность любого логического элемента не искажает более одного выхода группы [14–17].

Для их определения требуется выявить внутренние логические элементы, выходы которых связаны с несколькими выходами схемы, и сравнить попарно выходы на функциональную независимость по выражению [14]:

$$\frac{df_i}{dy_t} \frac{df_j}{dy_t} = 0. \quad (1)$$

где y_t – функция, реализуемая на выходе логического элемента t ; $t \in \{1; q\}$, q – количество логических элементов в структуре логического устройства.

Если все выходы диагностируемого устройства удовлетворяют условиям выражения (1), то полная идентификация ошибок на таких выходах может происходить с минимальными аппаратными затратами – при помощи кода паритета (или при помощи полиномов, формирующих коды с полным обнаружением ошибок нечетных кратностей, см. табл. 1). Но поскольку рабочие выходы реальных схем имеют зависимость от проявления ошибок различного вида и кратностей, то и использование кодов паритета в таких задачах встречается нечасто.

В этом случае предлагаются различные методы построения СФК с учетом свойств полного обнаружения ошибок определенных видов и кратностей ис-

пользуемых помехозащищенными кодами в целях полной идентификации одиночных внутренних неисправностей логических схем. Как показали исследования полиномиальных кодов со значением $k \in [2; 5]$ [12, 13] (и на основе вышеприведенной классификации), такими кодами могут полностью обнаруживаться двукратные, трехкратные, кратностью $d < m$, симметричные и асимметричные ошибки при определенных условиях построения этих кодов. Методы построения СФК на основе свойства полного обнаружения всех двукратных ошибок приведены в [15, 18]. Для полиномиальных кодов отличие заключается только в значении длины информационного вектора формируемых контролепригодных групп, которая определяется как $m \leq 2^k - 1$. В этом случае из множества выходов схемы осуществляется поиск 2-независимых групп выходов.

Определение 3. Множество выходов логической комбинационной схемы называется **2-независимой группой выходов** (Н2-группа) если неисправность любого логического элемента схемы искажает значения не более двух выходов группы [15].

Из определения 3 следует; если при наличии внутренней структурной связи любого логического элемента схемы с количеством рабочих выходов $N_{cs} \geq 3$, то на этих выходах могут проявляться ошибки кратностью больше $d=2$. Для проверки функциональной зависимости выходов на принадлежность Н2-группе достаточно выполнить относительно каждого логического элемента следующее условие [15]:

$$\frac{df_i}{dy_t} \frac{df_j}{dy_t} \frac{df_q}{dy_t} = 0. \quad (2)$$

Если выражение (2) выполняется для каждого подмножества выходов, то на множестве выходов устройства исключены проявления ошибок $d \geq 3$.

Анализируя предлагаемые в [15, 18] подходы, можно предположить, что сокращение структурной избыточности, при использовании специальных методов построения СФК на основе учета свойств кодов, полностью обнаруживающих ошибки до определенной кратности, можно достичь, используя полиномиальные коды, полностью обнаруживающие трехкратные ошибки. Так как при этом сокращается число контролепригодных групп, а, следовательно, и число контрольных схем.

Для данной задачи формируются множества 3-независимых групп выходов из числа рабочих выходов схемы.

Определение 4. Множество выходов логической комбинационной схемы $\{f_{i_1}, f_{i_2}, \dots, f_{i_q}\}$ ($q \geq 3$) называется **3-независимой группой выходов** (Н3-группа) если неисправность выхода любого логического элемента искажает не более трех выходов группы [19].

Если есть структурные связи, при которых выход логического элемента связан с тремя и менее выходами устройства $N_{cs} \leq 3$ относительно каждого логического

элемента, то на множестве выходов не могут проявляться ошибки большей кратности, чем $d=3$. При наличии $N_{сз} \geq 4$ необходимо проверять на функциональную зависимость проявления только трехкратных ошибок на выходах из общего их множества, для этого достаточно выполнить условие [19]:

$$\frac{df_i}{dy_i} \frac{df_j}{dy_j} \frac{df_r}{dy_r} \frac{df_q}{dy_q} = 0. \quad (3)$$

В выражении (3) проверяется возможность одновременного искажения значений четырех произвольных выходов множества.

Поиск и формирование НЗ-групп выходов устройства с учетом свойств полиномиальных кодов осуществляется по алгоритму, приведенному на рис. 2.

Если при анализе выходов ни одно из подмножеств выходов не образует НЗ-группу выходов, то осуществляется поиск Н2-групп выходов. В отличие от способа поиска только Н2-групп выходов и выделение их в отдельное множество выходов, при поиске НЗ-группы выходов необходим поиск также и Н2-и Н1-групп выходов. Делается это для последующего объединения идентифици-

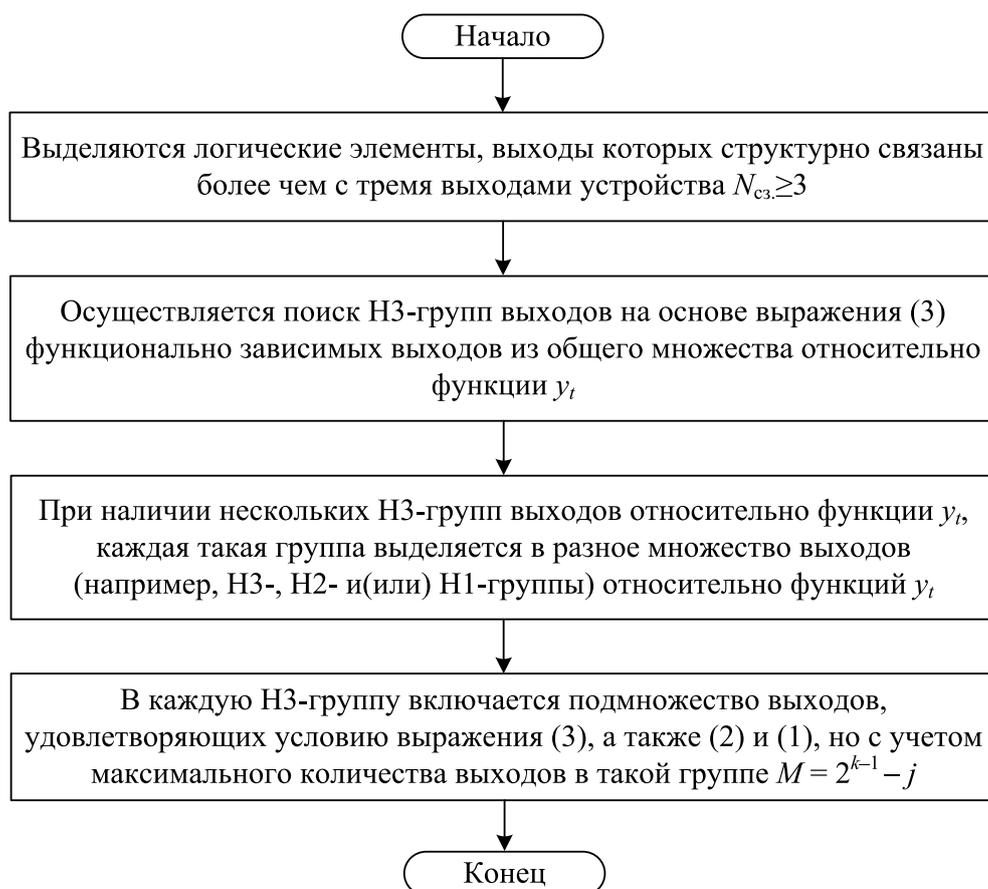


Рис. 2. Алгоритм поиска и формирование контролепригодных НЗ-групп выходов из множества

рованных НЗ-, Н2-и Н1-групп выходов относительно разных функций u или функционально независимых относительно одной функции в одну общую группу. Таким образом, уменьшается значение $\frac{k}{m}$, что напрямую влияет на структурную избыточность системы. При этом для обнаружения всех трехкратных ошибок полиномиальными кодами, необходимо, чтобы значение информационного вектора не превышало значение $m \leq 2^{k-1} - j$, где j – степень полинома вида $x^j + 1$, участвующего в разложении образующего полинома.

После определения функциональной зависимости всех выходов схемы формируются окончательные контролепригодные группы выходов, которые могут содержать и только одно наименование подгрупп, например, НЗ-или Н2-группы выходов, и несколько наименований, например, НЗ-, Н2-и Н1-группы (см. алгоритм на рис. 3). При формировании контролепригодных групп необходимо внимательно анализировать кратности возможных ошибок после объединения. Допускается объединение НЗ-, Н2-или Н1-групп выходов относительно общей функции u_i в одну контролепригодную группу, если они функционально независимы между собой, т. е. одновременное проявление ошибок на объединяемых выходах исключено, или при одновременной трансляции неисправности в их общей точке (y_i) на объединяемые выходы кратность ошибки не превышает трех.

При распределении выходов по контролепригодным группам необходимо учитывать и такой косвенный показатель, как «заполняемость» формируемой группы. При «незаполненной» группе отношение $\frac{k}{m}$ не имеет минимально возможного значения, что напрямую влияет на структурную избыточность СФК.

После формирования окончательных контролепригодных групп выходов подбирается соответствующий конкретной группе образующий полином для построения кода. Для НЗ-группы используются полиномы, формирующие коды с обнаружением всех трехкратных ошибок, а для Н2-группы – коды с обнаружением всех двукратных. Если некоторые Н1-группы выходов невозможно включить в Н2-или НЗ-группы либо все выходы диагностируемой схемы составляют Н1-группы, то для контроля этих выходов используется код паритета.

Рассмотрим пример построения СФК для комбинационной схемы (рис. 4) на выходах которой могут возникать ошибки кратностью больше трех.

Комбинационная схема на рис. 4 реализует следующие рабочие функции:

$$\begin{aligned} f_1 &= \overline{x_1 x_2 x_3} \vee x_4; & f_2 &= \overline{\overline{x_1 x_2 x_3} \vee x_4}; \\ f_3 &= \overline{x_1 x_2} \vee \overline{\overline{x_5}}; & f_4 &= \overline{\overline{x_5} \overline{x_2}}; \\ f_5 &= \overline{\overline{x_1 x_2} \vee \overline{\overline{x_5}}}; & f_6 &= \overline{\overline{x_2} \vee \overline{x_1 x_3}}; \\ f_7 &= \overline{\overline{\overline{x_2} x_1 x_3}}; & f_8 &= \overline{\overline{x_2} x_1 x_3}. \end{aligned}$$

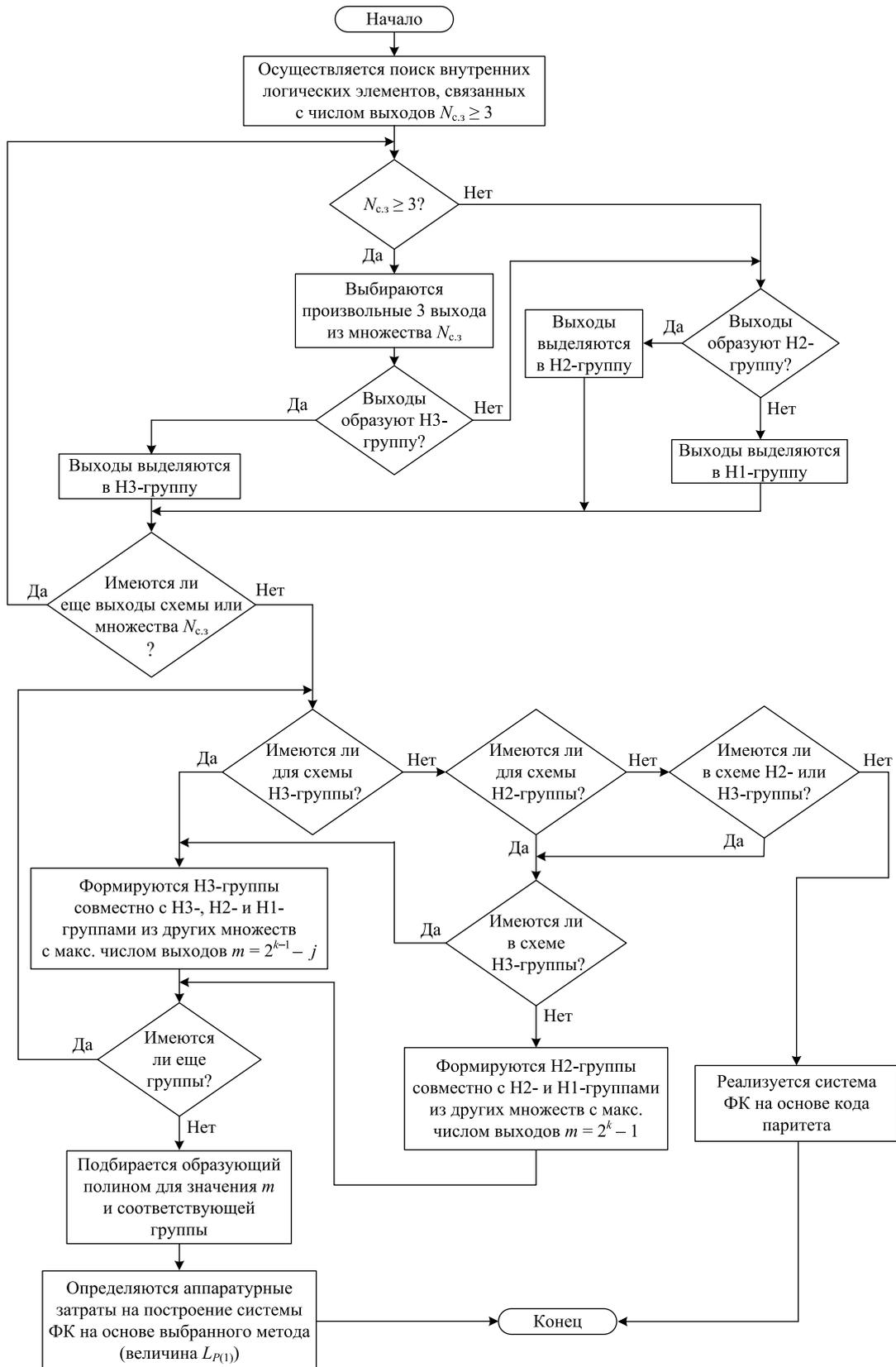


Рис. 3. Алгоритм поиска N3-, N2- и N1-независимых групп выходов схемы для построения систем функционального контроля с обнаружением всех одиночных неисправностей на основе полиномиальных кодов

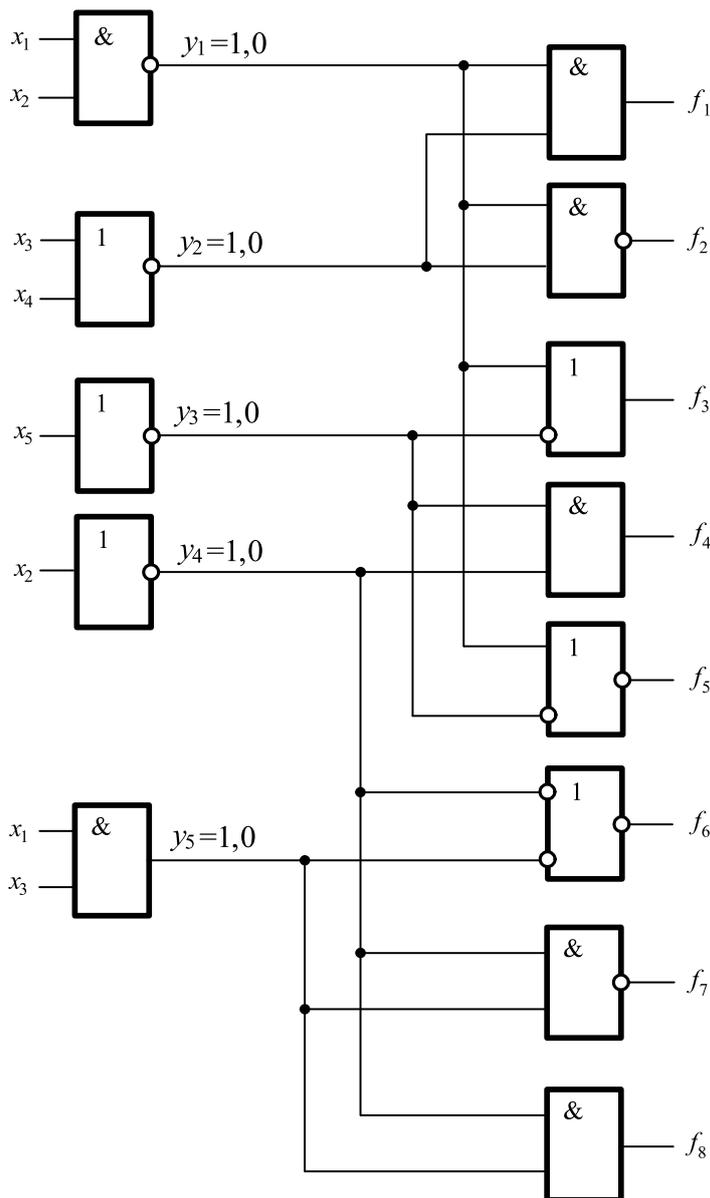


Рис. 4. Объект диагностирования

Определим условия трансляции внутренних неисправностей на все выходы диагностируемого устройства с помощью булевых производных:

$$\frac{df_1}{dy_1} = \frac{df_2}{dy_1} = \bar{x}_3\bar{x}_4; \quad \frac{df_3}{dy_1} = \frac{df_5}{dy_1} = \bar{x}_5; \quad \frac{df_1}{dy_2} = \frac{df_2}{dy_2} = \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2; \quad \frac{df_3}{dy_3} = \frac{df_5}{dy_3} = x_1x_2;$$

$$\frac{df_4}{dy_3} = \bar{x}_2; \quad \frac{df_6}{dy_4} = \frac{df_7}{dy_4} = \frac{df_8}{dy_4} = x_1x_3; \quad \frac{df_4}{dy_4} = \bar{x}_5; \quad \frac{df_6}{dy_5} = \frac{df_7}{dy_5} = \frac{df_8}{dy_5} = \bar{x}_2.$$

Определим условия всех возможных кратностей ошибок на выходах диагностируемой схемы:

$$\frac{df_1}{dy_1} \frac{df_2}{dy_1} \frac{df_3}{dy_1} \frac{df_5}{dy_1} = \bar{x}_3 \bar{x}_4 \bar{x}_3 \bar{x}_4 \bar{x}_5 \bar{x}_5 = \bar{x}_3 \bar{x}_4 \bar{x}_5 \neq 0, \quad \frac{df_1}{dy_2} \frac{df_2}{dy_2} = (\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2)(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2) = \bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \neq 0.$$

$$\frac{df_3}{dy_3} \frac{df_4}{dy_3} \frac{df_5}{dy_3} = x_1 x_2 \bar{x}_2 x_1 x_2 = 0 \rightarrow \frac{df_3}{dy_3} \frac{df_5}{dy_3} = x_1 x_2 x_1 x_2 = x_1 x_2 \neq 0,$$

$$\frac{df_4}{dy_4} \frac{df_6}{dy_4} \frac{df_7}{dy_4} \frac{df_8}{dy_4} = \bar{x}_5 x_1 x_3 x_1 x_3 x_1 x_3 = \bar{x}_5 x_1 x_3 \neq 0, \quad \frac{df_6}{dy_5} \frac{df_7}{dy_5} \frac{df_8}{dy_5} = \bar{x}_2 \bar{x}_2 \bar{x}_2 = \bar{x}_2 \neq 0.$$

Для удобства анализа в правой части таблицы 2 приведены кратности и наименования видов ошибок, которые могут возникать на выходах диагностируемой схемы при искажении значения функций y_i . Для этого было имитировано возникновение неисправностей на выходах логических элементов 1 уровня и сняты значения выходных функций. Можно заметить, что на выходах диагностируемой схемы возникают ошибки с кратностью $d > 3$, а точнее — четырехкратные, на множествах выходов f_1, f_2, f_3, f_5 и f_4, f_6, f_7, f_8 . Для выделения из этих множеств НЗ-группы можно выбрать произвольные 3 выхода из каждого множества, т. к. $\frac{df_4}{dy_4} \frac{df_6}{dy_4} \frac{df_7}{dy_4} \frac{df_8}{dy_4} \neq 0$,

и с учетом условия выражения (3) любая комбинация из произвольных трех выходов соответствующего множества все равно не будет равна нулю.

Также заметим, что в схеме выходы f_3, f_4 и f_5 не составляют НЗ-группу при искажении функции y_3 , т. к. $\frac{df_3}{dy_3} \frac{df_4}{dy_3} \frac{df_5}{dy_3} = 0$, но при этом $\frac{df_3}{dy_3} \frac{df_5}{dy_3} \neq 0$, значит,

относительно функции y_3 выходы f_3 и f_5 составляют Н2-группу. Также они составляют Н2-группу и относительно функции y_1 , т. к. $\frac{df_3}{dy_1} \frac{df_5}{dy_1} \neq 0$. Выходы

f_1 и f_2 относительно функций y_1 и y_2 составляют еще одну Н2-группу выходов рассматриваемой схемы, что подтверждается выражениями $\frac{df_1}{dy_1} \frac{df_2}{dy_1} \neq 0$ и

$\frac{df_1}{dy_2} \frac{df_2}{dy_2} \neq 0$. На основе выделенных НЗ-и Н2-групп выходов диагностируемой

схемы предлагается объединить выходы в контролепригодные множества выходов, как представлено в таблице 3.

Как видно из таблицы 3, выходы Н2-групп участвуют и в НЗ-группах выходов в зависимости от выбранной комбинации НЗ-группы, что при некоторых объединениях исключает необходимость отдельного контроля указанных Н2-групп. Далее в таблице 3 приводятся варианты объединения выделенных групп выходов в контролепригодные множества выходов. В частности, для рассматриваемой схемы выделены только множества выходов, контролируемые

Таблица 2. Виды возможных ошибок на выходах комбинационной схемы на рис. 4 при подаче тестовых входных векторов и возникновении внутренних неисправностей на выходах логических элементов 1 уровня схемы

Тестовый входной вектор	Значение зависимых выходов при исправной схеме								Вид неисправности	Значение зависимых выходов при неисправной схеме								Кратность ошибки	Вид ошибки
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8		f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8		
$\sim \sim \bar{x}_3 \bar{x}_4 \bar{x}_5$	0	1	0	\sim	1	\sim	\sim	\sim	$y_1=1$	1	0	\sim	0	\sim	\sim	\sim	4	Симметричные	
$\sim \sim \bar{x}_3 \bar{x}_4 \bar{x}_5$	1	0	1	\sim	0	\sim	\sim	\sim	$y_1=0$	0	1	\sim	1	\sim	\sim	\sim	4	Симметричные	
$\sim \sim \bar{x}_3 \bar{x}_4 1$	0	1	0	\sim	1	\sim	\sim	\sim	$y_1=1$	1	0	\sim	1	\sim	\sim	\sim	2	Симметричные	
$\sim \sim \bar{x}_3 \bar{x}_4 1$	1	0	1	\sim	0	\sim	\sim	\sim	$y_1=0$	0	1	\sim	0	\sim	\sim	\sim	2	Симметричные	
$\sim \sim 1 \bar{x}_5$	0	1	0	\sim	1	\sim	\sim	\sim	$y_1=1$	0	1	\sim	0	\sim	\sim	\sim	2	Симметричные	
$\sim \sim 1 \bar{x}_5$	1	0	1	\sim	0	\sim	\sim	\sim	$y_1=0$	1	0	\sim	1	\sim	\sim	\sim	2	Симметричные	
$\bar{x}_1 \sim \sim \sim \vee \sim \bar{x}_2 \sim \sim \sim$	0	1	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	$y_2=1$	1	0	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	2	Симметричные	
$\bar{x}_1 \sim \sim \sim \vee \sim \bar{x}_2 \sim \sim \sim$	1	0	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	$y_2=0$	0	1	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	2	Симметричные	
$x_1 x_2 \sim \sim \sim$	\sim	\sim	1	\sim	0	\sim	\sim	\sim	$y_3=1$	\sim	\sim	\sim	1	\sim	\sim	\sim	2	Симметричные	
$x_1 x_2 \sim \sim \sim$	\sim	\sim	0	\sim	1	\sim	\sim	\sim	$y_3=0$	\sim	\sim	\sim	0	\sim	\sim	\sim	2	Симметричные	
$\sim \bar{x}_2 \sim \sim \sim$	\sim	\sim	1	0	0	\sim	\sim	\sim	$y_3=1$	\sim	1	0	\sim	\sim	\sim	\sim	1	Одиочная	
$\sim \bar{x}_2 \sim \sim \sim$	\sim	\sim	1	1	0	\sim	\sim	\sim	$y_3=0$	\sim	1	0	\sim	\sim	\sim	\sim	1	Одиочная	
$x_1 \sim x_3 \sim \bar{x}_5$	\sim	\sim	\sim	0	\sim	0	1	0	$y_4=1$	\sim	\sim	1	\sim	1	0	1	4	Асимметричные	
$x_1 \sim x_3 \sim \bar{x}_5$	\sim	\sim	\sim	1	\sim	1	0	1	$y_4=0$	\sim	\sim	0	\sim	0	1	0	4	Асимметричные	
$x_1 \sim x_3 \sim 1$	\sim	\sim	\sim	0	\sim	0	1	0	$y_4=1$	\sim	\sim	0	\sim	1	0	1	3	Асимметричные	
$x_1 \sim x_3 \sim 1$	\sim	\sim	\sim	0	\sim	1	0	1	$y_4=0$	\sim	\sim	0	\sim	0	1	0	3	Асимметричные	
$0 \sim 0 \sim \bar{x}_5$	\sim	\sim	\sim	0	\sim	0	1	0	$y_4=1$	\sim	\sim	1	\sim	0	1	0	1	Одиочная	
$0 \sim 0 \sim \bar{x}_5$	\sim	\sim	\sim	1	\sim	0	1	0	$y_4=0$	\sim	\sim	0	\sim	0	1	0	1	Одиочная	
$\sim \bar{x}_2 \sim \sim \sim$	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	0	1	0	$y_5=1$	\sim	\sim	\sim	\sim	1	0	1	3	Асимметричные	
$\sim \bar{x}_2 \sim \sim \sim$	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	1	0	1	$y_5=0$	\sim	\sim	\sim	\sim	0	1	0	3	Асимметричные	

Таблица 3. Распределение зависимых выходов диагностируемой комбинационной схемы по контролепригодным множествам выходов и выбор образующего полинома для этих групп выходов

№	Наименование группы		
	Н3-группы	Н2-группы	Н1-группы
1	$f_1 f_2 f_3$	$f_1 f_2$	—
2	$f_1 f_3 f_5$	$f_3 f_5$	
3	$f_2 f_3 f_5$		
4	$f_1 f_2 f_5$		
5	$f_4 f_6 f_7$		
6	$f_4 f_7 f_8$		
7	$f_6 f_7 f_8$		
8	$f_4 f_6 f_8$		
Варианты объединений, а также разделений идентифицированных групп в контролепригодные множества выходов для заданной схемы			
№	Контролепригодное множество, контролируемое кодом с обнаружением всех трехкратных ошибок	Контролепригодное множество, контролируемое кодом с обнаружением всех двукратных ошибок	Контролепригодное множество, контролируемое кодом паритета
1 вариант	$f_1 f_2 f_3 f_4 f_6 f_7$	—	$f_5 f_8$
2 вариант	$f_1 f_2 f_3 f_6 f_7 f_8$	—	$f_4 f_5$
3 вариант	$f_2 f_3 f_5 f_6 f_7 f_8$	—	$f_1 f_4$
4 вариант	$f_1 f_3 f_5 f_6 f_7 f_8$	—	$f_2 f_4$
5 вариант	$f_1 f_2 f_3 f_4 f_7 f_8$	—	$f_5 f_6$
6 вариант	$f_1 f_3 f_5 f_4 f_7 f_8$	—	$f_2 f_6$
7 вариант	—	$f_1 f_2 f_4 f_6$ и $f_3 f_5 f_7 f_8$	—
8 вариант	—	$f_1 f_2 f_7 f_8$ и $f_3 f_5 f_4 f_6$	—
9 вариант	—	$f_1 f_3 f_4 f_6$ и $f_2 f_5 f_7 f_8$	—
10 вариант	—	$f_1 f_5 f_4 f_8$ и $f_2 f_3 f_6 f_7$ и т. д.	—
Рекомендуемые образующие полиномы при построении полиномиальных кодов с обнаружением всех одиночных неисправностей для отдельных множеств выходов			
1	$P23$	$P11$	Коды паритета
2	$P29$	$P13$	

на основе кодов и обнаруживающие любые трехкратные ошибки, и множества выходов, которые можно контролировать на основе кодов паритета.

Рассмотрим построение системы функционального контроля для диагностируемой схемы, например, по первому варианту объединения групп.

Информационный вектор для первых шести вариантов объединений имеет значение $m=6$. Образующими полиномами, которые формируют коды с обна-

ружением всех трехкратных ошибок и с наименьшим значением k являются полиномы $P23$ и $P29$. Соответственно, функции генератора кода, например, при использовании полинома $P23$, будут иметь следующий вид и принцип построения таких генераторов приводится в работе [12, 13]:

$$g_1 = f_1 \oplus f_3 \oplus f_4; \quad g_2 = f_1 \oplus f_2 \oplus f_3 \oplus f_6; \quad g_3 = f_1 \oplus f_2 \oplus f_7; \quad g_4 = f_2 \oplus f_3.$$

Для контроля выходов f_5 и f_8 будем использовать код паритета, т. к. на этих выходах структурно исключено одновременное проявление ошибок при внутренней одиночной неисправности.

Обозначим для удобства разряд контрольного вектора кода паритета как g_5 , тогда:

$$g_5 = f_5 \oplus f_8.$$

Контрольный вектор в этом примере реализуется двумя генераторами кода, следовательно, для удобства его сравнения с вектором блока контрольной логики $G(x)$ обозначим его узлы отдельно – как $G_1(x)$ и $G_2(x)$.

Система функционального контроля на основе выделения НЗ-и Н1-групп контролепригодных выходов для полиномиальных кодов и полным обнаружением всех ошибок на выходах при внутренних одиночных неисправностях рассматриваемой комбинационной схемы приведена на рис. 5.

В таблице 3 также дано выделение (разделение НЗ-групп) Н2-групп выходов и последующее их объединение в контролепригодные множества выходов (варианты 7–10). Для рассмотренной комбинационной схемы принципы построения системы контроля на основе кодов с обнаружением всех двукратных ошибок при таком группировании отдельных выходов не отличаются от принципов построения системы с выделением Н2-групп выходов, приведенной в [15].

Рассмотренный пример показывает основные особенности построения систем функционального контроля на основе выделения НЗ-групп выходов и использования полиномиальных кодов с обнаружением любых трехкратных ошибок. Такой метод построения даже визуально обладает преимуществом по сравнению с методом построения на основе выделения Н2-групп выходов. К примеру, при использовании метода построения на основе выделения Н2-групп выходов для реализации СФК рассматриваемой схемы число контролепригодных групп равно 2, в каждой из них по 4 выхода. Для контроля таких групп потребовалось бы использование полиномов $P11$ или $P13$, формирующих по 3 контрольных разряда, с общим числом контрольных разрядов равным 6. Далее нужно было бы использовать 2 компаратора с 6 парафазными входами против предлагаемого 1 с 8 входами. Также использовались бы 2 контрольные схемы с 3 выходами против 1 с 4 и 1 с 1 выходом.

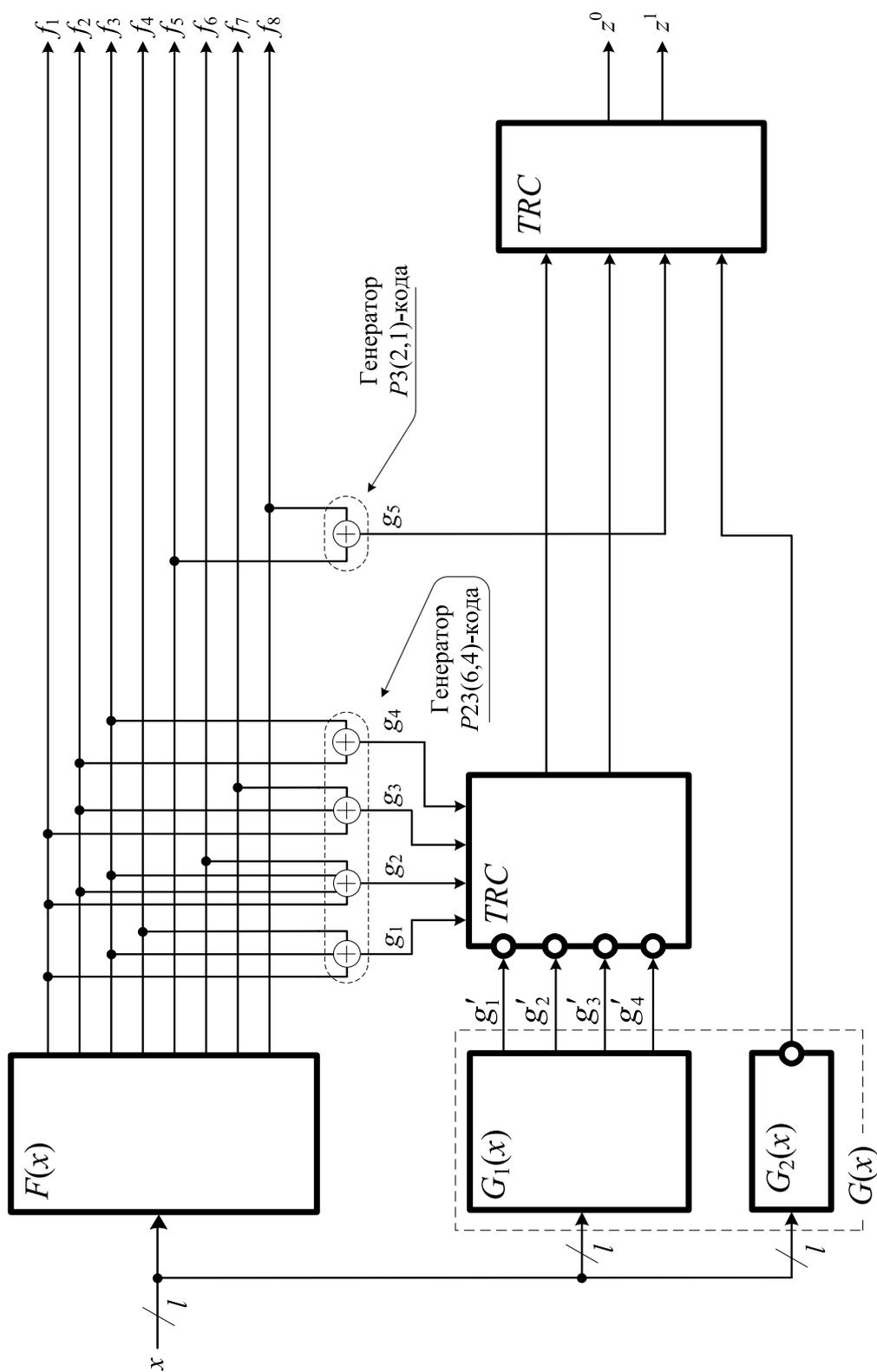


Рис. 5. Система функционального контроля с обнаружением всех одиночных неисправностей рассматриваемой дискретной схемы на основе группирования функционально зависимых выходов с проявлением ошибок $d \leq 3$

3. Метод синтеза СФК логических устройств на основе полиномиальных кодов с полным обнаружением ошибок определенного вида

Виды ошибок на выходах логических устройств могут быть разными. Например, на выходах рассмотренной выше схемы возникают симметричные, асимметричные и одиночные ошибки. Обнаружение одиночных ошибок может осуществляться любыми полиномиальными кодами, обнаруживающими ошибки. Задача полной идентификации симметричных и асимметричных ошибок решается с помощью *SED*- и *AED*-полиномов, приведенных в таблице 1. В случае возникновения при других схемах ошибок монотонного вида полную идентификацию последних следует осуществлять с помощью классических кодов Бергера или предложенным выше способом построения СФК.

Таким образом, подбирая специальные образующие полиномы или коды для отдельных групп выходов диагностируемых схем, можно полностью идентифицировать любые одиночные неисправности устройств.

По виду возникающих ошибок выходы комбинационных схем принято подразделять на группы [21–23].

Определение 5. Выходы логической комбинационной схемы называются *монотонно зависимыми* (МЗ-группа), если на них помимо ошибок другого вида проявляются также и монотонные ошибки.

Определение 6. Выходы логической комбинационной схемы называются *симметрично зависимыми* (СЗ-группа), если на них помимо ошибок другого вида также проявляются и симметричные ошибки.

Определение 7. Выходы логической комбинационной схемы называются *асимметрично зависимыми* (АЗ-группа), если на них помимо ошибок другого вида также проявляются и асимметричные ошибки.

Определение 8. Выходы логической комбинационной схемы называются *монотонно независимыми* (МН-группа), если на них проявляются только монотонные ошибки.

Определение 9. Выходы логической комбинационной схемы называются *симметрично независимыми* (СН-группа), если на них проявляются только симметричные ошибки.

Определение 10. Выходы логической комбинационной схемы называются *асимметрично независимыми* (АН-группа), если на них проявляются только асимметричные ошибки.

Из перечисленных видов выходов с различной функциональной зависимостью и на основе приведенной выше классификации образующих полиномов можно сделать вывод: при использовании определенных полиномов для группы выходов с определенной функциональной зависимостью можно достичь полного обнаружения ошибок на большинстве выделенных выше группах выходов.

Из [9] известно условие определения возникновения монотонных ошибок на двух структурно зависимых выходах:

$$\frac{df_i}{dy_t} \cdot \frac{df_j}{dy_t} (f_i \oplus f_j) = 0, \quad (4)$$

где f_i и f_j – два структурно зависимых выхода комбинационной схемы.

Левый множитель выражения (4) определяет те входные наборы, при которых происходит трансляция внутренней неисправности в точке y_t на рабочие выходы f_i и f_j . Правый множитель – это проверка вида ошибки, т. е. при исправной схеме и равных значениях выходов результат сложения по модулю 2 будет равным нулю, что приравнивает к нулю соответственно результат умножения левого и правого множителей выражения (4). Иначе говоря, если при исправной схеме логический сигнал в точке y_t транслируется на оба рабочих выхода при подаче тестового входного набора и значения этих выходов получаются одинаковыми, то при внутренней неисправности в рассматриваемой точке искаженный сигнал также будет транслироваться на данные выходы, одновременно изменяя значения разрядов обоих выходов, что говорит о проявлении монотонной ошибки.

Попарно сравнивая все выходы схемы, можно идентифицировать все выходы, на которых могут проявляться монотонные ошибки.

Для определения возможности проявления симметричных ошибок на выходах используют выражение [21]:

$$F^d F^\sigma \neq 0, \quad (5)$$

где $F^d = \frac{df_{i_1}}{dy_t} \frac{df_{i_2}}{dy_t} \dots \frac{df_{i_d}}{dy_t}$ – функция, определяющая искажение кратностью d ;

$F^\sigma = \bigvee_{f_{i_1} f_{i_2} \dots f_{i_d} \in C_d^{d/2}} f_{i_1} f_{i_2} \dots f_{i_d}$ – функция, позволяющая выявить, является ли

ошибка кратностью d симметричной; $f_{i_1} f_{i_2} \dots f_{i_d}$ – конъюнкция значений выходных функций длиной d ; $C_d^{d/2}$ – множество кодовых векторов весом $d/2$ и длиной d .

Для определения возможности проявления только симметричных ошибок на выходах используют выражение [21]:

$$F^d F^\sigma = 0, \quad (6)$$

для идентификации асимметрично зависимой группы выходов пользуются выражением:

$$F^d F^\alpha \neq 0, \quad (7)$$

а также асимметрично независимой группы:

$$F^d F^\alpha = 0, \quad (8)$$

где $F^\alpha = \bigvee_{f_1, f_2, \dots, f_d \in C_d^d} f_1 f_2 \cdot \dots \cdot f_d$ – функция, позволяющая определить, является ли ошибка кратностью d асимметричной; $d^* \in \{1, 2, \dots, d-1\} \setminus \left\{ \frac{d}{2} \right\}$ – если d

четное, и $d^* \in \{1, 2, \dots, d-1\}$ – если d нечетное.

На основе вышеприведенных выражений можно определить функциональную зависимость рабочих выходов логической схемы от проявления того или иного вида ошибок. Посредством этих выражений и имитирования внутренних неисправностей на выходах логических элементов первого уровня рассматриваемой схемы в правой части таблицы 2 приведены наименования видов ошибок, которые могут возникать на выходах диагностируемой схемы при искажении значения функций y_i .

В соответствии с предлагаемым в данном разделе методом осуществим распределение выходов диагностируемой схемы по группам на основе вида проявляющейся в них ошибки. Для схемы существует три вида групп (см. таблицу 4): асимметрично независимая, асимметрично зависимая и симметрично независимая группы выходов.

Для уменьшения количества групп можно включить асимметрично независимую группу выходов в асимметрично зависимую, т. к. включаемые выходы в последней группе участвуют. Такая операция воспроизводит одиночные ошибки в асимметрично зависимой группе, но при использовании для нее любого AED -полинома обнаружение подобных ошибок полиномиальными кодами осуществимо.

Подберем соответствующие полиномы для построения полиномиального кода каждой из групп с условием полного обнаружения всех ошибок на выходах

Таблица 4. Распределение зависимых выходов комбинационной схемы по группам и выбор образующего полинома для построения полиномиального кода

№	Наименование группы		
	Симметрично независимая	Асимметрично независимая	Асимметрично зависимая
1	$f_1 f_2$	$f_6 f_7 f_8$	$f_4 f_6 f_7 f_8$
2	$f_3 f_5$	–	–
3	$f_1 f_2 f_3 f_5$	–	–
Рекомендуемые образующие полиномы при построении полиномиальных кодов с условием $k < m$ и полным обнаружением одиночных неисправностей для отдельных групп выходов			
1	$P11$	$P5$	$P9$
2	$P13$		

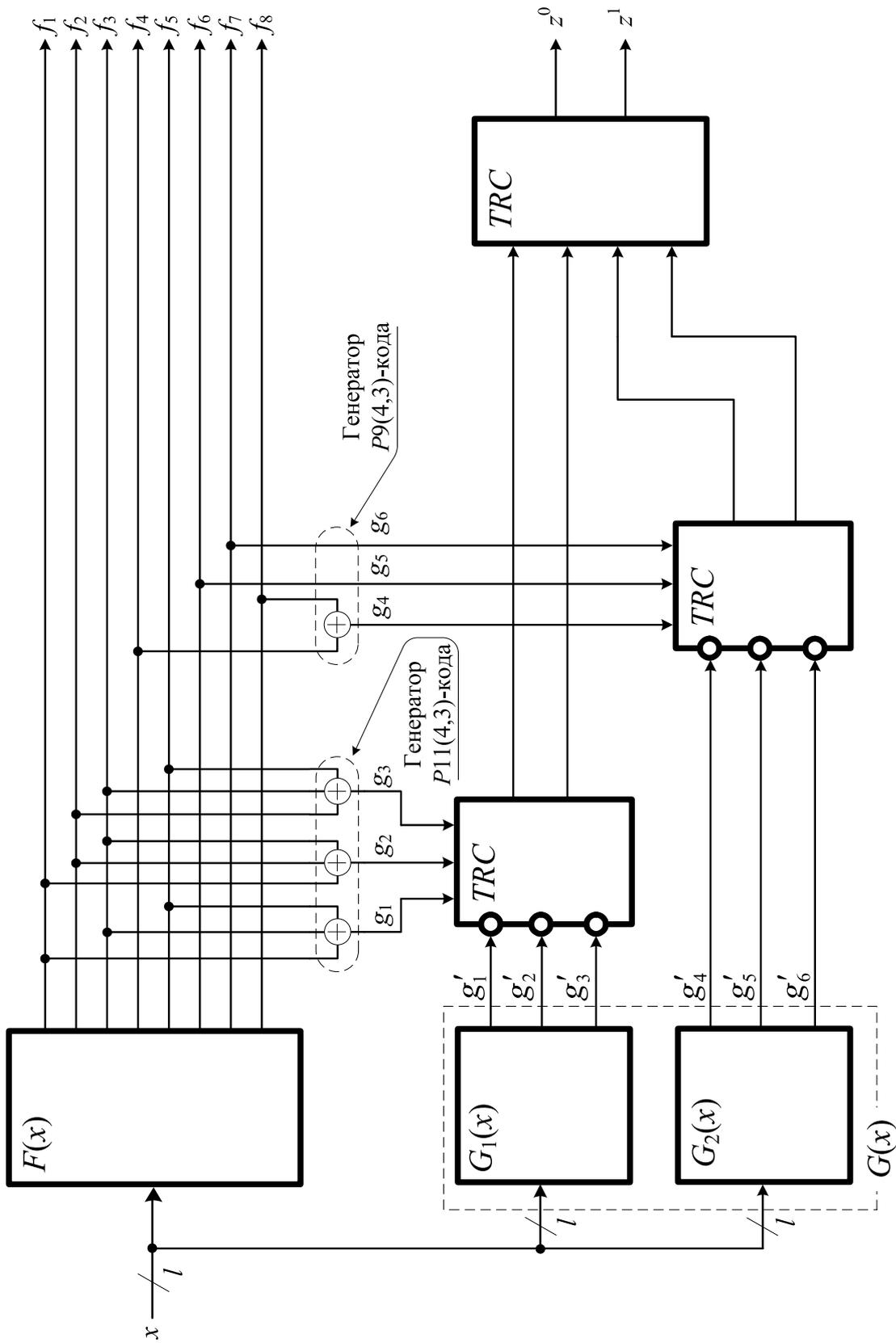


Рис. 6. Система функционального контроля с обнаружением всех одиночных неисправностей рассматриваемой дискретной схемы на основе группирования функционально зависимых выходов с проявлением определенного вида ошибок

группы, при этом максимально уменьшая значение k (см. таблицу 4). Для обеих групп подходят к использованию соответствующие SED - и AED -полиномы: $P11$ или $P13$ и $P9$.

Функции описаний генераторов кода при полиномах $P9$ и, например, $P11$, будут иметь следующий вид:

- для генератора с $P11$ – $g_1 = f_1 \oplus f_3 \oplus f_5$; $g_2 = f_1 \oplus f_2 \oplus f_3$; $g_3 = f_2 \oplus f_3 \oplus f_5$
- для генератора с $P9$ – $g_4 = f_4 \oplus f_8$; $g_5 = f_6$; $g_6 = f_7$.

В этом примере для удобства в последовательности наименований контрольные разряды, вырабатываемые генератором кода с $P9$, обозначены как $g_1 - g_4$, $g_2 - g_5$, $g_3 - g_6$. Следует заметить, что по количеству вычисляемых разрядов генераторы кода с $P9$ имеют низкие аппаратные затраты (используется малое количество логических вычислений) по сравнению с генератором кода на основе $P11$. В экспериментальных исследованиях [24] подтверждается такое заключение при разных значениях m .

В схеме сравнения TRC для данного примера будет использоваться «последовательное» сжатие парафазных сигналов.

Таким образом, система функционального контроля, построенная по методу выделения групп выходов с проявлением определенного вида ошибок для рассматриваемой комбинационной схемы, будет иметь вид, как на рис. 6.

Система функционального контроля, построенная по такому методу, будет обнаруживать любые одиночные неисправности исследуемой комбинационной схемы, а также блока дополнительной логики $G(x)$. Схемы тестеров являются самопроверяемыми. При сравнении полученной структуры СФК со структурой на основе метода дублирования видно, что при втором способе построения необходимо было бы использовать контрольную схему аналогичной контролируемой с восемью выходами против двух по три выхода в каждой, а также два компаратора с восемью парафазными входами против двух с шестью входами.

Заключение

В работе рассмотрены методы построения СФК на основе выделения специальных групп рабочих выходов логических комбинационных схем и их контроль с помощью полиномиальных кодов. Если построение СФК с полной идентификацией любых одиночных неисправностей не удастся с помощью простого подбора образующего полинома для построения кода в основе системы контроля, рекомендуется использовать рассмотренные в работе методы построения СФК. В этом случае хотелось бы выделить некоторые особенности использования таких методов построения на основе полиномиальных кодов: предложенный в литературе метод выделения $H2$ -групп выходов диагностируемых схем требует

использования большего числа контрольных групп по сравнению с методом выделения НЗ-групп выходов; наличие большего числа образующих полиномов, формирующих одинаковое число контрольных разрядов, способствует построению кодов с полной идентификацией ошибок разных видов, при этом с одинаковым значением k , что несущественно для большинства кодов; для реализации подгруппы схемы контроля на основе полиномиальных кодов для асимметрично независимых и асимметрично зависимых выходов требуется меньше аппаратных затрат, чем при контроле симметрично независимых и симметрично зависимых групп выходов. Учет этих особенностей позволяет строить СФК на основе полиномиальных кодов с правом выбора образующего полинома при заданном значении длины контрольного вектора, а также систем с уменьшенными аппаратными затратами.

Таким образом, использование полиномиальных кодов в основе СФК логических комбинационных схем позволяет строить системы диагностирования минимум тремя способами и производить отбор варианта системы с наименьшими аппаратными затратами при условии полной идентификации ошибок на выходах диагностируемых схем.

Библиографический список

1. E. Fujiwara. "Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications", John Wiley & Sons, 2006. – 720 p.
2. P. K. Lala. "Principles of Modern Digital Design". New-Jersey: John Wiley & Sons, 2007. – 436 p.
3. 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.
4. Z. Navabi. "Digital System Test and Testable Design: Using HDL Models and Architectures", Springer Science+Business Media, LLC 2011. – 435 p.
5. V. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov, D. Efanov, and A. Blyudov "Analysis of Error-Detection Possibilities of CED Circuits Based on Hamming and Berger Codes", Proceedings of 11th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013), Rostov-on-Don, Russia, September 27–30, 2013. – Pp. 200–207. DOI: 10.1109/EWDTS.2013.6673097.
6. J. M. Berger. "A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels", Information and Control, 1961. – Vol. 4. – Issue 1. – Pp. 68–73. DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
7. R. W. Hamming. "Error Detecting and Correcting Codes", Bell System Technical Journal. – 1950. – Vol. 29. – Issue 2. – Pp. 147–160.
8. F. Y. Busaba, and P. K. Lala. "Self-Checking Combinational Circuit Design for Single and Unidirectional Multibit Errors", Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. – 1994. – Vol. 5. – Issue 1. – Pp. 19–28. DOI: 10.1007/BF00971960.
9. A. Morozov, V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, and M. Goessel. "Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs", VLSI Design, 1998. – Vol. 5. – Issue 4. – Pp. 333–345. DOI: 10.1155/1998/20389.

10. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Классификация ошибок в информационных векторах систематических кодов // Известия вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58. – № 5. – С. 333–343. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-5-333-343.
11. W. W. Peterson. “Error Correcting Codes”, MT Press, Cambridge, L’ass, 1961.
12. D. Efanov, D. Plotnikov, V. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov, and R. Abdullaev. “Experimental Studies of Polynomial Codes in Concurrent Error Detection Systems of Combinational Logical Circuits”, Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS’2018), Kazan, Russia, September 14–17, 2018. – Pp. 184–190. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524684.
13. R. B. Abdullaev, D. V. Efanov, V. V. Sapozhnikov, and Vl. V. Sapozhnikov. “Polynomial Code with Detecting the Symmetric and Asymmetric Errors in the Data Vectors”, Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS’2019), Batumi, Georgia, September 13–16, 2019. – Pp. 157–161. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884451.
14. E. S. Sogomonyan, and M. Gössel. “Design of Self-Testing and On-Line Fault Detection Combinational Circuits with Weakly Independent Outputs”, Journal of Electronic Testing: Theory and Applications, 1993. – Vol. 4. – Issue 4. – Pp. 267–281. DOI: 10.1007/BF00971975.
15. Сапожников В. В. Коды Хэмминга в системах функционального контроля логических устройств: монография / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. – СПб.: Наука, 2018. – 151 с.
16. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 1: Классические коды Бергера и их модификации. – М.: Наука, 2020. – 383 с.
17. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 2: Взвешенные коды с суммированием. – М.: Наука, 2021. – 456 с.
18. Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Синтез самопроверяемых комбинационных устройств на основе выделения специальных групп выходов // Автоматика и телемеханика. – 2018. – № 9. – С. 79–94.
19. Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Модифицированные коды с суммированием взвешенных переходов в системах функционального контроля комбинационных схем // Труды Института системного программирования РАН. – 2017. – Т. 29. – № 5. – С. 39–60. DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(5)-3.
20. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды с суммированием с обнаружением любых симметричных ошибок // Электронное моделирование. – 2017. – Т. 39. – № 3. – С. 47–60.
21. Ефанов Д. В. Синтез самопроверяемых комбинационных устройств на основе кодов с эффективным обнаружением симметричных ошибок // Труды СПИИРАН. – 2018. – Т. 59. – № 4. – С. 62–91.
22. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. Organization of a Fully Self-Checking Structure of a Combinational Device Based on Searching for Groups of Symmetrically Independent Outputs // Automatic Control and Computer Sciences. – 2020. – Vol. 54. – Issue 4. – Pp. 279–290. – DOI: 10.3103/S0146411620040045.
23. Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D. Search Algorithm for Fully Tested Elements in Combinational Circuits, Controlled on the Basis of Berger Codes // Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS’2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. – Pp. 99–108. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110085.
24. Абдуллаев Р. Б. Полиномиальные коды с обнаружением любых симметричных и асимметричных ошибок в информационных векторах // Наука и техника транспорта. – 2020. – Вып. 1. – С. 80–92.

Abdullaev R. B.

Department of Automation and Remote Control,
Tashkent State Transport University, Tashkent

**SYNTHESIS OF FULLY SELF-CHECKED SCHEMES BUILT-IN
CONTROL BASED ON POLYNOMIAL CODES FOR COMBINATION
LOGIC DEVICES**

The article examines the methods of production of functional control systems for logic combinational circuits with full detection of any single faults using the error detection properties of polynomial codes. A classification of special generators of polynomials that form codes with a small value of the control vector length and complete identification of errors of a certain type or multiplicity is presented. A method is presented for constructing a functional control system with complete identification of single faults based on the complete detection of triple errors by polynomial codes. Algorithms for the search and formation of controllable H1-, H2- and H3-groups of circuit outputs, taking into account the properties of polynomial codes, have been developed. The types of functional dependence of the operating outputs for combinational circuits are listed, in which errors of various types can occur. Based on the detection of any symmetric and asymmetric errors by polynomial codes, a method is presented for the construction of functional control systems with full identification of these type of errors. For an approximate scheme, the development of a functional control system based on the proposed methods is given as:-

Working diagnostics, failure of logic circuits, the multiplicity of the error, type of error, polynomial codes, classification of generators of polynomials

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-3-452-476

References

1. *Fujiwara E.* (2006) Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. New-Jersey: John Wiley & Sons, 720 p.
2. *Lala P. K.* (2007) Principles of Modern Digital Design. New-Jersey: John Wiley & Sons, 436 p.
3. *Ubar R., Raik J., Vierhaus H.-T.* (2011) Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source). Information Science Reference, Hershey. New York, IGI Global, 578 p.
4. *Navabi Z.* (2011) Digital System Test and Testable Design: Using HDL Models and Architectures. Springer Science+Business Media, LLC, 435 p.
5. *Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D., Blyudov A.* (2013) Analysis of Error-Detection Possibilities of CED Circuits Based on Hamming and Berger Codes. *Proceedings of 11th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2013)*, Rostov-on-Don, Russia, September 27–30, pp. 200–207. DOI: 10.1109/EWDTS.2013.6673097.
6. *Berger J. M.* (1961) A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels, *Information and Control*, vol. 4., iss. 1, pp. 68–73. DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
7. *Hamming R. W.* (1950) Error Detecting and Correcting Codes. *Bell System Technical Journal*, vol. 29, iss. 2, pp. 147–160.
8. *Busaba F. Y., Lala P. K.* (1994) Self-Checking Combinational Circuit Design for Single and Unidirectional Multibit Errors. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, vol. 5, iss. 1, pp. 19–28. DOI: 10.1007/BF00971960.

9. Morozov A., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Goessel M. (1998) Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs. *VLSI Design*, vol. 5, iss. 4, pp. 333–345. DOI: 10.1155/1998/20389.
10. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2015) Klassifikatsiya oshibok v informatsionnykh vektorakh sistematicheskikh kodov [Classification of errors in information vectors of systematic codes]. *Izvestiya vuzov. Priborostroyeniye [News of Higher Educational Institutions. Instrumentation]*, vol. 58, no. 5, pp. 333–343. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-5-333-343. (In Russian)
11. Peterson W. W. (1961) Error Correcting Codes. MT Press, Cambridge, L'ass.
12. Efanov D., Plotnikov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Abdullaev R. (2018) Experimental Studies of Polynomial Codes in Concurrent Error Detection Systems of Combinational Logical Circuits. *Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018)*, Kazan, Russia, September 14–17, pp. 184–190. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524684.
13. Abdullaev R. B., Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. (2019) Polynomial Code with Detecting the Symmetric and Asymmetric Errors in the Data Vectors. *Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019)*, Batumi, Georgia, September 13–16, pp. 157–161. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884451.
14. Sogomonyan E. S., Goessel M. (1993) Design of Self-Testing and On-Line Fault Detection Combinational Circuits with Weakly Independent Outputs. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, vol. 4, iss. 4, pp. 267–281. DOI: 10.1007/BF00971975.
15. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2018) Kody Khemminga v sistemakh funktsional'nogo kontrolya logicheskikh ustroystv [Hamming codes in functional control systems of logical devices]. Saint Petersburg, Nauka Publ., 151 p. (In Russian)
16. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2020) Kody s summirovaniyem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. Tom 1: Klassicheskiye kody Bergera i ikh modifikatsii [Summed codes for technical diagnostic systems. Vol. 1: Classic Berger codes and their modifications]. Moscow, Nauka Publ., 383 p. (In Russian)
17. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2021) Kody s summirovaniyem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. Tom 2: Vzveshennyye kody s summirovaniyem [Summed codes for technical diagnostic systems. Vol. 2: Weighted codes with summation]. Moscow, Nauka Publ., 455 p. (In Russian)
18. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. (2018) Sintez samoproveryayemykh kombinatsionnykh ustroystv na osnove vydeleniya spetsial'nykh grupp vykhodov [Synthesis of self-checking combinational devices based on the allocation of special groups of outputs]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and Remote Control]*, no. 9, pp. 79–94. (In Russian)
19. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. (2017) Modifitsirovannyye kody s summirovaniyem vzveshennykh perekhodov v sistemakh funktsional'nogo kontrolya kombinatsionnykh skhem [Modified codes with summation of weighted transitions in functional control systems of combinational circuits]. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN [Proceedings of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences]*, vol. 29, no. 3, pp. 39–60. DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(5)-3. (In Russian)
20. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2017) Kody s summirovaniyem s obnaruzheniyem lyubykh simmetrichnykh oshibok [Summed codes with any symmetric error detection]. *Elektronnoye modelirovaniye [Electronic modeling]*, vol. 39, no. 3, pp. 47–60. (In Russian)
21. Efanov D. V. (2018) Sintez samoproveryayemykh kombinatsionnykh ustroystv na osnove kodov s effektivnym obnaruzheniyem simmetrichnykh oshibok [The synthesis of self-checking com-

- binational devices on the basis of codes with the effective symmetrical error detection]. *Trudy SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]*, vol. 59, no. 4, pp. 62–91. (In Russian)
22. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. (2020) Organization of a Fully Self-Checking Structure of a Combinational Device Based on Searching for Groups of Symmetrically Independent Outputs. *Automatic Control and Computer Sciences*, vol. 54, iss. 4, pp. 279–290. DOI: 10.3103/S0146411620040045.
 23. Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D. (2017) Search Algorithm for Fully Tested Elements in Combinational Circuits, Controlled on the Basis of Berger Codes. *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2. Pp. 99–108. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110085.
 24. Abdullaev R. B. (2020) Polinomial'nyye kody s obnaruzheniyem lyubyx simmetrichnykh i asimmetrichnykh oshibok v informatsionnykh vektorakh [Polynomial codes with detection of any symmetric and asymmetric errors in information vectors]. *Nauka i tekhnika transporta [Science and Technology in Transport]*, iss.1, pp. 80–92. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии,
доцентом Д. В. Ефановым
Поступила в редакцию 18.02.2021, принята к публикации 11.03.2021*

АБДУЛЛАЕВ Руслан Борисович – ассистент кафедры «Автоматика и телемеханика» Ташкентского государственного транспортного университета
ruslan_0507@mail.ru

© Абдуллаев Р. Б., 2021

УДК 004.052.42+681.518.5

А. В. Пашуков

*Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»,
Российский университет транспорта, Москва*

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБНАРУЖЕНИЯ ОШИБОК НА ВЫХОДАХ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ПРИ ФУНКЦИОНАЛЬНОМ КОНТРОЛЕ НА ОСНОВЕ МОДУЛЬНЫХ КОДОВ С СУММИРОВАНИЕМ

В статье приведены примеры использования программируемых логических интегральных схем в различных отраслях промышленности. Описываются возможные неисправности в блоках ПЛИС и их отличие от неисправностей в программируемых логических матрицах. Особое внимание уделяется отказам элемента LUT. Описываются особенности организации систем технического диагностирования, функционирующих в рабочем режиме объектов диагностирования, для комбинационных логических устройств, реализованных на основе программируемых логических интегральных схем. На примере модульных кодов с суммированием показано, что известные подходы к организации таких систем для устройств, реализованных на вентиляционной основе, напрямую могут применяться и для устройств рассматриваемого типа. Поскольку фиксируются проявления неисправностей в виде ошибок, а не сами неисправности, подходы к организации систем диагностирования универсальны. Также приведена сравнительная характеристика модульных кодов с суммированием в зависимости от модуля кода. Предложен код, который будет обнаруживать в исследуемом примере все неисправности.

Программируемая логическая интегральная схема, комбинационное логическое устройство, контроль неисправностей, виды неисправностей, ошибки на выходах схемы, классические и модульные коды с суммированием, система технического диагностирования

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-3-477-495

Введение

Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) начинают развиваться с момента появления первой микросхемы, реализующей булеву функцию. Затем появляются логические вентили, программируемые матрицы, полужаказные и заказные интегральные схемы и т. д.

В отличие от своих предшественниц, программируемых логических матриц (ПЛМ), ПЛИС нашли применение в различных отраслях промышленности. С их помощью производят цифровую обработку данных в космических системах (ARIAN-5, Space-Shuttle) [1]. Специально для этой задачи были разработаны микросхемы устойчивые к воздействию радиации. В атомной энергетике их используют для фильтрации входных сигналов, выполнения логических функций, в системах аварийной защиты [2, 3].

Гибкость и высокая скорость обработки данных ПЛИС позволяет активно применять их в системах цифровой радиосвязи и в различных системах военной отрасли: управления радарными, танком ABRAMS, запуском и наведением ракет PATRIOT, TOMAHAWK, STINGER [1, 4].

ПЛИС получили широкое распространение на железнодорожном транспорте. В [5] рассмотрены методы синтеза логических устройств электрической централизации на базе этих устройств, описан пример проектирования электронного реле с задержкой выключения. Для задержки времени применяется схема счетчика, схема контроля и управления триггера.

В [6] описана архитектура безопасных устройств на железнодорожных переездах Чехии, где для обеспечения безопасности предложено применять систему с тройной модульной избыточностью и дублированием в каждом модуле.

ПЛИС входят в состав объектных контроллеров микропроцессорной централизации «Движение», аппаратуру тональных рельсовых цепей разработки «КОМАГ-Б» [1].

При создании устройств управления на основе ПЛИС соблюдаются широко известные принципы обеспечения безопасности, в т. ч. методы аппаратной и программной избыточности [7–13].

Одна из главных сложностей при работе с устройствами программируемой логики заключается в том, что нужно не только решить задачу синтеза безопасного устройства с заданным алгоритмом функционирования, но и обеспечить отказоустойчивость устройства, простоту процедур тестового и рабочего (функционального) диагностирования, верификацию реализуемых алгоритмов.

Основная цель статьи — показать, что для построения цифровых устройств с обнаружением неисправностей и ошибок в вычислениях могут применяться известные методы синтеза схем встроенного контроля на основе кодов с суммированием [14, 15],

1. Программируемые логические интегральные схемы и неисправности в них

Программируемые логические интегральные схемы — это электронный компонент (интегральная микросхема) для создания конфигурируемых настраиваемых цифровых электронных схем. В отличие от обычных цифровых микросхем, логика работы ПЛИС не определяется при изготовлении, а задается посредством программирования [16].

В простом варианте ПЛИС состоят из множества однотипных блоков (рис. 1), состояние которых отражается в таблицах LUT (Lookup Table). LUT размещаются в небольшом программируемом фрагменте памяти, куда записывается логическая функция блока. Чаще всего встречаются элементы LUT, позволяющие реализовать с помощью одного блока одну функцию четырех переменных. Однако встречаются LUT, которые имеют 5, 6, 7 и даже 8 выходов.

Применение ПЛИС обусловлено рядом преимуществ, среди которых можно выделить высокую производительность, быструю разработку проектов, простоту отладки и возможность параллельной работы над несколькими задачами.

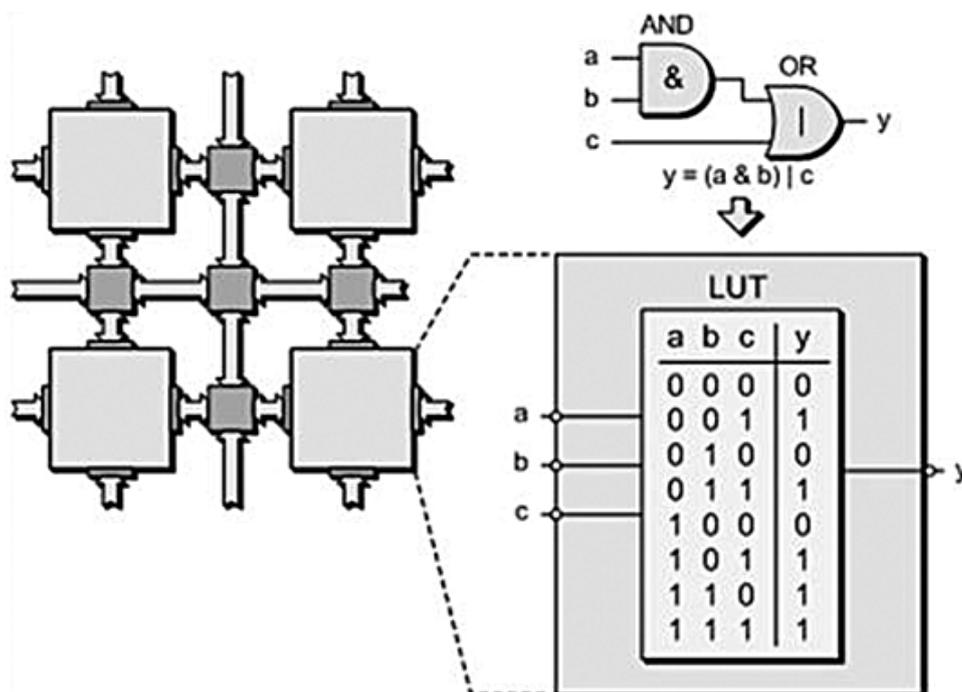


Рис. 1. Структурная схема ПЛИС с элементом LUT с тремя входами

Среди немалого числа компаний, выпускающих ПЛИС, выделяются Actel, Altera, Atmel, Lattice semiconductor, Xilinx.

В [17] рассмотрены неисправности «предшественников» ПЛИС – ПЛМ. При работе ПЛИС могут возникнуть следующие множества неисправностей [18]:

- отказы элементов LUT;
- неисправности входов схемы;
- неисправности межблочных соединений;
- отказы ячеек памяти.

Здесь пойдет речь только об отказах элементов LUT и неисправностях на входах всей микросхемы.

Неисправности в межблочных соединениях не рассматриваются: можно считать, что при их обрыве или коротком замыкании на вход блока поступает либо константа 0, либо константа 1. Что касается отказов ячеек памяти, задача диагностики *логики* ПЛИС представляется более сложной по сравнению с задачей диагностики *памяти*. К тому же в некоторых случаях отказы ячеек памяти можно рассматривать как однократные константные отказы на входе логических элементов: если ячейка памяти вышла из строя, она генерирует на выходе какое-либо постоянное значение (0 или 1).

Но сначала следует рассмотреть работу элемента LUT с различным числом входов и описать неисправности, способные возникать в этом процессе.

На рис. 2 изображен стандартный элемент LUT на четыре входные переменные. Структура его представляет собой дерево передающих транзисторов и яче-

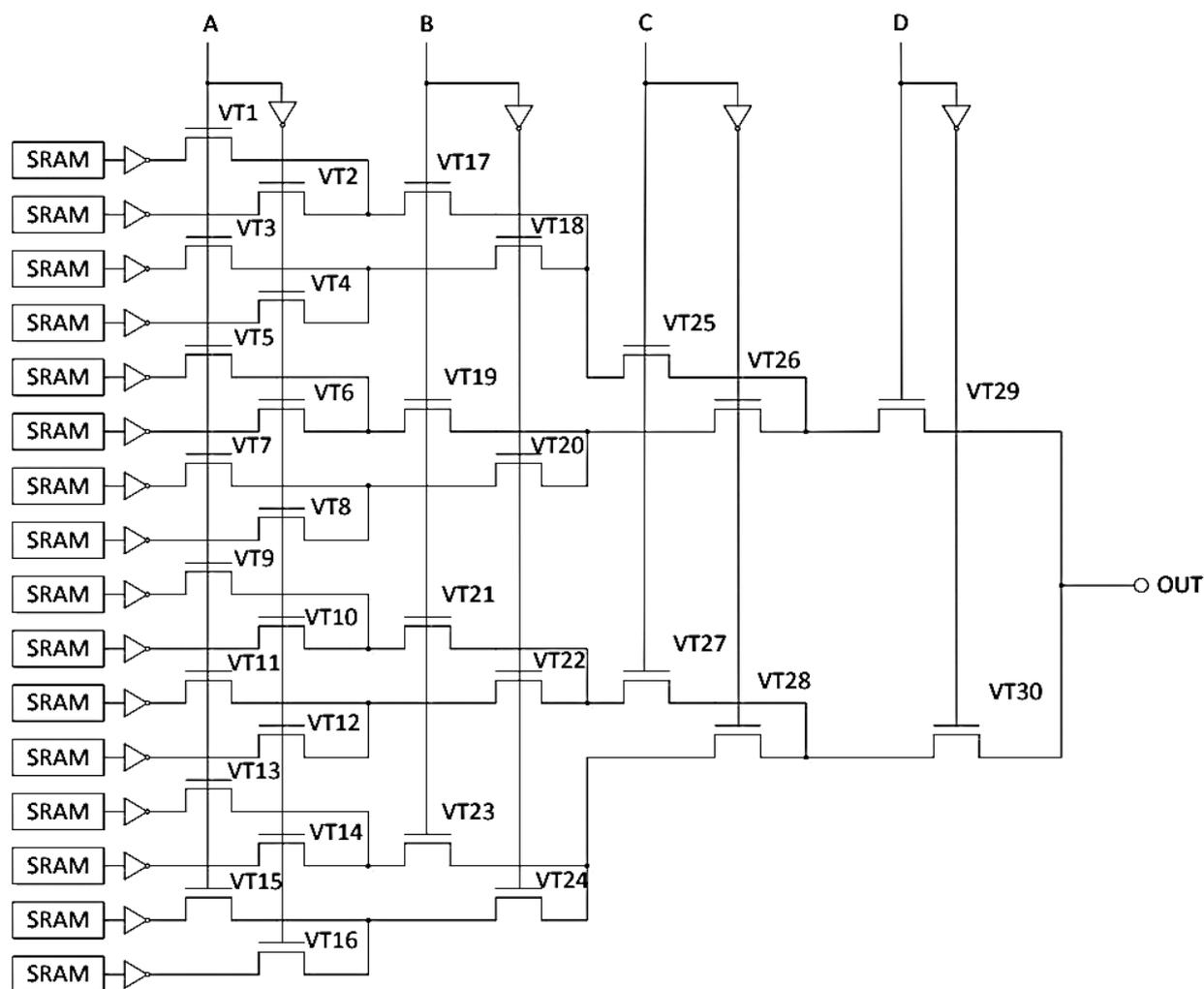


Рис. 2. Транзисторная схема LUT с четырьмя входами (мультиплексор 16-1)

ек конфигурационной памяти (static random access memory), в которые записывается таблица истинности требуемой логической функции. Число ячеек напрямую зависит от количества входов в элемент LUT и высчитывается по формуле 2^n , где n – количество входов.

С помощью конфигурируемой матрицы соединений коммутируются как входные переменные A , B , C , D , так и выход OUT . При вычислении логической функции для установленного на входах набора в дереве передающих транзисторов активируется одна из 2^4 цепочек. С соответствующей этому набору ячейки конфигурационной памяти значение функции через выходной инвертор устанавливается на выходе элемента OUT [19].

При использовании элементов LUT возможны три варианта реализации схем.

1. Количество входов элемента LUT соответствует количеству переменных (в нашем случае четыре).

2. Тогда все 16 ячеек памяти будут запрограммированы под соответствующее значение таблицы истинности и при подаче сигналов на выходы *A, B, C, D* будет коммутирована цепь.

3. Количество входов LUT больше количества переменных. (четыре входа LUT и пять переменных *A, B, C, D, E*).

В этом случае две четырехвходные LUT используют совместно один и тот же набор из четырех менее значимых переменных (*A, B, C, D*). Выходной сигнал любого из этих LUT направлен на выход Out с использованием дополнительных транзисторов (мультиплексора 2–1), которые будут соответствовать пятой переменной *E* (рис. 3).

Для реализации функций шести переменных понадобится четыре элемента LUT, и т. д. В общем виде количество элементов LUT можно найти по формуле $N = 2^{n-3}$, где n – количество переменных. Формула справедлива для значения $n \geq 5$.

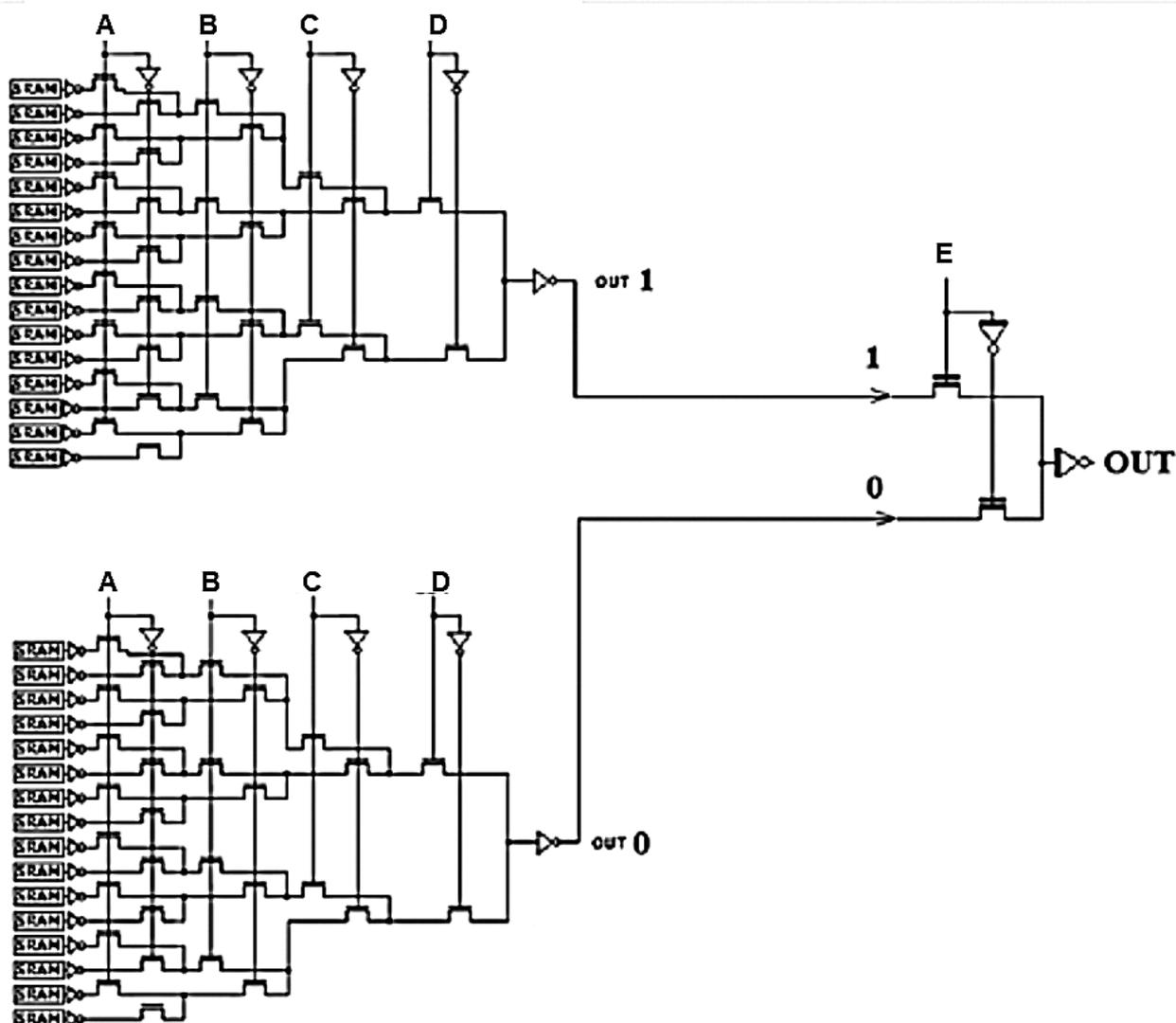


Рис. 3. Реализация функции с пятью переменными на двух LUT с четырьмя входами

4. Количество входов LUT меньше количества переменных (четыре входа LUT и три переменных A, B, C).

В этом случае три входные переменные управляют тремя входами LUT, в то время как его четвертый вход понижен. Затем восемь ячеек памяти конфигурируются для хранения выходных значений, а остальные восемь принимают нулевые значения.

Перейдем к самим неисправностям. В ходе работы элемента LUT могут возникнуть следующие виды неисправностей:

- короткое замыкание одного из входов элемента (константа 1);
- обрыв одного из входов элемента (константа 0);
- замыкание соседних входов;
- обрыв транзистора;
- короткое замыкание транзистора;
- неисправность инверторов на входах схемы или на выходе ячеек памяти.

Рассмотрим особенности построения устройств на ПЛИС, снабженных дополнительными схемами контроля для возможности идентификации представленного выше множества неисправностей.

2. Синтез схем контроля для устройств, реализованных на программируемых логических интегральных схемах

При проектировании устройств автоматики и вычислительной техники выбираются способы их диагностирования для обеспечения заданного уровня безопасности. Широко применяются принципы тестирования и тестопригодного проектирования [20], а также принципы синтеза устройств, способных обнаруживать неисправности при выполнении своих функций [21]. При создании таких устройств используются, как правило, схемы встроенного контроля с применением методов избыточного кодирования [22, 23]. При этом широкое распространение получили классические и модульные (остаточные) коды с суммированием [24]. Свойства данного класса кодов подробно изучены в [25, 26]. Рассматривая особенности обнаружения неисправностей в комбинационных устройствах, остановимся на применении модульных кодов с суммированием.

В модульном коде выделяется информационный и контрольный векторы с длинами m и k соответственно. В разряды контрольного вектора записывается двоичное число, равное сумме числа единиц в информационном векторе в кольце вычетов по выбранному модулю $M \in \{2, 3, \dots, m+1\}$ (при $M=m+1$ строится классический код с суммированием, или код Бергера [27]).

Будем обозначать коды с суммированием как SM-коды («S» – sum code, M – значение модуля). Значение модуля не только определяет свойства кода, но и характеризует число разрядов в контрольных векторах. Оно вычисляется как $k = \lceil \log_2 M \rceil$, где $\lceil \dots \rceil$ обозначает целое число сверху от вычисляемого значения.

В [28] показано, что свойства обнаружения ошибок SM-кодами напрямую лежат в основах методик их применения при реализации схем контроля. В этом случае учитываются возможности кодов в обнаружении ошибок различных видов (монотонных, симметричных и асимметричных) и с различными кратностями [29]. Например, классические коды Бергера обнаруживают любые монотонные и асимметричные ошибки, а модульные коды – любые монотонные ошибки с кратностями $d < M$ и асимметричные с кратностями $d < M+2$ [30]. Эти особенности SM-кодов определили их широкое распространение при реализации встраиваемых схем контроля.

Пусть дано комбинационное устройство, синтезированное на ПЛИС. Функции схемы, вычисляемые устройством, образуют следующую систему:

$$\begin{cases} f_1 = AB + \overline{BC} + \overline{BCD}; \\ f_2 = A\overline{B} + \overline{BC} + \overline{AC}; \\ f_3 = A\overline{BD} + \overline{ADE} + \overline{ABDE}; \\ f_4 = AB + \overline{BC} + \overline{BCD} + E. \end{cases}$$

Схема, синтезированная на ПЛИС семейства MAX II типа EPM240T100C4, приведена на рис. 4, а ее параметры – в таблице 1.

Выше отмечалось, что каждый блок содержит в себе один элемент LUT. Для реализации функций f_1 и f_2 , имеющих в своем составе три и четыре переменные соответственно, требуется по одному блоку. Для реализации функции f_3 , состоящей из четырех переменных, требуется два блока. Для реализации функции f_4 требуется один блок (т. к. первые три составляющие образуют функцию f_1). Для упрощения задачи допустим, что для выполнения функции f_1 используется блок «А», для функции f_2 – блок «Б», для функции f_3 – блоки «В» и «Г» и для функции f_4 – блок «Д».

Система технического диагностирования реализуется на основе структурной схемы, представленной на рис. 5 [31].

Структурная схема содержит в себе исходное устройство $F(x)$ и схему контроля, состоящую из блоков $G(f)$, $G(x)$ и самопроверяемого тестера (TRC).

Таблица 1. Параметры синтезированной схемы

Параметр	Значение
Семейство	MAX II
Тип микросхемы	EPM240T100C4
Количество логических ячеек (используется/всего)	5/240
Количество входов (используется/всего)	9/80

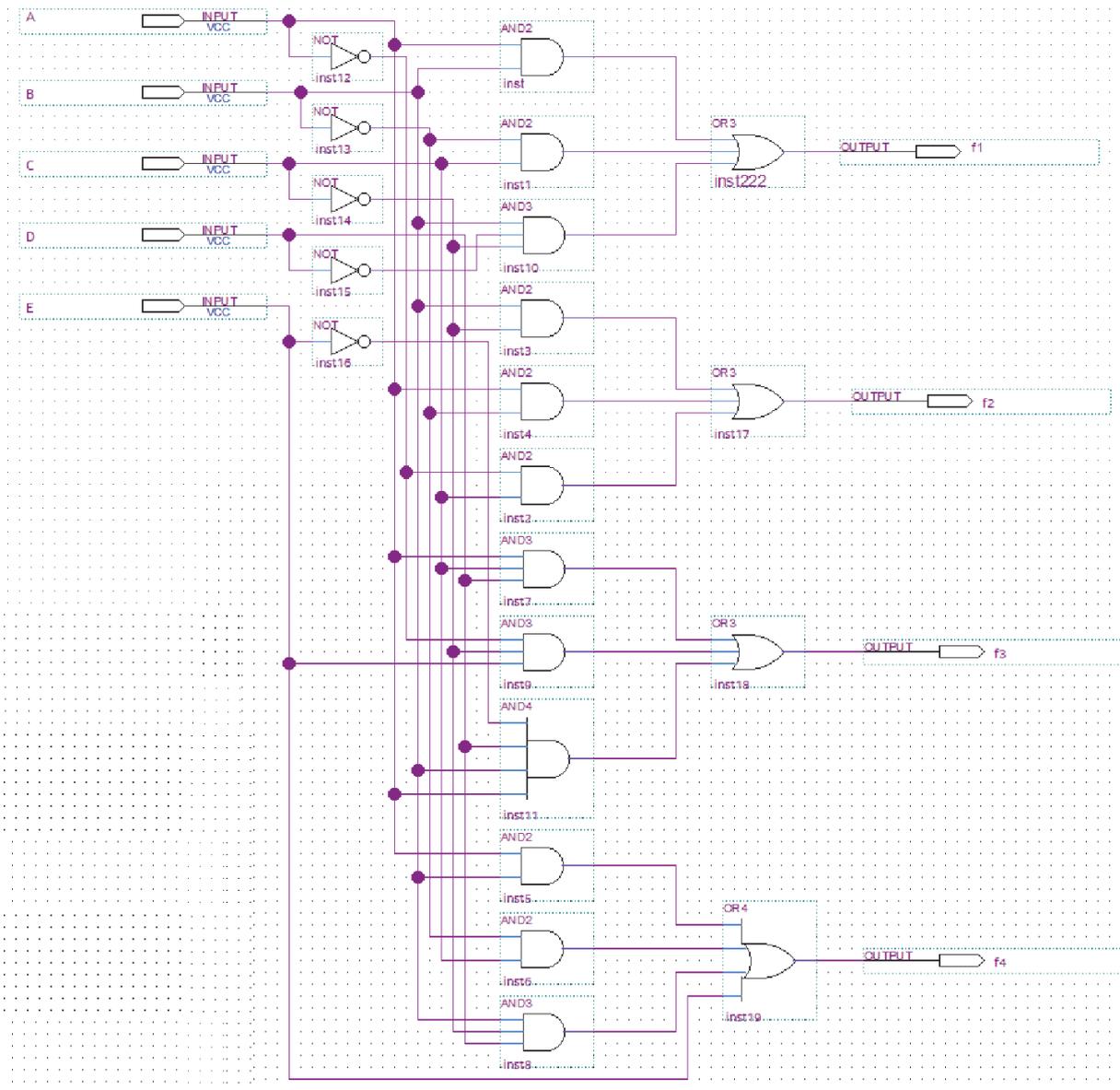


Рис. 4. Комбинационное устройство и его характеристики

Блоки $G(f)$ и $G(x)$ являются преобразователями, но в блоке $G(f)$ преобразуются информационные векторы в контрольные, а в блоке $G(x)$ выходным векторам сопоставляются контрольные векторы. Сигналы с блоков $G(f)$ и $G(x)$ поступают на блок TRC , где происходит их сравнение.

Блок TRC , как правило, реализуется в виде схемы сжатия на основе элементарных модулей сжатия парафазных сигналов. Поэтому выходы одного из блоков ($G(f)$ или $G(x)$) инвертируются. Альтернативой такому подходу будет предварительное инвертирование значений контрольных разрядов, вычисляемых блоком $G(x)$ либо $G(f)$, на этапе синтеза соответствующих компонентов схемы контроля.

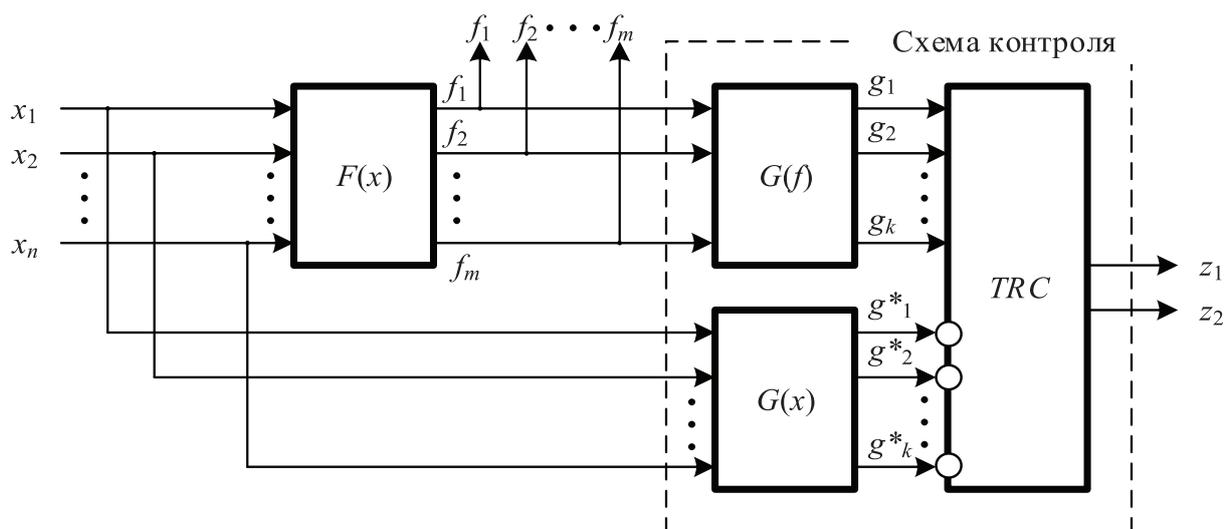


Рис. 5. Структурная схема системы диагностирования комбинационного устройства

Для повышения показателей безопасности блоки $G(f)$, $G(x)$ и TRC синтезируются на разных кристаллах (ПЛИС). Число $m=4$ (модуль) может быть выбрано из множества $M \in \{2; 3; 4; 5\}$.

В [32] описана процедура получения значений контрольных функций для заданной схемы, выпишем здесь формулы контрольных функций для различных модульных кодов.

Для $S2$ -кода имеем:

$$g = C\bar{D}\bar{E} \vee \bar{A}BD \vee \bar{A}C\bar{E} \vee \bar{B}CD \vee \bar{B}C\bar{E} \vee \bar{A}B\bar{C} \vee \bar{B}C\bar{D}E \vee \bar{A}B\bar{C}E \vee \bar{A}B\bar{D}\bar{E} \vee \bar{B}CDE;$$

$$g^* = f_2\bar{f}_3\bar{f}_4 \vee f_1f_2\bar{f}_3 \vee \bar{f}_1f_2f_3f_4 \vee f_1\bar{f}_2\bar{f}_3.$$

Для $S3$ -кода:

$$g_1 = ABCD \vee \bar{B}C\bar{D}\bar{E} \vee \bar{A}B\bar{C}\bar{D}\bar{E} \vee \bar{A}B\bar{C}D\bar{E} \vee \bar{A}B\bar{C}D\bar{E};$$

$$g_2 = \bar{A}BCD \vee \bar{A}B\bar{D}\bar{E} \vee \bar{B}CDE \vee \bar{A}B\bar{C}\bar{E} \vee \bar{A}C\bar{D}\bar{E} \vee \bar{A}B\bar{C}D\bar{E};$$

$$g_1^* = f_1\bar{f}_2\bar{f}_3 \vee f_3\bar{f}_4 \vee \bar{f}_1f_2f_3 \vee \bar{f}_1\bar{f}_2\bar{f}_3f_4;$$

$$g_2^* = f_2\bar{f}_3\bar{f}_4 \vee \bar{f}_2\bar{f}_3f_4 \vee \bar{f}_1\bar{f}_2\bar{f}_3f_4.$$

Для $S4$ -кода:

$$g_1 = BE \vee ACD \vee ABD \vee C\bar{D}\bar{E} \vee \bar{A}B\bar{C}\bar{E} \vee ADE \vee \bar{A}B\bar{C}D \vee \bar{A}B\bar{C}D \vee \bar{B}CDE;$$

$$g_2 = \bar{A}B\bar{C} \vee \bar{A}BD \vee \bar{B}CD \vee \bar{B}C\bar{E} \vee \bar{A}C\bar{E} \vee C\bar{D}\bar{E} \vee \bar{A}B\bar{D}\bar{E} \vee \bar{B}C\bar{D} \vee \bar{A}B\bar{D}\bar{E} \vee \bar{A}CDE;$$

$$g_1^* = \overline{f_1} \overline{f_3} \vee \overline{f_1} \overline{f_2} \vee \overline{f_1} \overline{f_3} \vee \overline{f_1} \overline{f_2} \overline{f_4};$$

$$g_2^* = \overline{f_2} \overline{f_3} \overline{f_4} \vee \overline{f_1} \overline{f_2} \overline{f_3} \vee \overline{f_1} \overline{f_2} \overline{f_3} \vee \overline{f_1} \overline{f_2} \overline{f_3} \overline{f_4} \vee \overline{f_1} \overline{f_2} \overline{f_3} \overline{f_4}.$$

3. Показатели обнаружения ошибок

В ходе исследования влияния всех одиночных неисправностей на выходы заданной схемы были получены следующие характеристики систем технического диагностирования (табл. 2).

Таблица 2. Характеристики обнаружения ошибок в заданной схеме при контроле на основе модульных кодов с суммированием

Вид неисправности	Количество ошибок	Контроль ошибок на основе S2-кода		Контроль ошибок на основе S3-кода		Контроль ошибок на основе S4-кода	
		обнаруживаемые	необнаруживаемые	обнаруживаемые	необнаруживаемые	обнаруживаемые	необнаруживаемые
В блоке А							
Из них:	433	433	0	433	0	433	0
короткое замыкание на входе	34	34	0	34	0	34	0
обрыв входов	32	32	0	32	0	32	0
замыкание входов между собой	195	195	0	195	0	195	0
короткое замыкание транзисторов	56	56	0	56	0	56	0
обрыв транзисторов	60	60	0	60	0	60	0
неисправность инверторов	56	56	0	56	0	56	0
В блоке Б							
Из них:	472	472	0	472	0	472	0
короткое замыкание на входе	34	34	0	34	0	34	0
обрыв входов	38	38	0	38	0	38	0
замыкание входов между собой	252	252	0	252	0	252	0
короткое замыкание транзисторов	44	44	0	44	0	44	0
обрыв транзисторов	60	60	0	60	0	60	0
неисправность инверторов	44	44	0	44	0	44	0
В блоке В							
Из них:	259	259	0	259	0	259	0

Окончание табл. 2

Вид неисправности	Количество ошибок	Контроль ошибок на основе S2-кода		Контроль ошибок на основе S3-кода		Контроль ошибок на основе S4-кода	
		обнаруживаемые	необнаруживаемые	обнаруживаемые	необнаруживаемые	обнаруживаемые	необнаруживаемые
короткое замыкание на входе	10	10	0	10	0	10	0
обрыв входов	24	24	0	24	0	24	0
замыкание входов между собой	109	109	0	109	0	109	0
короткое замыкание транзисторов	28	28	0	28	0	28	0
обрыв транзисторов	60	60	0	60	0	60	0
неисправность инверторов	28	28	0	28	0	28	0
В блоке Г							
Из них:	278	278	0	278	0	278	0
короткое замыкание на входе	34	34	0	34	0	34	0
обрыв входов	14	14	0	14	0	14	0
замыкание входов между собой	114	114	0	114	0	114	0
короткое замыкание транзисторов	28	28	0	28	0	28	0
обрыв транзисторов	60	60	0	60	0	60	0
неисправность инверторов	28	28	0	28	0	28	0
В блоке Д							
Из них:	306	306	0	306	0	306	0
короткое замыкание на входе	30	30	0	30	0	30	0
обрыв входов	28	28	0	28	0	28	0
замыкание входов между собой	104	104	0	104	0	104	0
короткое замыкание транзисторов	42	42	0	42	0	42	0
обрыв транзисторов	60	60	0	60	0	60	0
неисправность инверторов	42	42	0	42	0	42	0
На входах ПЛИС							
Из них:	552	382	170	479	73	543	9
короткое замыкание на входе	66	47	19	58	8	66	0
обрыв входов	64	45	19	56	8	64	0
замыкание входов между собой	422	290	132	365	57	413	9
Всего	1994	1824	170	1921	73	1985	9

Из таблицы 2 видно, что при неисправности входных линий количество обнаруживаемых ошибок невелико. Дело в том, что при неисправностях в отдельных блоках возникают ошибки первой кратности, которые обнаруживаются любым кодом, поскольку входные линии влияют сразу на несколько функций, то кратность ошибки увеличивается.

Также видно, что любой из рассмотренных кодов обнаруживает все ошибки, связанные с неисправностями блоков А, Б, В, Г, Д. Однако при возникновении неисправностей на входах микросхемы появляются необнаруживаемые ошибки. При анализе заметно, что с увеличением модуля кода их количество постепенно сокращается, но даже наилучший для рассматриваемого примера код S4 не может обнаружить все ошибки.

Изучив более подробно наборы, где ошибка не обнаруживается, можно прийти к выводу, что с большей вероятностью не обнаруживаются те неисправности, которые влияют сразу на несколько выходных функций, что приводит к симметричным ошибкам (содержащим группы разнонаправленных искажений $0 \rightarrow 1$ и $1 \rightarrow 0$), которые не могут быть идентифицированы модульными кодами с суммированием.

Чтобы обнаружить такие ошибки модульными кодами, нужен код, который будет производить сравнение групп выходов. Он может быть построен при использовании функции сложения по модулю два разрядов, занимающих соседние позиции в информационном векторе [15, 33]: $g_1 = f_1 \oplus f_2$, $g_2 = f_2 \oplus f_3$, $g_3 = f_3 \oplus f_4$, $g_4 = f_1 \oplus f_4$.

Следует также отметить еще одну особенность схем, реализованных в базисе ПЛИС. В них иногда возникают неисправности, связанные с пробоем или обрывом транзисторов, которые могут не проявлять себя на выходах. Они не изменяют значения векторов, реализуемых на выходах рассматриваемого комбинационного устройства (см. рис. 2). Поскольку эти неисправности не влияют на работу схемы, их невозможно обнаружить. Такой тип неисправности не присущ схемам, построенным на логических вентилях. В этом случае реализуется неисправность «подмены функции», при этом для контроля необходимо дополнительно осуществлять тестовое диагностирование схем [34].

В сравнении с ПЛМ [17] вероятность обнаружения ошибки на ПЛИС в разы больше. Связано это с тем, что большинство возможных неисправностей возникает в отдельном блоке и приводит к искажению только одной выходной функции, в то время как некоторые неисправности в ПЛМ влияют на несколько выходных функций.

Заключение

В настоящее время устройства, реализованные на ПЛИС, получили широкое распространение в технической сфере, поскольку они просты в использовании, отличаются пониженным энергопотреблением и малыми габаритами.

Несмотря на то, что неисправности в этих устройствах гораздо разнообразнее, чем в устройствах на вентильной основе, задачу их технического диагностирования можно решить с помощью известных методов.

В статье проведен сравнительный анализ нескольких кодов с суммированием. Ни один из них не гарантирует обнаружения всех ошибок, поэтому предложен «улучшенный» модульный код. Особенности его реализации (сложение по модулю два соседних разрядов информационных векторов) гарантируют обнаружение всех ошибок.

Применение модульных кодов не приводит к резкому увеличению информационной избыточности, что позволяет эффективно применять их не только для устройств, реализованных на ПЛИС, но и для любых типов устройств с элементами программируемой логики в основе. Перспективным направлением дальнейших научных исследований является использование кодов с суммированием неравнозначных разрядов.

Проведенное исследование показало, что в схемах, реализованных на ПЛИС, возникает особый вид неисправностей, которые никак не влияют на выходные значения. Такие неисправности нельзя обнаружить с помощью кодов. Наилучший эффект дает совместное применение помехоустойчивых кодов с тестовым диагностированием.

Библиографический список

1. Малиновский М. Л., Аленин Д. А., Барсов В. И., Коноваленко Н. В. Перспективы использования FPGA-технологий в системах железнодорожной автоматики // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. – Харьков, 2012. – Вип. 130 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – С. 79–81.
2. Zaikin A. A., Zhemov V. S., Miroshnik Y. M., Pronyakin A. V., Sokolov I. V. New control systems for emergency protection of power reactors // Ядерные измерительно-информационные технологии. – 2005. – № 3 – С. 30–55.
3. Кудрявцев А. В., Карцев К. П., Сергеев И. А., Федоров В. А., Якушев А. Г. Проект цифровой управляющей системы безопасности для энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР. – Москва: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2012. – 144 с.
4. Желтов П. В. Применение FPGA в системах цифровой радиосвязи. Введение. – РГРТУ. – 6 с.
5. Кабецкий А. Г., Марков Д. С. Методы и инструментальные средства построения логических устройств электрической централизации на базе программируемых логических интегральных схем // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – № 2. – С. 168–173.
6. Dobiáš R., Kubátová H. FPGA Based Design of Railway's Interlocking Equipment // Proceedings of EUROMICRO Symposium on Digital System Design. – 2004. – Pp. 467–473.
7. Бестемьянов П. Ф. Методы обеспечения безопасности аппаратных средств микропроцессорных систем управления движением поездов // Электротехника. – 2020. – № 9. – С. 2–8.

8. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Христов Х. А., Гавзов Д. В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики. Под ред. Вл. В. Сапожникова. – М.: Транспорт, 1995. – 272 с.
9. Скляр В. В., Харченко В. С. Отказоустойчивые компьютерные системы управления с версионно-пороговой адаптацией: способы адаптации, оценка надежности, выбор архитектур // Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 6. – С. 131–145.
10. Микони С. В. Общие диагностические базы знаний вычислительных систем. – СПб.: СПИИРАН, 1992. – 234 с.
11. Дрозд А. В., Харченко В. С., Антощук С. Г., Дрозд Ю. В., Дрозд М. А., Сулима Ю. Ю. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем. Под ред. А. В. Дрозда и В. С. Харченко. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2012. – 614 с.
12. Гавзов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Методы обеспечения безопасности дискретных систем // Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 8. – С. 3–50.
13. Бочков К. А., Харлап С. Н., Сивко Б. В. Разработка отказоустойчивых систем на основе диверситетных базисов // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2. – № 1. – С. 47–64.
14. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 1: Классические коды Бергера и их модификации. – М.: Наука, 2020. – 383 с.
15. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 2: Взвешенные коды с суммированием. – М.: Наука, 2021. – 455 с.
16. Navabi Z. Embedded Core Design with FPGAs. McGraw-Hill Education. – 433p.
17. Ефанов Д. В., Пащуков А. В. Исследование особенностей обнаружения ошибок в комбинационных устройствах автоматики, реализованных на основе программируемых логических схем // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 3. – С. 88–99.
18. Городилов А. Ю. Методы и алгоритмы диагностирования и реконфигурации логики высоконадежных ПЛИС: дис. канд. техн. наук. – Пермь, 2016. – 260 с.
19. Тюрин С. Ф., Прохоров А. С. Отказоустойчивые логические элементы ПЛИС. Fault tolerant LUT FPGA. – Известия вузов. Северо-кавказский регион // Технические науки. – 2016. – № 4. – С. 11–17.
20. Ланцов В. Н., Мосин С. Г. Современные подходы к проектированию и тестированию интегральных микросхем. – Владимир: изд-во Владимир. гос. ун-та, 2010. – 285 с.
21. Согомонян Е. С., Слабаков Е. В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. – М.: Радио и связь, 1989. – 208 с.
22. Слабаков Е. В., Согомонян Е. С. Самопроверяемые вычислительные устройства и системы (обзор) // Автоматика и телемеханика. – 1981. – № 11. – С. 147–167.
23. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды Хэмминга в системах функционального контроля логических устройств: монография. – СПб.: Наука, 2018. – 151 с.
24. Das D., Toubia N. A. Synthesis of Circuits with Low-Cost Concurrent Error Detection Based on Bose-Lin Codes // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. – 1999. – Vol. 15. – Issue 1–2. – Pp. 145–155. DOI: 10.1023/A:1008344603814.
25. Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 6. – С. 155–162.

26. Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D. Modular Sum Code in Building Testable Discrete Systems // Proceedings of 13th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTs' 2015), Batumi, Georgia, September 26–29, 2015. – Pp. 181–187. DOI: 10.1109/EWDTs.2015.7493133.
27. Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Применение модульных кодов с суммированием для построения систем функционального контроля комбинационных логических схем // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 10. – С. 152–169.
28. Berger J. M. A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels // Information and Control. – 1961. – Vol. 4. – Issue 1. – Pp. 68–73. DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
29. Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Efanov D. Search Algorithm for Fully Tested Elements in Combinational Circuits, Controlled on the Basis of Berger Codes // Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTs' 2017), Novi Sad, Serbia, September 29–October 2, 2017. – Pp. 99–108. DOI: 10.1109/EWDTs.2017.8110085.
30. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Классификация ошибок в информационных векторах систематических кодов // Известия вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58. – № 5. – С. 333–343. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-5-333-343.
31. Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. New Methods of Concurrent Checking: Edition 1. – Dordrecht: Springer Science+Business Media B. V., 2008. – 184 p.
32. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Основы теории надежности и технической диагностики. – Санкт-Петербург: Издательство «Лань», 2019. – 588 с.
33. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., Дмитриев В. В. Новые структуры систем функционального контроля логических схем // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 2. – С. 127. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-58-2-127.
34. Литиков И. П., Согомонян Е. С. Тестово-функциональное диагностирование цифровых устройств и систем // Автоматика и телемеханика. – 1985. – № 3. – С. 111–121.

A. V. Pashukov

*Department of Automation, remote control and communication on railway transport,
Russian University of Transport, Moscow*

RESEARCH OF PECULIARITIES OF ERROR DETECTION ON THE OUTPUTS OF PROGRAMMABLE LOGIC INTEGRATED CIRCUITS WITH FUNCTIONAL CONTROL BASED ON MODULAR CODES WITH SUMMATION

The article provides examples of the use of programmable logic integrated circuits in various industries. Possible faults in FPGA blocks and their difference from faults in programmable logic arrays are described. Particular attention is paid to the failures of the LUT element.

Features of the organization of technical diagnostics systems operating in the operating mode of the objects of diagnostics for combinational logic devices, implemented on the basis of programmable logic integrated circuits are described. Using the example of modular summation codes, it is shown that the known approaches to organizing such systems for devices implemented on a valve basis can be directly applied to devices of the type under consideration. Since malfunctions in the form of errors are recorded, and not the malfunctions themselves, the approaches to the organization of

diagnostic systems are universal. It also provides a comparative characteristic of modular sum codes depending on the code module. A code has been proposed that will detect all faults in the example under study.

Programmable gate array, combinational logic device, control of malfunctions, types of malfunctions, errors in system output, classical and modular sum codes, test system

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-3-477-495

References

1. Malinovsky M. L., Alenin D. A., Barsov V. I., Konovalenko N. V. (2012) Perspektivy ispol'zovaniya FPGA-tekhnologiy v sistemakh zheleznodorozhnoy avtomatiki [Prospects of using FPGA technologies in railway automation systems]. *Bulletin of the Petro Vasilenko Kharkiv National Technical University of Agriculture. Technical sciences.*, iss. 130: Problems of energy supply and energy saving in the agroindustrial complex of Ukraine, p. 79–81. (In Russian)
2. Zaikin A. A., Zhemov V. S., Miroshnik Y. M., Pronyakin A. V., Sokolov I. V. (2005) New control systems for emergency protection of power reactors. *Yadernyye izmeritelno-informatsionnyye tekhnologii [Nuclear measurement and information technologies]*, no. 3, pp. 30–55.
3. Kudryavtsev A. V., Kartsev K. P., Sergeev I. A., Fedorov V. A., Yakushev A. G. (2012) *Proyekt tsifrovoy upravlyayushchey sistemy bezopasnosti dlya energoblokov AES s reaktorami VVER [Project of digital safety control system for NPP power units with VVER reactors]*. Moscow, National Research Nuclear University MEPhI Publ., 144 p.
4. Zheltov P. V. *Primeneniye FPGA v sistemakh tsifrovoy radiosvyazi. Vvedeniye [Application of FPGA in digital radio communication systems. Introduction]*. Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin Publ., 6 p.
5. Kabetsky A. G., Markov D. S. (2010) Metody i instrumentalnyye sredstva postroyeniya logicheskikh ustroystv elektricheskoy tsentralizatsii na baze programmiruyemykh logicheskikh integral'nykh skhem [Methods and tools for constructing logic devices of electric interlocking based on programmable logic integrated circuits]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Bulletin of the Petersburg University of Railways]*. Saint Petersburg, St. Petersburg State Transport University, no. 2, pp. 168–173. (In Russian)
6. Dobiál R., Kubátová H. (2004) FPGA Based Design of Railway's Interlocking Equipment, *Proceedings of EUROMICRO Symposium on Digital System Design*, pp. 467–473.
7. Bestemyanov P. F. (2020) Metody obespecheniya bezopasnosti apparatnykh sredstv mikroprotsessornykh sistem upravleniya dvizheniyem poyezdov [Methods for ensuring the safety of hardware of microprocessor-based train control systems]. *Elektrotehnika [Electrical engineering]*, no. 9, pp. 2–8. (In Russian)
8. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Khristov Kh. A., Gavzov D. V. (1995) *Metody postroyeniya bezopasnykh mikroelektronnykh sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki [Methods of safe microelectronic systems constructing of railway automation]*. Moscow, Transport Publ., 272 p. (In Russian)
9. Sklyar V. V., Kharchenko V. S. (2002) Otkazoustoychivyye kompyuternyye sistemy upravleniya s versionno-porogovoy adaptatsiyey: sposoby adaptatsii, otsenka nadezhnosti, vybor arkhitektur [Fault-Tolerant Computer-Aided Control Systems with Multiversion-Threshold Adaptation: Adaptation Methods, Reliability Estimation, and Choice of an Architecture]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and Remote Control]*, no. 6, 131–145. (In Russian)

10. Mikoni S. V. (1992) *Obshchiye diagnosticheskiye bazy znaniy vychislitelnykh sistem* [General diagnostic knowledge base of computing systems]. Saint Petersburg, SPIIRAS Publ., 234 p. (In Russian)
11. Drozd A. V., Kharchenko V. S., Antoshchuk S. G., Drozd Yu. V., Drozd M. A., Sulima Yu. Yu. (2012) *Rabochee diagnostirovanie bezopasnykh informatsionno-upravlyayushchih sistem* [Objects and Methods of On-Line Testing for Safe Instrumentation and Control Systems]. Kharkov National Aerospace University, 614 p. (In Russian)
12. Gavzov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. (1994) Metody obespecheniya bezopasnosti diskretnykh sistem [Security Methods for Discrete Systems]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and telemekhanika], no. 8, pp. 3–50. (In Russian)
13. Bochkov K. A., Kharlap S. N., Sivko B. V. (2016) Razrabotka otkazoustoychivyykh sistem na osnove diversitetnykh bazisov [Design of axiomatic fault-tolerant systems]. *Avtomatika na transporte* [Automation on Transport], vol. 2, no. 1, pp. 47–64. (In Russian)
14. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2020) *Kody s summirovaniyem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. Tom 1: Klassicheskiye kody Bergera i ikh modifikatsii* [Summed codes for technical diagnostic systems. Vol. 1: Classic Berger codes and their modifications]. Moscow, Nauka Publ., 383 p. (In Russian)
15. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2021) *Kody s summirovaniyem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. Tom 2: Vzveshennyye kody s summirovaniyem* [Summed codes for technical diagnostic systems. Vol. 2: Weighted codes with summation]. Moscow, Nauka Publ., 455 p. (In Russian)
16. Navabi Z. Embedded Core Design with FPGAs. McGraw-Hill Education, 433p.
17. Efanov D. V., Pashukov A. V. (2019) Issledovaniye osobennostey obnaruzheniya oshibok v kombinatsionnykh ustroystvakh avtomatiki, realizovannykh na osnove programmiruyemykh logicheskikh skhem [The research of the features of the error detection in combinational logic devices realized on the basis of the programmable logic circuits]. *Vestnik RGUPS* [Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University], no. 3, pp. 88–99. (In Russian)
18. Gorodilov A. Y. (2016) *Metody i algoritmy diagnostirovaniya i rekonfiguratsii logiki vysokonadezhnykh PLIS: dis. kand. tekhn. nauk* [Methods and algorithms for diagnosing and reconfiguring the logic of highly reliable FPGAs: dis. Cand. tech. sciences]. Perm', 260 p.
19. Tyurin S. F., Prokhorov A. S. (2016) Otkazoustoychivyye logicheskiye elementy PLIS [Fault tolerant LUT FPGA]. *Izvestiya vuzov. Severo-kavkazskiy region. Tekhnicheskkiye nauki* [Proceedings of universities. North Caucasian region. Technical sciences], no. 4, pp. 11–17. (In Russian)
20. Lancov V. N., Mosin S. G. (2010) *Sovremennyye podkhody k proektirovaniyu i testirovaniyu integralnykh mikroskhem* [Modern approaches to the design and testing of integrated circuits]. Vladimir, Vladimir State University Publ., 285 p. (In Russian)
21. Sogomonyan E. S., Slabakov E. V. (1989) *Samoproveryayemyye ustroystva i otkazoustoychivyye sistemy* [Self-checking devices and failover systems]. Moscow, Radio and Svyaz Publ., 208 p. (In Russian)
22. Sogomonyan E. S., Slabakov E. V. (1981) Samoproveryayemyye vychislitel'nyye ustroystva i sistemy (obzor) [Self-checking computing devices and systems (review)]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], iss. 11, pp. 147–167. (In Russian)
23. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2018) *Kody Khemminga v sistemakh funktsionalnogo kontrolya logicheskikh ustroystv: monografiya* [Hamming codes in

- concurrent error detection systems of logical units: monograph*]. St. Petersburg, Nauka [Science] Publ., 151 p. (In Russian)
24. Das D., Touban A. (1999) Synthesis of Circuits with Low-Cost Concurrent Error Detection Based on Bose-Lin Codes. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, vol. 15, iss. 1–2, pp. 145–155. DOI: 10.1023/A:1008344603814.
 25. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. (2010) O svoistvakh koda s summirovaniyem v skhemakh funktsionalnogo kontrolya [Properties of summation codes in concurrent error detection systems]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and remote control]*, no. 6, pp. 155–162. (In Russian)
 26. Sapozhnikov V., Sapozhnikov V. V., Efanov D. (2015) Modular Sum Code in Building Testable Discrete Systems. *Proceedings of 13th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2015)*, Batumi, Georgia, September 26–29, 2015. Pp. 181–187. DOI: 10.1109/EWDTS.2015.7493133.
 27. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. (2015) Primeneniye modulnykh kodov s summirovaniyem dlya postroeniya sistem funktsionalnogo kontrolya kombinatsionnykh logicheskikh skhem [Application of modular summation codes for the design of concurrent error detection systems of combinational logical circuits]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and remote control]*, no. 10, pp. 152–169. (In Russian)
 28. Berger J. M. (1961) A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels. *Information and Control*, vol. 4, iss. 1, pp. 68–73. DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
 28. Sapozhnikov V., Sapozhnikov V. V., Efanov D. (2017) Search Algorithm for Fully Tested Elements in Combinational Circuits, Controlled on the Basis of Berger Codes. *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29–October 2, 2017. Pp. 99–108. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110085.
 29. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. & Efanov D. V. (2015) Klassifikatsiya oshibok v informatsionnykh vektorakh sistematsicheskikh kodov [Classification of errors in data vectors of systematic codes]. *Izvestiya vuzov. Priborostroeniye [Proceedings of higher educational institutions. Instrument engineering]*, vol. 58, no. 5, pp. 333–343. DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-5-333-343. (In Russian)
 30. Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. (2008) *New Methods of Concurrent Checking: Edition 1*. Dordrecht: Springer Science+Business Media B. V., 184 p.
 31. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. & Efanov D. V. (2019) *Osnovy teorii nadezhnosti i tekhnicheskoy diagnostiki [Reliability and technical diagnostics theory fundamentals]*. Saint Petersburg, Lan' Publishing House, 588 p. (In Russian)
 32. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Efanov D. V., Dmitriyev V. V. (2017) Novyye struktury sistem funktsional'nogo kontrolya logicheskikh skhem [New structures of the concurrent error detection systems for logic circuits]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and Remote Control]*, no. 2, p. 127. (In Russian)
 33. Litikov I. P., Sogomonyan Y. S. (1985) Testovo-funktsional'noye diagnostirovaniye tsifrovyykh ustroystv i sistem [Test-functional diagnostics of digital devices and systems]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and Remote Control]*, no. 3, pp. 111–121. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Д. В. Ефановым
Поступила в редакцию 10.02.2021, принята к публикации 9.03.2021*

ПАШУКОВ Артем Валерьевич – ассистент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ))
art_pash@mail.ru

© Пашуков А. В., 2021

Подписано в печать с оригинал-макета 25.09.2021.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 20,0. Уч.-изд. л. 10,0.
Установочный тираж 300 экз. Заказ .

Отпечатано в типографии ООО «Издательство ОМ-Пресс»,
190031, СПб., наб. реки Фонтанки, 117.