



АВТОМАТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

AUTOMATION ON TRANSPORT

№ 3 • Том 6

Сентябрь, 2020

September, 2020



Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

УЧРЕДИТЕЛЬ

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

ИЗДАТЕЛЬ

Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом Т-ПРЕССА» по договору № ЭОА45208 от 11.02.2020 г.

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: Ю. А. Фаттахова, А. Н. Крышня
Литературный редактор и корректор: Е. Г. Локтионова
Выпускающий редактор: В. Е. Филиппова
Верстка: А. А. Стуканова

Электронное сопровождение: А. С. Иванов

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020

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 ЭОА45208 dated February 11, 2020

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: Y. A. Fattakhova, A. N. Kryshnia
Editing and proofreading: Eugenia G. Loktionova
Executive editor: Viktoria E. Philippova
Layout: Anna A. Stukanova

Electronic maintenancy *Aleksei S. Ivanov*

© PSTU, 2020

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Валерий Сапожников

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

Константин Бочков

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

Сергей Власенко

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

Александр Дундуа

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

Марек Мезитис

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

Йохен Тринкауф

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

Раймунд Убар

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

Владимир Хаханов

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

Фуниан Ху

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

Христо Христов

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Никитин Александр Борисович

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

Соколов Вадим Борисович

канд. техн. наук, доцент,
ответственный секретарь журнала
«Автоматика на транспорте»,
ПГУПС, Санкт-Петербург

Баранов Леонид Аврамович

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

Бестемьянов Петр Филимонович

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

Бушуев Сергей Валентинович

канд. техн. наук, доцент,
УрГУПС, Екатеринбург

Василенко Михаил Николаевич

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

Долгий Игорь Давидович

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

Ефанов Дмитрий Викторович

д-р техн. наук, доцент,
РУТ, Москва

Кокурин Иосиф Михайлович

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

Марков Дмитрий Спиридонович

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

Наседкин Олег Андреевич

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

Никищенков Сергей Алексеевич

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

Пыркин Антон Александрович

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

Розенберг Ефим Наумович

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

Сапожников Владимир Владимирович

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

Шаманов Виктор Иннокентьевич

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

Ходаковский Валентин Аветикович

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

INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL

Valery Sapozhnikov

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

Konstantin Bochkov

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

Sergey Vlasenko

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

Alexander Dundua

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

Marek Mezitis

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

Johann Trinckauf

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

Raimund Ubar

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

Vladimir Hahanov

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

Funian Hu

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

Khristo Khristov

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

EDITORIAL BOARD

Alexander B. Nikitin

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

Vadim B. Sokolov

Ph. D., Associate professor, executive secretary
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

Vladimir VI. Sapozhnikov

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

Victor I. Shamanov

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

Valentin A. Khodakovsky

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

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

В. И. Шаманов

Расчеты помех от тягового тока в неоднородных рельсовых линиях 241

В. Г. Новиков, А. И. Сафронов, В. А. Кузюков

Микропроцессорные системы управления движением поездов
в Московском метрополитене 268

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

К. Е. Ковалев, В. Л. Белозеров, В. А. Шаров

Модель загруженности оперативно-диспетчерского персонала
на малодеятельных линиях 294

МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА В ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

Р. Б. Абдуллаев

Система технического диагностирования и непрерывного мониторинга
устройств железнодорожной автоматики на базе промышленных
программируемых логических контроллеров 309

ЭЛЕКТРОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Д. Х. Баратов

Синтез моделей электронного документооборота технической
документации с учетом его внутренних состояний 332

П. Е. Булавский, О. К. Ваисов

Моделирование и оценка времени поиска неисправностей
в системах интервального регулирования движения поездов
на базе иерархических цветных сетей Петри 356

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ СИСТЕМЫ

В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов

Отказоустойчивая структура на основе логического дополнения
с контролем вычислений по паритету 377

CONTENTS

TRANSPORT CONTROL SYSTEMS

V. I. Shamanov

Calculations of interference from traction current in nonhomogeneous track lines 241

V. G. Novikov, A. I. Safronov, V. A. Kuzyukov

Microprocessor-based train control systems for the Moscow subway 268

OPERATION OF TRANSPORT SYSTEMS

K. E. Kovalev, V. L. Belozero, V. A. Sharov

Workload model of operating and dispatching personnel at low-density lines 294

MONITORING METHODS IN TRANSPORT SYSTEMS

R. B. Abdullaev

Implementation of the subsystem of diagnostic information gathering in continuous monitoring systems of railway automation facilities based on programmable logic controllers 309

ELECTRONIC SIMULATION

D. Kh. Baratov

Synthesis of models of technical documentation electronic management with regard to its internal state 332

P. E. Bulavsky, O. K. Vaisov

Modeling and estimation of failure detection period in systems of railway traffic interval control based on hierarchy colored Petri nets 356

TECHNICAL DIAGNOSTICS AND CONTROLLABLE SYSTEMS

V. V. Sapozhnikov, V. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov

Fault-tolerant structure based on Boolean complement with parity calculations control 377

УДК 656.256.3(088.8)

В. И. Шаманов, д-р техн. наук

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

РАСЧЕТЫ ПОМЕХ ОТ ТЯГОВОГО ТОКА В НЕОДНОРОДНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЛИНИЯХ

На электрифицированных участках железных дорог рельсовые цепи и автоматическая локомотивная сигнализация работают неустойчиво из-за действия помех от тягового тока. Процесс возникновения помех многофакторный, поэтому выявить причины помех с недопустимым уровнем довольно непросто. Измерения в условиях эксплуатации для оценки электромагнитной обстановки в тяговой рельсовой сети и на электровозах относительно сложны и требуют больших затрат времени и средств на их проведение. Электромагнитная обстановка может быстро меняться, а результаты таких измерений затруднительно экстраполировать на другие условия по интенсивности движения и/или на другие веса и скорости движения поездов на этом участке, а также на другие участки железных дорог. Поэтому актуальны теоретические исследования в данной области с разработкой методов расчета уровня помех на рассматриваемые устройства железнодорожной автоматики и телемеханики в различных условиях эксплуатации.

Помехи на эти устройства от тягового тока появляются, когда возникает асимметрия продольного и/или поперечного сопротивления рельсовых нитей рельсовой линии. В статье приводятся некоторые результаты разработки расчетных методов, обеспечивающих выявление характера изменения уровня помех от тяговых токов по длине неоднородных рельсовых линий, оборудованных рельсовыми цепями. Длинные рельсовые нити отрезков рельсовой линии при этом представляются как последовательно соединенные трехполюсники. Длина этих отрезков выбирается из условия обеспечения требуемой точности расчетов. Анализ процесса возникновения асимметрии тягового тока в рельсовой линии усложняется из-за взаимной индуктивности между ее рельсовыми нитями. Поэтому для вычисления коэффициента асимметрии тягового тока в рельсовой линии используются найденные взаимозависимости с коэффициентом асимметрии электрических сопротивлений рельсовых нитей. При расчетах учитываются гармоники тягового тока, создающие помехи, и зависимость электрического сопротивления рельсов от их температуры и величины протекающего по ним тягового тока. В результате находится изменение величины асимметрии тягового тока под приемными катушками автоматической локомотивной сигнализации при движении поезда и величины этой асимметрии в местах подключения к рельсам аппаратуры рельсовых цепей.

Такие расчеты позволяют определять вклад тяговых токов в уровень помех на аппаратуре рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации. Разработанный алгоритм удобен для расчетов на компьютерах. Дополнительный учет взаимных индуктивностей рельсовых нитей с нитями и контактными проводами других рельсовых линий, а также с проводами линий продольного электроснабжения обеспечивает возможность использования методики для проведения расчетов на многопутных перегонах и на станциях. Расчеты могут применяться как при

оценке электромагнитной обстановки на конкретном участке пути в текущее время (или в других условиях эксплуатации), так и для прогнозирования ее изменения при увеличении интенсивности движения и/или веса поездов.

Рельсовые цепи, автоматическая локомотивная сигнализация, рельсовые нити, электрические сопротивления, взаимные индуктивности, тяговый ток, асимметрия, помехи, расчеты

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-241-267

Введение

В системах интервального регулирования движения поездов все шире используется спутниковое позиционирование и цифровые радиоканалы [1–3]. Однако рельсовые цепи (РЦ) на большинстве участков железных дорог мира остаются основным источником информации о свободности от подвижного состава участков пути и целостности их рельсов. Они также используются как индуктивные линии связи между напольными и локомотивными устройствами автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) [4–7]. Условия эксплуатации РЦ и АЛС наиболее сложны на участках с электротягой, поэтому там устойчивость их работы наихудшая. Вызвано это тем, что на таких участках по рельсовым линиям одновременно пропускаются сигнальные токи и превосходящие их по величине на два и более порядка тяговые токи, создающие помехи [8].

Тяговый постоянный ток становится источником помех на четных гармониках тока промышленной частоты, а переменный тяговый ток – на частотах нечетных его гармоник. На участках с электротягой переменного тока помехи отличаются более высоким уровнем и более широким частотным спектром. Поэтому при переменном тяговом токе интенсивность сбоев в работе РЦ и АЛС может быть в десятки раз больше, чем на участках с электротягой постоянного тока [8].

Помехи вызывают появление кратковременных самовосстанавливающихся отказов (сбоев) в работе аппаратуры РЦ и АЛС, приводящих к переключению огней напольных и/или локомотивных светофоров на ложные запрещающие показания, которые требуют снижения скорости движения поезда или экстренного торможения.

Ложные переключения светофоров с разрешающих показаний на запрещающее требуют применения экстренного торможения. В результате увеличивается психофизиологическая нагрузка на поездные бригады, снижается участковая скорость движения с соответствующим уменьшением пропускной способности участков железных дорог, ухудшается безопасность движения поездов. Если ложные переключения ламп локомотивного светофора происходят часто, поездной бригаде разрешено отключать аппаратуру АЛС, что увеличивает вероятность аварий и крушений из-за ошибок машиниста. Эта проблема актуальна и для метрополитена [10].

Первоисточником рассматриваемых помех является асимметрия сопротивлений рельсовых нитей рельсовой линии [11].

Этот параметр является основным при оценке электромагнитной обстановки на участке железной дороги.

Однако электромагнитная обстановка зависит от многих других факторов и может достаточно быстро изменяться, что затрудняет определение степени влияния тяговых токов на устойчивость работы РЦ и АЛС в задачах контроля и диагностики [12].

Тяговый ток на входном для него конце РЦ и перед головным электровозом распределяется по рельсовым нитям обратно пропорционально их входным сопротивлениям. Для РЦ величина этих сопротивлений зависит от значений сопротивлений всех токопроводящих и изолирующих элементов в каждой рельсовой нити с учетом влияния взаимных индуктивностей рельсовых нитей с другими токонесущими элементами тяговой сети.

Асимметрия сопротивлений рельсовых нитей на устойчивость работы путевых приемников РЦ сказывается меньше вследствие того, что различия в величинах сопротивлений элементов рельсовых нитей по полной длине неоднородной рельсовой линии в определенной степени сглаживаются. А сопротивления подключенных по концам РЦ секций основных обмоток дроссель-трансформаторов играют роль балластных сопротивлений.

Для локомотивной аппаратуры АЛС величина входного сопротивления рельсовой нити определяется сопротивлениями всех ее элементов на отрезке от движущегося головного электровоза до места подключения к рельсам источника сигнальных токов. В результате в неоднородных рельсовых линиях при движении поезда асимметрия тягового тока под приемными локомотивными катушками АЛС меняется, а балластными будут только сопротивления секций основных обмоток дроссель-трансформаторов (ДТ) на выходном конце РЦ. Поэтому на одних и тех же участках устойчивость работы АЛС заметно меньше по сравнению с РЦ. И для выявления причин неустойчивой работы АЛС требуется знать детальное распределение асимметрии сопротивлений рельсовых нитей по длине рельсовой линии.

Экспериментальные исследования для выяснения характера такого распределения относительно дороги и сложны организационно, требуют больших затрат времени на их проведение и анализ результатов измерений. Величина рассматриваемых сопротивлений зависит от быстро изменяющихся амплитуд частотного спектра тягового тока, протекающего не только по рельсовой нити, но и по соседним линиям тяговой сети [8]. В результате одномоментное выяснение характера распределения величин сопротивления токопроводящих и изолирующих элементов или распределения по длине РЦ асимметрии тягового тока под катушками АЛС не всегда позволяет экстраполировать полученные результаты на другой интервал времени, на другие условия эксплуатации или на другие рельсовые линии.

Все это определяет актуальность развития в задачах оценки электромагнитной обстановки расчетных методов и компьютерных экспериментов с разработкой корректных математических моделей рельсовых линий как электрических линий с распределенными параметрами, подверженных влиянию магнитных полей, создаваемых другими токонесущими линиями.

1. Особенности формирования асимметрии сопротивлений рельсовых нитей в неоднородных рельсовой линиях

Процесс формирования помех на работу РЦ и АЛС от тягового тока, текущего по рельсовой линии, достаточно сложен, что видно из приведенного ниже анализа этого процесса при наличии в неразветвленной РЦ только продольной асимметрии сопротивления неоднородной рельсовой линии, ограниченной изолирующими стыками с двумя дроссель-трансформаторами (ДТ).

Падение тягового напряжения $\dot{U}_{РЦ}$ в такой РЦ равно падению напряжения между средними точками ДТ. По элементам рельсовых нитей длиной $l_{РЦ}$, в которых протекают тяговые токи соответственно $\dot{I}_{Т1}$ и $\dot{I}_{Т2}$, это падение распределяется следующим образом:

$$\dot{U}_{РЦ} = \dot{I}_{Т1} z_{РН1} l_{РЦ} + \dot{I}_{Т2} z_{М12} l_{РЦ} + \dot{I}_{Т1} 0,5 Z_{ДТ}, \quad (1)$$

$$\dot{U}_{РЦ} = \dot{I}_{Т2} z_{РН2} l_{РЦ} + \dot{I}_{Т1} z_{М12} l_{РЦ} + \dot{I}_{Т2} 0,5 Z_{ДТ}, \quad (2)$$

где $z_{РН1}; z_{РН2}$ – удельные продольные сопротивления рельсовых нитей 1 и 2 с учетом в них сопротивлений рельсовых стыковых соединений; $z_{М12}$ – удельное сопротивление взаимной индуктивности рельсовых нитей; $Z_{ДТ}$ – сопротивление секции основной обмотки ДТ для тягового тока.

Удельное сопротивление взаимной индуктивности рельсовых нитей в однопроводных рельсовых линиях при протекании по ним тяговых токов $z_{М12} = j\omega M_{12}$, где M_{12} – величина взаимной индуктивности рельсовых нитей, ω – частота соответствующей гармоники тягового тока.

Разделим все элементы в формуле (1) на $\dot{I}_{Т1}$, а в формуле (2) на $\dot{I}_{Т2}$:

$$\frac{\dot{U}_{РЦ}}{\dot{I}_{Т1}} = z_{РН1} l_{РЦ} + \frac{\dot{I}_{Т2}}{\dot{I}_{Т1}} z_{М12} l_{РЦ} + 0,5 Z_{ДТ}; \quad (3)$$

$$\frac{\dot{U}_{РЦ}}{\dot{I}_{Т2}} = z_{РН2} l_{РЦ} + \frac{\dot{I}_{Т1}}{\dot{I}_{Т2}} z_{М12} l_{РЦ} + 0,5 Z_{ДТ}. \quad (4)$$

Таким образом, в неоднородных рельсовых линиях сопротивление взаимной индуктивности между рельсовыми нитями линии зависит также от соотноше-

ния величин тяговых токов в нитях. Изменения в асимметрии электрических сопротивлений рельсовых нитей тягового тока приводят к изменению сопротивления взаимной индуктивности рельсовых нитей линии.

Обозначим удельное сопротивление взаимной индуктивности в первой рельсовой нити через z_{M1} , а во второй рельсовой нити через z_{M2} . Пусть, например, в рельсовой линии $I_{T1} < I_{T2}$, т. е. $z_{PH1} > z_{PH2}$. Тогда удельные сопротивления взаимной индуктивности у первой z_{M1} и второй z_{M2} рельсовых нитей с учетом влияния соотношения тяговых токов в них:

$$z_{M1} = \frac{I_{T2}}{I_{T1}} j\omega M_{12}; \quad z_{M2} = \frac{I_{T1}}{I_{T2}} j\omega M_{12}. \quad (5)$$

Следовательно, в рассматриваемом случае удельное сопротивление взаимной индуктивности у первой рельсовой нити z_{M1} увеличивается, а у второй величина z_{M2} уменьшается, за счет чего асимметрия тягового тока в рельсовой линии растёт.

Теория РЦ в настоящее время разработана на высоком уровне [13, 14]. Поэтому желание использовать эту теорию для создания методики расчета мешающего влияния тягового тока на РЦ и устройства АЛС будет вполне естественным.

Основными параметрами в этой теории являются токи и напряжения в местах подключения источника и приемника сигнальных токов РЦ. Данные параметры находят при использовании телеграфных уравнений, описывающих дифференциальными уравнениями в частных производных электрические процессы в рельсовых линиях как электрических с распределенными параметрами. Если рельсовые линии неоднородны, то при расчетах используются усредненные значения удельных величин их продольного и поперечного сопротивлений.

Теория использована и для приближенной оценки или расчета мешающего влияния тягового тока на РЦ и на АЛС с учетом сопротивлений взаимной индуктивности в [15]. Однако представление отрезков неоднородной рельсовой линии однородными отрезками при использовании этой теории в определенной степени загроубляет расчеты и затрудняет конкретизацию причин изменения устойчивости работы АЛС при движении поезда на определенном участке рельсовой линии.

Интересна также схема замещения рельсовых линий с использованием лестничных схем Кауэра, построенных на двухполюсниках, в которых роль продольного сопротивления играет сопротивление рельсовых нитей, а в качестве поперечной проводимости рассматривается сопротивление рельсов по отношению к земле [16]. Входные сопротивления для этих схем вычисляются с использованием непрерывных (лестничных) дробей [17]. Представление рельсовых нитей рельсовой линии такими двухполюсниками обеспечило возможность

получения интересных данных о характере изменения асимметрии тягового тока по длине рельсовой линии при различных численных значениях ее электрических параметров [18]. Однако в этой методике не учитывалось влияние сопротивлений взаимной индуктивности между рельсовыми нитями рельсовой линии.

Более продуктивной для решения задачи представляется схема замещения рельсовых линий тяговой рельсовой сети с использованием последовательного и параллельного соединения Т-образных трехполюсников [16].

2. Расчетная модель отрезка рельсовой линии

Анализ изменений асимметрии сопротивлений рельсовых нитей по длине неоднородной рельсовой линии удобно проводить, разделив ее на отдельные отрезки, по длине которых продольные и поперечные сопротивления рельсовых нитей изменяются относительно мало. Моделировать эти отрезки удобно с использованием в их схемах замещения трехполюсников с обеспечением требуемой точности расчетов [19].

На рисунке 1 показана схема замещения отрезка рельсовой линии длиной l_{OL} параллельным соединением двух трехполюсников. Трехполюсник, моделирующий первую рельсовую нить, имеет выходы $1_1, 2_1, 3_1$, а у трехполюсника, моделирующего вторую рельсовую нить, выходы $1_2, 2_2, 3_2$. Выводы 3_1 и 3_2 объединены. Сопротивлениями R_{P3} моделируются электрические сопротивления отрезков рельсовых нитей по отношению к земле.

Величины продольных сопротивлений первой Z'_1, Z''_1 и второй Z'_2, Z''_2 рельсовых нитей в общем случае неодинаковы по длине трехполюсника и состоят из сопротивлений сплошных рельсов Z_{CP} , соответствующих сопротивлений токопроводящих стыков в звеньевом пути $Z'_{TC1}; Z''_{TC1}$ и $Z'_{TC2}; Z''_{TC2}$, а также сопротивлений взаимной индуктивности $Z'_{M1}; Z''_{M1}$ и $Z'_{M2}; Z''_{M2}$. Из этих составляющих только сопротивления сплошных рельсов одинаковы у разных трехполюсников, имеющих одинаковую длину. Величины сопротивлений токопроводящих стыков зависят от их состояния на конкретном отрезке рельсовой нити, а величины сопротивлений взаимной индуктивности — от соотношения величин тяговых токов в отрезках рельсовой линии.

Часть тяговых токов \dot{I}_{TH1} и \dot{I}_{TH2} , втекающих в рельсовые нити, может стекать в землю \dot{I}_{Y1} и \dot{I}_{Y2} при соответствующем сопротивлении между рельсами и землей. В таких случаях тяговые выходные токи \dot{I}_{TK1} и \dot{I}_{TK2} не равны соответствующим входным \dot{I}_{TH1} и \dot{I}_{TH2} в соответствующих рельсовых нитях. А величины токов утечки из рельсов в землю \dot{I}_{Y1} и \dot{I}_{Y2} определяются не только величинами сопротивлений R_{P31} и R_{P32} , но и соотношениями этих величин со значениями соответствующих продольных сопротивлений, расположенных справа от них на рисунке 1.

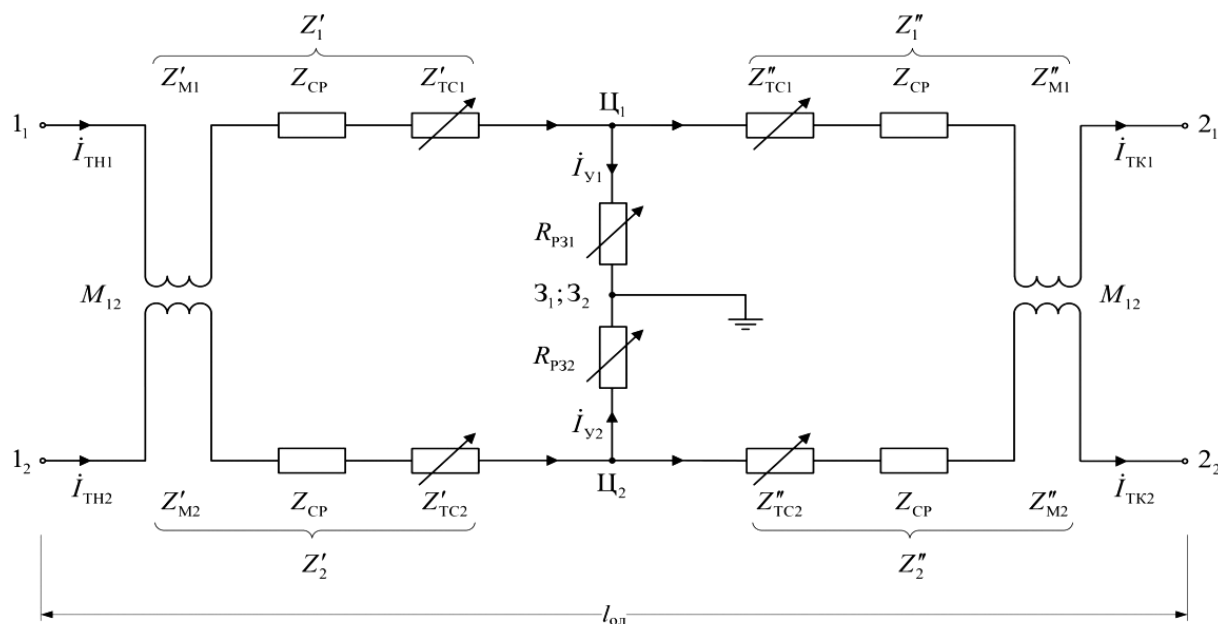


Рис. 1. Схема замещения отрезка рельсовой линии

Величина сопротивления сплошных рельсов $Z_{CP} = l_{OL} z_{CP}$ зависит от длины рассматриваемого отрезка рельсовой линии l_{OL} и величины удельного сопротивления сплошных рельсов z_{CP} . Последнее не меняется по длине рельсовой линии и зависит от типа рельсов, температуры окружающей среды, амплитуды и частоты гармоники тягового тока.

Величины сопротивлений взаимной индуктивности соответствующих отрезков рельсовых нитей неоднородной рельсовой линии Z'_{M1} , Z'_{M2} и Z''_{M1} , Z''_{M2} определяются длиной этих отрезков, а также величинами взаимной индуктивности рельсовых нитей M_{12} и частоты исследуемой гармоники тягового тока ω :

$$Z'_{M1} = j0,5l_{OL} \frac{\dot{I}_{TH2}}{\dot{I}_{TH1}} \omega M_{12}; \quad Z'_{M2} = j0,5l_{OL} \frac{\dot{I}_{TK2}}{\dot{I}_{TK1}} \omega M_{12}; \quad (6)$$

$$Z''_{M1} = j0,5l_{OL} \frac{\dot{I}_{TH1}}{\dot{I}_{TH2}} \omega M_{12}; \quad Z''_{M2} = j0,5l_{OL} \frac{\dot{I}_{TK1}}{\dot{I}_{TK2}} \omega M_{12}. \quad (7)$$

Величины сопротивлений токопроводящих стыков зависят от их конструкции, срока эксплуатации, качества технического обслуживания и могут заметно различаться по длине отрезка рельсовой нити. Поэтому на схеме (рис. 1) слева и справа от центров трехполюсников Π_1 и Π_2 используются разные обозначения – сопротивления Z'_{TC1} , Z''_{TC1} и Z'_{TC2} , Z''_{TC2} .

Диапазоны изменения величины рассматриваемых сопротивлений приведены в [20]. Например, при расчетах удельное сопротивление Z_{CP} сплошных

рельсов типа Р65 при температуре $+ 20^\circ\text{C}$ на частоте тока 50 Гц можно принять в рельсовой нити равным $0,3 e^{j70^\circ}$ Ом/км [21].

Сопротивления токопроводящих стыков Z_{TC} на участках с электротягой постоянного тока не должно увеличивать сопротивление рельсовой нити больше чем на 20 % [22]. Это требование распространяется и на участки, электрифицированные на переменном токе. С учетом этого расчетное удельное продольное сопротивление рельсовой нити звеньевое пути принято равным $0,4 e^{j65^\circ}$ Ом/км [23].

Рельсовые нити как однопроводные электрические линии обладают также взаимными индуктивностями с другими рельсовыми нитями тяговой рельсовой сети, с контактными проводами и с линиями продольного электроснабжения. Это вызывает появление в продольном удельном сопротивлении рельсовой нити удельных сопротивлений взаимной индуктивности рельсовой нити с другими рельсовыми нитями, контактными проводами, несущими тросами, линиями продольного электроснабжения, контурами «рельс – земля». Величины удельных сопротивлений $z_{Mik} = j\omega M_{ik}$ зависят от величин взаимной индуктивности M_{ik} между рельсовыми нитями и другими токонесущими линиями [24–26].

С ростом величины и частоты гармоники тягового тока удельное продольное сопротивление рельсовых нитей увеличивается. Фактически продольное сопротивление рельсовых нитей может увеличиваться на 4–30 % [20].

Поперечное сопротивление рельсовых нитей на рисунке 1 включает в себя распределенное по длине сопротивление рельсов по отношению к земле, а также сопротивления цепей заземления опор контактной сети, подключенных к рельсам. Удельное сопротивление рельсов по отношению к земле может изменяться в диапазоне от 0,5 до 18,0 Ом·км [27]. Сопротивление сигнальному току цепей заземления опор контактной сети при их подключении непосредственно к рельсу должно быть не менее 100 Ом [28]. Фактически при пробое искровых промежутков это сопротивление неопределенно долго может иметь величину на порядок меньше.

При неравномерном и неодинаковом изменении с течением времени величины сопротивлений у токопроводящих и изолирующих элементов продольного и поперечного сопротивлений рельсовых нитей рельсовая линия становится неоднородной.

Переменный тяговый ток активно стекает из рельсов в землю. Величина тягового тока по длине рельсовых нитей рельсовой линии может меняться неодинаково, когда их сопротивления по отношению к земле R_{P31} и R_{P32} различны. Неравномерность стекания появляется и при изменении соотношения величин продольного и поперечного сопротивлений рельсовых нитей на разных участках рельсовой линии. Поэтому в общем случае тяговые токи в рельсах в начале $\dot{I}_{TH1}, \dot{I}_{TH2}$ и в конце $\dot{I}_{TK1}, \dot{I}_{TK2}$ соответствующего отрезка рельсовой нити могут иметь разные значения.

Для более простого восприятия схемы замещения РЦ и уменьшения длины формул при расчетах распределения асимметрии тягового тока по длине неоднородной рельсовой линии приняты следующие условные обозначения. Для левого и правого на схеме отрезков продольного сопротивления у трехполюсника первой рельсовой нити:

$$Z_1' = 0,5l_{OL}z_{CP} + Z_{TC1}' + Z_{M1}'; \quad Z_1'' = 0,5l_{OL}z_{CP} + Z_{TC1}'' + Z_{M1}''; \quad (8)$$

у трехполюсника второй рельсовой нити:

$$Z_2' = 0,5l_{OL}z_{CP} + Z_{TC2}' + Z_{M2}'; \quad Z_2'' = 0,5l_{OL}z_{CP} + Z_{TC2}'' + Z_{M2}'' \quad (9)$$

Представление отрезков рельсовых нитей рельсовой линии, обладающей распределенными параметрами, в виде последовательного соединения трехполюсников, содержащих элементы с сосредоточенными параметрами, не должно вносить в расчеты погрешности недопустимой величины. Величина этой погрешности зависит от выбранной длины отрезка рельсовой линии l_{OL} , от величины ее продольного и поперечного сопротивлений, а также от частоты исследуемой гармоники тягового тока [16, 19].

Максимально допускаемая по требованиям обеспечения необходимой точности расчетов длина данных отрезков с увеличением удельного сопротивления рельсов по отношению к земле растет, а с ростом частоты гармоники тягового тока уменьшается. Проведенные исследования показали, что погрешность расчетов на частоте 50 Гц не превышает 5% при минимальном удельном сопротивлении рельсов по отношению к земле, равном 0,5 Ом·км, если длина отрезка рельсовой нити меньше 400 м. При частоте 150 Гц длина отрезка должна быть не больше 170 м [16].

3. Схема замещения рельсовой цепи

Распределение асимметрии тягового тока по длине рельсовой линии удобно начинать с рельсовой цепи (РЦ), прилегающей к тяговой подстанции. Схема замещения такой РЦ при работе в нормальном режиме представлена на рисунке 2. Остальные k рельсовых цепей на участке между тяговыми подстанциями показаны условно. Считается, что тяговый ток вырабатывается источником тока (ИТ).

РЦ ограничена изолирующими стыками с дроссель-трансформаторами. Сигнальный ток I_C вырабатывается путевым генератором (ПГ). Приемник сигнального тока РЦ обозначен как ПП. К концам рельсовых нитей РЦ подключены дроссельными переключками с сопротивлениями $Z_{ДПН1}$, $Z_{ДПН2}$ и $Z_{ДПК1}$, $Z_{ДПК2}$ и секции основных обмоток дроссель-трансформаторов с сопротивлениями $Z_{ДТ} / 4$. За длину рельсовой цепи для тягового тока $l_{РЦ}$ принято расстояние между средними точками дроссель-трансформаторов. Асимметрия сопротивлений рельсовых нитей в рельсовой линии для аппаратуры АЛС рас-

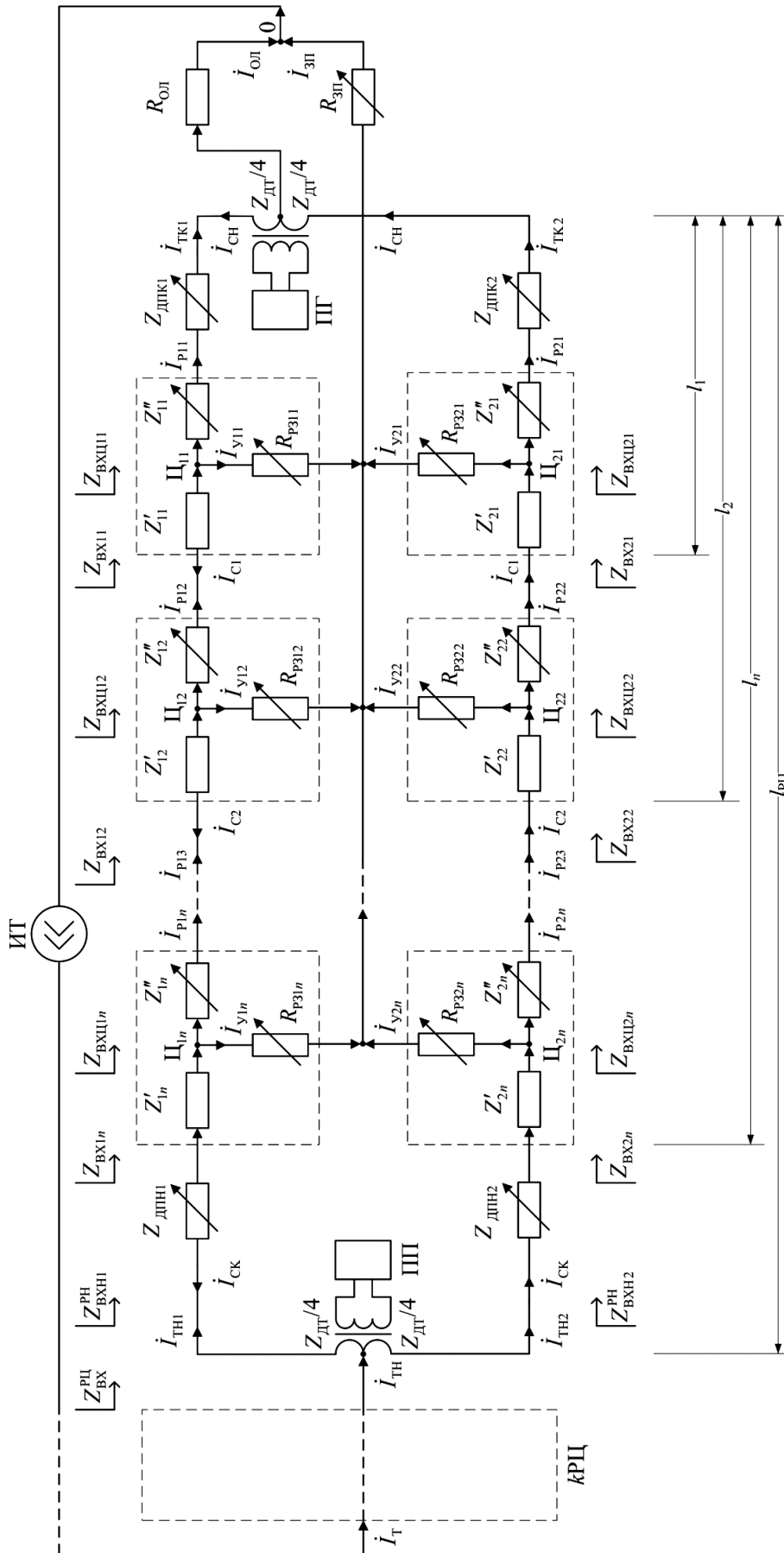


Рис. 2. Схема замещения рельсовой линии, оборудованной рельсовой цепью

считывается в отдельных точках, расположенных от конца РЦ на расстояниях $l_1 \dots l_n$.

Разница между $l_{РЦ}$ и l_n объясняется тем, что при вступлении электровоза на РЦ он своими колесными парами шунтирует дроссель-трансформатор, установленный на входном конце рельсовой цепи, вместе с его дроссельными переключками $Z_{ДПН1}$ и $Z_{ДПН2}$. В результате сопротивления эти элементы не входят в цепь протекания тягового тока по рельсовой линии в режиме АЛС, отчего величины асимметрии тягового тока на этом конце в режиме АЛС и в нормальном режиме работы РЦ различаются.

Рельсовая линия в пределах РЦ делится на n отрезков, нумерация которых ведется от выходного для тягового тока ее конца. За начало отрезка рельсовой линии принято место втекания в нее тягового тока. Отрезки рельсовых нитей рельсовой линии для тягового тока представлены в виде трехполюсников с нумерацией их выводов в соответствии с рисунком 1. Первая цифра в номере вывода трехполюсника обозначает номер рельсовой нити, вторая – его номер по длине рельсовой линии.

За расчетные точки для определения асимметрии тягового тока под приемными локомотивными катушками движущегося по РЦ электровоза приняты начала соответствующих отрезков рельсовой линии. На рисунке 2 длина от этих точек первого отрезка рельсовой линии до конца РЦ обозначена как $l_1, l_2 \dots l_n$.

На рисунке 2 приняты следующие условные обозначения:

$Z_{ВХ}^{РЦ}$ – входное сопротивление РЦ для тягового тока;

$Z_{ВХН1}^{РН}, Z_{ВХН2}^{РН}$ – входные сопротивления для тягового тока соответственно в началах первой и второй рельсовых нитей;

$Z_{ВХ11} \dots Z_{ВХ1n}; Z_{ВХ21} \dots Z_{ВХ2n}$ – входные сопротивления для тягового тока первой и второй рельсовых нитей под катушками АЛС при вступлении электровоза на соответствующий отрезок рельсовой линии;

$Z_{ВХЦ11} \dots Z_{ВХЦ1n}; Z_{ВХЦ21} \dots Z_{ВХЦ2n}$ – входные сопротивления для тягового тока центральных точек соответствующих трехполюсников;

$R_{Р311} \dots R_{Р31n}; R_{Р321} \dots R_{Р32n}$ – сопротивления отрезков рельсовых нитей от первого до n -го по отношению к земле соответственно у первой и второй рельсовых нитей;

$Z'_{11}, Z''_{11} \dots Z'_{1n}, Z''_{1n}; Z'_{21}, Z''_{21} \dots Z'_{2n}, Z''_{2n}$ – сопротивления продольных плеч трехполюсников в отрезках рельсовых нитей от первого до n -го соответственно в первой и второй рельсовых нитях;

$R_{ОД}, R_{ЗП}$ – сопротивления соответственно отсасывающей линии и контура заземления тяговой подстанции.

По концам рельсовых нитей в продольные плечи трехполюсников включены сопротивления соответствующих дроссельных переключек $Z_{ДП}$ и секций основных обмоток дроссель-трансформаторов $Z_{ДТ}$.

Величина сопротивления отсасывающей линии тяговой подстанции при расчетах может приниматься равной 0,5 Ом. Сопротивление контура заземле-

ния тяговой подстанции на участках с электротягой переменного тока может изменяться в пределах от 0,5 до 5,0 Ом [26]. За ноль при расчетах на схеме принята точка, в которой соединяются тяговые токи, возвращающиеся на тяговую подстанцию по рельсовым линиям и по земле.

Величина сигнального тока уменьшается по длине РЦ из-за его утечек через сопротивление изоляции рельсовой линии. Поэтому на схеме сигнальный ток во входном для него конце РЦ обозначен как $\dot{I}_{СН}$, а сигнальные токи на концах соответствующих отрезков рельсовой линии – $\dot{I}_{С1}$, $\dot{I}_{С2}$, и т. д.

Для составляющих тягового тока, протекающих по элементам рельсовой линии, приняты следующие условные обозначения:

$\dot{I}_{ТН}$ – тяговый ток, втекающий в РЦ;

$\dot{I}_{ТН1}$, $\dot{I}_{ТН2}$; $\dot{I}_{ТК1}$, $\dot{I}_{ТК2}$ – тяговые токи в дроссельных перемычках и в секциях основных обмоток дроссель-трансформаторов в начале и в конце соответствующих рельсовых нитей;

$\dot{I}_{Р11} \dots \dot{I}_{Р1n}$; $\dot{I}_{Р21} \dots \dot{I}_{Р2n}$ – тяговые токи в рельсах в конце соответствующих расчетных отрезков рельсовых нитей;

$\dot{I}_{У11}, \dots, \dot{I}_{У1n}$; $\dot{I}_{У21}, \dots, \dot{I}_{У2n}$ – тяговые токи, стекающие из рельсов в землю из соответствующих отрезков первой и второй рельсовых нитей.

Тяговые токи в начале РЦ $\dot{I}_{ТН1}$ и $\dot{I}_{ТН2}$ распределяются по рельсовым нитям обратно пропорционально их входным сопротивлениям $Z_{ВХН1}^{PH}$ и $Z_{ВХН2}^{PH}$. Тяговые токи, текущие под приемными локомотивными катушками АЛС при вступлении головного электровоза на РЦ, распределяются обратно пропорционально входным сопротивлениям $Z_{ВХ1n}$ и $Z_{ВХ2n}$, а при движении по i -му отрезку рельсовой линии – обратно пропорционально входным сопротивлениям $Z_{ВХ1i}$ и $Z_{ВХ2i}$. Для схемы на рисунке 2 входные сопротивления – это сопротивления рельсовых нитей от начала РЦ или от первой колесной пары головного электровоза до нулевой точки. При расчетах для каждой из остальных РЦ в зоне между тяговыми подстанциями к ее выходу подключается входное сопротивление следующей по ходу тягового тока рельсовой цепи.

4. Расчет распределения коэффициента асимметрии тягового тока под катушками автоматической локомотивной сигнализации

Величина помех на рассматриваемую аппаратуру зависит от абсолютного значения разности (асимметрии) тяговых токов $\dot{I}_{AI} = \dot{I}_{T1} - \dot{I}_{T2}$ в рельсовых нитях под приемными локомотивными катушками АЛС или в месте подключения к рельсам аппаратуры РЦ. Эта асимметрия, в свою очередь, зависит от абсолютного значения разности сопротивлений рельсовых нитей $z_{PH1} - z_{PH2}$ в указанных точках рельсовой линии. При проведении контроля и расчетов более удобны относительные значения этих показателей – коэффициент асимметрии тягового тока в рельсовой линии k_{AI} и коэффициент асимметрии сопротивлений рельсовых нитей k_{AZ} , вычисляемые по формулам:

$$k_{AI} = \frac{\dot{I}_{T1} - \dot{I}_{T2}}{\dot{I}_{T1} + \dot{I}_{T2}} = \frac{\dot{I}_{AI}}{\dot{I}_T}, \quad k_{AZ} = \frac{z_{PH1} - z_{PH2}}{z_{PH1} + z_{PH2}} = \frac{\Delta k_{AZ}}{z_{PH1} + z_{PH2}}; \quad (10)$$

где \dot{I}_T – тяговый ток в рельсовой линии в рассматриваемой точке.

Знак «плюс» или «минус» этих коэффициентов показывает, что в первой рельсовой нити сопротивление или тяговый ток соответственно больше или меньше.

Тяговый ток растекается по рельсовым нитям из дроссель-трансформатора, установленного на входном для тягового тока конце РЦ, или утекает вперед от головного электровоза под приемными локомотивными катушками АЛС обратно пропорционально входным сопротивлениям рельсовых нитей в этих точках рельсовой линии. Поэтому в таких точках $k_{AI} = k_{AZ}$.

Это равенство может нарушаться в других точках рельсовой линии, где условия протекания тягового тока зависят не только от асимметрии сопротивлений рельсовых нитей, лежащих впереди по его ходу, но и от асимметрии сопротивлений рельсовых нитей, по которым тяговый ток попадает в рассматриваемую точку.

При известных значениях коэффициентов асимметрии абсолютное значение разности сопротивлений рельсовых нитей находится по формуле $\Delta k_{AZ} = k_{AZ}(z_{PH1} + z_{PH2})$. На аппаратуру АЛС и РЦ мешающее влияние оказывает абсолютное значение разности тяговых токов в рельсовых нитях $\Delta \dot{I}_T$, которое называется асимметрией тягового тока и вычисляется по формуле $\Delta \dot{I}_T = \dot{I}_{T1} - \dot{I}_{T2} = k_{AI} \dot{I}_T = k_{AI}(\dot{I}_{T1} + \dot{I}_{T2})$.

Начинать расчеты распределения асимметрии тягового тока под приемными локомотивными катушками АЛС по длине неоднородной рельсовой линии с входного для поезда конца РЦ невозможно. Для такого расчета надо знать, как меняются входные сопротивления рельсовых нитей по мере движения поезда. Но величина этих входных сопротивлений зависит от неизвестного пока характера распределения асимметрии тягового тока по длине лежащего впереди отрезка рельсовой линии и от величины переменного тягового тока в рельсах, которая может заметно меняться по длине этого отрезка.

Было показано, что из-за действия взаимной индуктивности рельсовых нитей процесс формирования асимметрии тягового тока в рельсовой линии обладает своеобразной положительной обратной связью (рис. 3) [11].

Это обеспечило возможность вычислять коэффициент асимметрии тягового тока k_{AI} при известной величине коэффициента асимметрии электрического сопротивления рельсовых нитей k_{AZ} по простой формуле:

$$k_{AI} = k_{AZ} \frac{k_{ПР}}{1 - k_{ОС} k_{ПР}}, \quad (11)$$

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

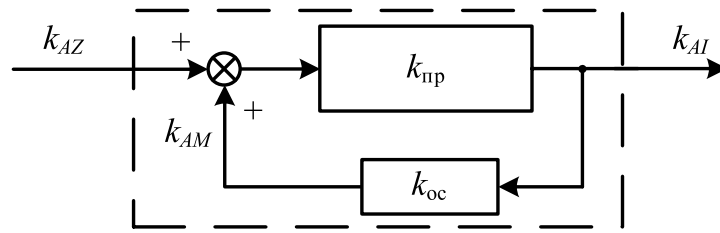


Рис. 3. Модель процесса формирования асимметрии тягового тока в рельсовой линии

Проведенные исследования показали, что в рельсовой линии с наиболее распространенными рельсами типа Р65 при токе частотой 50 Гц коэффициент обратной связи k_{OC} в системе мало зависит от электрических параметров рельсовых нитей. При изменении удельного сопротивления рельсовых нитей в диапазоне от 0,3 до 0,6 Ом/км величина его отклоняется от среднего его значения $k_{OC} = 1,96$ на $\pm 0,03$.

Коэффициент передачи в прямом канале $k_{пр}$ является функцией сопротивления рельсов, изменяясь в диапазоне от 0,423 до 0,357.

В общем случае длины отрезков рельсовой линии могут быть различными, что требует их нумерации. Полные входные сопротивления рельсовых нитей для тягового тока от средних точек трехполюсников Π_{11} и Π_{21} первого отрезка рельсовой линии с учетом (1) и (2):

$$Z_{BX\Pi_{11}}^{\Pi} = \frac{(R_{P311} + R_{3\Pi})(0,5l_{OL1}z_{CP} + Z_{TC11}'' + Z_{M11}'' + Z_{ДПК1} + 0,25Z_{ДТ} + R_{OL})}{R_{P311} + R_{3\Pi} + 0,5l_{OL1}z_{CP} + Z_{TC11}'' + Z_{M11}'' + Z_{ДПК1} + 0,25Z_{ДТ} + R_{OL}}; \quad (12)$$

$$Z_{BX\Pi_{21}}^{\Pi} = \frac{(R_{P321} + R_{3\Pi})(0,5l_{OL1}z_{CP} + Z_{TC21}'' + Z_{M21}'' + Z_{ДПК2} + 0,25Z_{ДТ} + R_{OL})}{R_{P321} + R_{3\Pi} + 0,5l_{OL1}z_{CP} + Z_{TC21}'' + Z_{M21}'' + Z_{ДПК2} + 0,25Z_{ДТ} + R_{OL}}. \quad (13)$$

На выходном конце РЦ ($Z_{ДПК2} + 0,25Z_{ДТ} + R_{OL}$) $\gg 0,5l_{OL1}z_{CP} + Z_{TC21}'' + Z_{M21}''$. Поэтому асимметрия тягового тока здесь мала, и ею можно пренебречь. Это позволяет при расчетах сопротивлений $Z_{BX\Pi_{11}}^{\Pi}$ и $Z_{BX\Pi_{21}}^{\Pi}$ считать, что $Z_{M11}'' = Z_{M21}'' = 0,5l_{OL1}j\omega M_{12}$.

Поскольку асимметрия тяговых токов \dot{I}_{P12} и \dot{I}_{P22} пока неизвестна, сначала вычисляются входные сопротивления рельсовых нитей первого отрезка рельсовой линии без учета магнитных сопротивлений, входящих в Z'_{11} и Z'_{21} :

$$Z_{BX11}^P = 0,5l_{OL1}z_{CP} + Z'_{TC11} + Z_{BX\Pi_{11}}; \quad Z_{BX21}^P = 0,5l_{OL1}z_{CP} + Z'_{TC21} + Z_{BX\Pi_{21}}. \quad (14)$$

Находится коэффициент асимметрии k_{AZ1} этих входных сопротивлений Z_{BX11}^P и Z_{BX21}^P , а затем по формуле (11) находится численное значение коэффициента асимметрии для тягового тока k_{AI1} в этой точке рельсовой линии. Для

облегчения решения последней задачи можно использовать найденные зависимости величины коэффициента асимметрии тягового тока k_{AI1} от величины коэффициента асимметрии сопротивлений рельсовых нитей k_{AZ1} . График такой зависимости, построенный для рассматриваемых условий, приведен на рисунке 4.

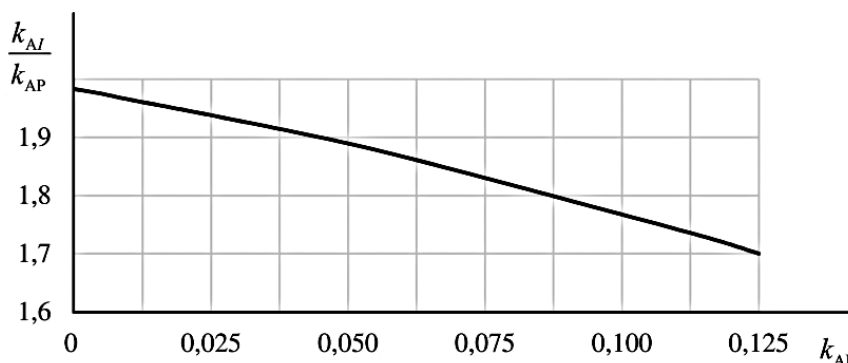


Рис. 4. Коэффициент асимметрии тягового тока в зависимости от величины коэффициента асимметрии сопротивлений рельсовых нитей

Появление асимметрии суммы сопротивлений сплошных рельсов и сопротивлений токопроводящих стыков вызывает появление асимметрии сопротивлений их взаимной индуктивности, отчего асимметрия тягового тока в рельсовых нитях растет. При найденных значениях асимметрии тягового тока на входе первого отрезка рельсовой линии k_{AI1} сопротивления взаимной индуктивности, входящие в сопротивления Z'_{11} и Z'_{21} , при условии, например, когда $Z_{BX11}^P < Z_{BX11}^P$, можно найти по формулам:

$$Z_{M11} = 0,5l_{OL1} \frac{1 - k_{AI}}{1 + k_{AI}} z_M; \quad Z_{M21} = 0,5l_{OL1} \frac{1 + k_{AI}}{1 - k_{AI}} z_M. \tag{15}$$

Полные значения сопротивлений в левых плечах трехполюсников первого отрезка рельсовой линии:

$$Z'_{11} = 0,5l_{OL1} z_{CP} + Z'_{TC11} + Z_{M11}; \quad Z'_{21} = 0,5l_{OL1} z_{CP} + Z'_{TC12} + Z_{M21}. \tag{16}$$

С учетом этого входные сопротивления рельсовых нитей первого отрезков рельсовой линии:

$$Z_{BX11} = Z'_{11} + Z_{BX11}; \quad Z_{BX21} = Z'_{21} + Z_{BX21}. \tag{17}$$

В рассматриваемой модели рельсовой линии тяговые токи в рельсовых нитях между центральными точками смежных отрезков линии одинаковы. Поэтому можно считать, что асимметрия тягового тока по всей длине этих отрезков рельсовых нитей тоже одинакова. Это позволяет находить полные величины сопро-

тивлений Z''_{12} и Z''_{22} , используя формулы (15) и (16) и заменив в случае необходимости длину l_{OL1} на длину l_{OL2} . Тогда продольные для тягового тока сопротивления от средних точек Π_{12} и Π_{22} трехполюсников второго отрезка рельсовой линии:

$$Z''_{\Pi_{12}} = Z''_{TC12} + Z_{BX11}; \quad Z''_{\Pi_{22}} = Z''_{TC22} + Z_{BX21}. \quad (18)$$

Входные для тягового тока сопротивления от средних точек трехполюсников Π_{12} и Π_{22} второго отрезка рельсовой линии с учетом (1) и (2):

$$Z_{BX\Pi_{12}} = \frac{(R_{P312} + R_{3\Pi})(Z''_{TC12} + Z_{BX11})}{R_{P312} + R_{3\Pi} + Z''_{TC12} + Z_{BX11}}, \quad (19)$$

$$Z_{BX\Pi_{22}} = \frac{(R_{P322} + R_{3\Pi})(Z''_{TC22} + Z_{BX21})}{R_{P322} + R_{3\Pi} + Z''_{TC22} + Z_{BX21}}. \quad (20)$$

Далее расчеты проводятся по методике, рассмотренной для первого отрезка рельсовой линии, начиная от формулы (14).

Для остальных отрезков рельсовой линии расчеты проводятся тем же порядком, как и для второго отрезка этой линии. В результате находится характер изменения коэффициента асимметрии тягового тока под приемными локомотивными катушками АЛС в отдельных точках по длине рельсовой линии.

Коэффициент асимметрии тягового тока в начале РЦ для случаев, когда $Z_{ДПН1} \neq Z_{ДПН2}$, находится по формуле:

$$k_{АРЦ} = \frac{(Z_{ДПН1} + Z_{BX1n}) - (Z_{ДПН2} + Z_{BX2n})}{Z_{ДПН1} + Z_{BX1n} + Z_{ДПН2} + Z_{BX2n} + Z_{ДТ} / 2}. \quad (21)$$

Как видно из (21), в схеме РЦ сопротивления секций основных обмоток ДТ, установленных на ее входном конце, играют роль балластных сопротивлений в схеме протекания тягового тока. Поэтому величина асимметрии тягового тока в месте подключения к рельсам аппаратуры РЦ на входном конце меньше, чем величина асимметрии под приемными локомотивными катушками АЛС головного электровоза в момент его вступления на эту рельсовую цепь.

Входное сопротивление на рисунке 2 для тягового тока, вытекающего из рельсовой линии, это сопротивление воздушной отсасывающей линии тяговой подстанции R_{OL} . Для остальных РЦ, расположенных между тяговыми подстанциями, таким сопротивлением является входное сопротивление рельсовой цепи, расположенной дальше по ходу движения поездов. Таково входное сопротивление $Z_{BX}^{РЦ}$ для предыдущей РЦ относительно рассматриваемой на рисунке 2:

$$Z_{BX}^{РЦ} = \frac{(Z_{ДТ} / 4 + Z_{ДПН1} + Z_{BX1n})(Z_{ДТ} / 4 + Z_{ДПН2} + Z_{BX2n})}{Z_{ДПН1} + Z_{BX1n} + Z_{ДПН2} + Z_{BX2n} + Z_{ДТ} / 2}. \quad (22)$$

Последовательно выполняемые расчеты позволяют находить распределение асимметрии сопротивлений рельсовых нитей по длине рельсовой линии при разных расстояниях от конкретной ее точки до конца РЦ. Этим обеспечивается возможность находить распределение асимметрии тягового тока под катушками АЛС движущегося по неоднородной рельсовой линии поезда.

На рисунке 5 приведен найденный график изменения коэффициента асимметрии тягового тока под приемными локомотивными катушками АЛС при движении поезда по неоднородной рельсовой линии длиной 1,6 км, оборудованной РЦ. При этом влияние на асимметрию тягового тока смежных рельсовых линий, контактных проводов и линий продольного электроснабжения не учитывалось для обеспечения чистоты компьютерного эксперимента.

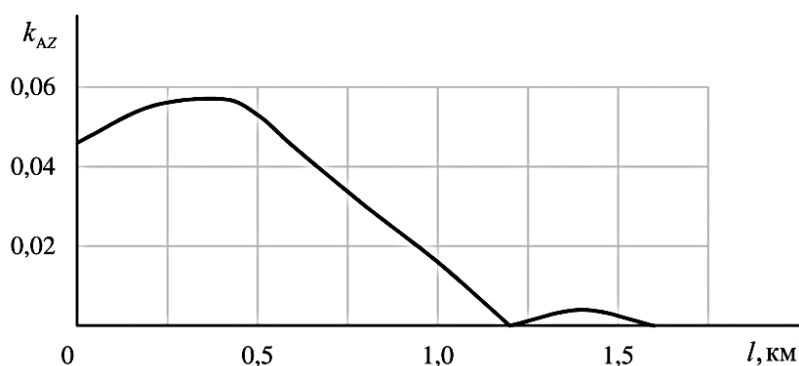


Рис. 5. Изменения коэффициента асимметрии сопротивлений рельсовых нитей под приемными катушками АЛС при движении поезда

Рельсовая линия оборудована рельсами типа Р65 и дроссель-трансформаторами типа ДТ1-150. Температура рельсов $+20$ °С, удельное сопротивление рельсов по отношению к земле $0,5$ Ом·км, удельное сопротивление изоляции заземления контактных опор $2,0$ Ом·км. На протяжении первых $0,4$ км коэффициента асимметрии сопротивлений рельсов в рельсовых нитях равен нулю, а далее до конца РЦ равен $0,025$. На $0,6$ км пробиты искровые промежутки в цепях заземления двух контактных опор, подключенных к рельсовой линии с меньшим продольным сопротивлением. На последних $0,4$ км сопротивление рельсов больше у той рельсовой нити, к которой подключены заземления контактных опор.

В таких условиях коэффициент асимметрии сопротивлений рельсовых нитей увеличивается от $0,045$ до $0,057$ при движении головного электровоза от начала РЦ до участка подключения к рельсам цепей заземления контактных опор с неисправными искровыми промежутками. Далее при движении поезда величина коэффициента асимметрии уменьшается до нуля за $0,4$ км до конца РЦ за счет выравнивания утечек тягового тока из рельсовых нитей. На этом участке из рельсовой нити с большим продольным сопротивлением утечка тя-

гового тока в землю повышена через цепи заземления контактных опор, чем выравнивается его утечка из другой рельсовой нити с меньшим продольным сопротивлением.

При приближении к концу РЦ на величину сопротивлений отрезков рельсовых нитей растет выравнивающее действие суммарных сопротивлений секций основных обмоток дроссель-трансформаторов и дроссельных перемычек.

5. Расчет асимметрии тягового тока по длине неоднородной рельсовой линии

Абсолютное значение асимметрии тягового тока под приемными локомотивными катушками АЛС \dot{I}_{AI} зависит от величины этого тока \dot{I}_T и коэффициента его асимметрии k_{AI} $\dot{I}_{AI} = k_{AI} \dot{I}_T$. Следовательно, график распределения величины асимметрии тягового тока под приемными катушками АЛС при движении поезда будет иметь вид графика, показанного на рисунке 5, только в другом масштабе.

Максимально допускаемая величина асимметрии переменного тягового тока для ДТ1-150, равная 15 А, найдена по условиям допускаемого их нагрева [29]. В соответствии с нормами [30] асимметрия переменного тягового тока не должна превышать 12 А в РЦ с дроссель-трансформаторами типа ДТ1-150 и 24 А в РЦ с дроссель-трансформаторами типа ДТ1-300. Какого-либо обоснования для этих норм нет. И непонятно, почему смена в РЦ дроссель-трансформаторов ДТ1-150 на ДТ1-300 сразу увеличивает в два раза предельную величину допускаемой помехи от тягового тока на аппаратуру АЛС и РЦ, т. е. повышает ее помехоустойчивость. Поэтому в качестве данной нормы обычно используется величина тока асимметрии 15 А [29].

Тяговый ток электровоза растекается по рельсовой линии в обе стороны от него, причем не всегда одинаково. При мерзлом грунте тяговый ток в рельсах под катушками АЛС и в местах подключения к рельсам аппаратуры РЦ может быть заметно больше тягового тока самого электровоза за счет тяговых токов других электровозов, движущихся в зоне между тяговыми подстанциями.

Путевые приемники РЦ могут находиться на ближнем для тягового тока конце, как показано на рисунке 2. Тогда при активном стекании переменного тягового тока из рельсов в землю по мере движения поезда к рельсовой цепи растут величина тягового тока в рельсах и абсолютное значение его асимметрии, что оказывает влияние на работу путевого приемника. В результате растет вероятность перекрытия на запрещающее показание светофора перед движущимся поездом.

Переменный тяговый ток активно стекает из рельсов в землю, поэтому при талом грунте ток электровоза в рельсах на расстоянии 3–4 км от него может быть меньше на порядок. Это способно вызывать заметные изменения величины сопротивления сплошных рельсов по длине рассматриваемого отрезка рельсовой

линии, отчего будут меняться условия протекания тягового тока, вызывая изменения коэффициента асимметрии сопротивлений рельсовых нитей.

Если необходимо знать величину асимметрии тягового тока в рельсах на выходном для тягового тока конце для оценки ее влияния на расположенную там аппаратуру РЦ, то приходится проводить дополнительные расчеты. Асимметрия тягового тока на этом конце создается за счет постепенного изменения по длине рельсовых нитей величин тяговых токов и их разности из-за стекания токов из рельсов в землю. В неоднородных рельсовых линиях степень такого стекания меняется по длине рельсовых нитей, т. к. она является функцией соотношения продольного и поперечного сопротивлений нитей. Расчеты эти ведутся по ходу протекания тягового тока по рельсовой линии.

Тяговый ток $\dot{I}_{ТН}$, втекающий в РЦ, распределяется по рельсовым нитям следующим образом:

$$\dot{I}_{ТН1} = \dot{I}_{ТН} \frac{(Z_{ДТ} / 4 + Z_{ДПН2} + Z_{ВХ2n})}{Z_{ДПН1} + Z_{ВХ1n} + Z_{ДПН2} + Z_{ВХ2n} + Z_{ДТ} / 2}; \quad (23)$$

$$\dot{I}_{ТН2} = \dot{I}_{ТН} \frac{(Z_{ДТ} / 4 + Z_{ДПН1} + Z_{ВХ1n})}{Z_{ДПН1} + Z_{ВХ1n} + Z_{ДПН2} + Z_{ВХ2n} + Z_{ДТ} / 2}. \quad (24)$$

Тяговые токи в рельсовых нитях в схеме на рисунке 2 между центральными точками n -го и $(n - 1)$ -го трехполюсников не меняются. Для следующего по ходу $(n - 1)$ -го отрезка первой рельсовой нити ток \dot{I}_{P1n} становится входным, как и для $(n - 1)$ -го отрезка второй рельсовой нити ток \dot{I}_{P2n} . Поэтому тяговые токи в рельсах на выходах n -х трехполюсников соответственно в первой и второй рельсовых нитях \dot{I}_{P1n} и \dot{I}_{P2n} можно находить по формулам:

$$\dot{I}_{P1n} = \dot{I}_{P1(n+1)} \frac{R_{P31n}}{R_{P31n} + Z_{1n}'' + Z_{ВХ1(n-1)}}; \quad (25)$$

$$\dot{I}_{P2n} = \dot{I}_{P2(n+1)} \frac{R_{P32n}}{R_{P32n} + Z_{2n}'' + Z_{ВХ2(n-1)}}. \quad (26)$$

Расчеты проводятся вплоть до получения численных значений величин выходных токов в рельсовых нитях $\dot{I}_{ТК1}$ и $\dot{I}_{ТК2}$. Разность этих токов и является абсолютным значением величины асимметрии тягового тока в этом месте подключения к рельсам аппаратуры РЦ.

При расчетах по этим формулам численные значения величин сопротивлений берутся из результатов расчетов в п. 4 входных для тягового тока сопротивлений от средних точек соответствующих трехполюсников.

Схема замещения рельсовой линии при этих расчетах представляет собой лестничную схему. Расчеты с ее использованием показывают, что, например,

при удельном сопротивлении изоляции рельсовой линии $1,0 \text{ Ом}\cdot\text{км}$ в пределах РЦ с дроссель-трансформаторами длиной $1,5 \text{ км}$ в землю из рельсовой нити утекает почти две трети первой гармоники переменного тягового тока частотой 50 Гц , поступающего в нее. Такое изменение величины тягового тока приводит к уменьшению более чем в $1,5$ раза величины активного сопротивления рельсов, в то время как сопротивление токопроводящих стыков практически не меняется [21]. В результате коэффициент асимметрии сопротивлений рельсовых нитей растет.

На участках железных дорог с большими переменными тяговыми токами их существенное уменьшение по длине рельсовой линии в пределах РЦ может вызвать необходимость использования итераций, т. е. повторения уточняющих расчетов по результатам найденного характера распределения величины тягового тока по длине рельсовой линии.

6. Вопросы нормирования уровня помех

Нормировать уровень помех от тягового в рельсах на АЛС только по величине тока асимметрии не очень корректно. При таком нормировании не учитывается гармонический состав тягового ток, который существенно влияет на устойчивость работы аппаратуры АЛС из-за разной эффективности его фильтров на разных частотах. К тому же амплитуда наводимого напряжения в приемных локомотивных катушках АЛС пропорциональна частоте гармоник тягового тока в рельсах. А устойчивость работы АЛС зависит еще и от серии электровоза, на котором работает эта аппаратура.

Если рельсовая линия однородна, то локомотивная аппаратура АЛС работает в наихудших условиях при вступлении головного электровоза на РЦ, когда уровень сигнального тока под приемными локомотивными катушками минимален. В неоднородных рельсовых линиях картина не так однозначна, поскольку асимметрия входных для тягового тока сопротивлений рельсовых нитей и зависящая от нее асимметрия тягового тока могут сильно изменяться при движении поезда по РЦ. Это подтверждают результаты анализа мест возникновения сбоя АЛС.

Если не учитывать сопротивления токопроводящих стыков, то и для локомотивного приемника АЛС, и для путевого приемника РЦ наиболее благоприятными будут условия, когда сопротивление сплошных рельсов минимально, а сопротивление изоляции рельсовой линии максимально, т. е. при отрицательных температурах внешней среды. Однако при уменьшении сопротивления сплошных рельсов начинает сильнее сказываться неравномерность распределения по длине рельсовых нитей величин сопротивлений токопроводящих стыков. Это может вызывать рост асимметрии сопротивлений рельсовых нитей и тягового тока. Такие рассуждения справедливы, когда сигнальный ток и для РЦ, и для АЛС вырабатывается одним путевым генератором.

Увеличение неоднородности продольного и поперечного сопротивлений рельсовых нитей по мере эксплуатации верхнего строения пути увеличивает различия величины утечек тягового тока из рельсов в землю по длине рельсовой линии.

Условия протекания тягового и сигнального токов по рельсовой линии различны. На сигнальный ток не действуют сопротивления взаимной индуктивности рельсовых нитей между собой или с другими токонесущими линиями. А поперечным сопротивлением для него является распределенная по длине рельсовой линии проводимость изоляции между рельсовыми нитями. Но степень утечки сигнального тока из одной рельсовой нити в другую зависит также от распределения по длине рельсовой линии соотношения величин продольного и поперечного сопротивлений.

Наихудшее условие для устойчивости работы локомотивного приемника АЛС – когда головной электровоз вступает на РЦ. Поэтому при расчетах и регулировке РЦ в режиме АЛС должно выполняться требование, при котором ток АЛС на входном для поезда конце РЦ (на выходном ее конце для тока АЛС) не меньше нормативного – тогда локомотивный приемник работает устойчиво. Величина этого тока через нормативный поездной шунт сопротивлением 0,06 Ом зависит от рода тяги и частоты сигнального тока. Расчеты проводятся для однородных рельсовых линий при наихудших для режима АЛС условиях с использованием теории четырехполюсников [13, 14]. При расчетах могут использоваться усредненные по длине РЦ величины продольного и поперечного сопротивлений неоднородной рельсовой линии [15].

По мере движения поезда к месту установки путевого генератора сигнальный ток АЛС растет. Следовательно, растет и величина его напряжения на приемных локомотивных катушках. Уровень помех от тягового тока в рельсах при этом тоже может повышаться, если рельсовая линия неоднородна. Если темп нарастания на локомотивных катушках напряжения помех выше темпа нарастания сигнального напряжения на них, то при нормальной регулировке РЦ в режиме АЛС растет вероятность сбоев в работе локомотивной аппаратуры. Причем эта вероятность зависит еще от серии электровоза и режимов работы его силового электрооборудования [8].

Более объективным считается нормирование уровня помех на аппаратуру РЦ и АЛС по величине отношения сигнал/помеха. Это обеспечивает разработку обоснованных требований к эффективности фильтров, используемых в аппаратуре АЛС и РЦ, а также требований к качеству содержания токопроводящих и электроизолирующих элементов в рельсовых линиях. Но такое нормирование связано с учетом большего количества факторов, влияющих на устойчивость работы АЛС и РЦ.

В силу ограниченного объема статьи рассмотрена методика проведения расчетов только для однопутного перегона. Расчеты для многопутных перегонов или для станций принципиально не отличаются, но приходится учитывать боль-

шее количество влияющих линий из-за наличия взаимной индуктивной связи с ними [25].

Расчеты входных сопротивлений отрезков рельсовых нитей, распределения вдоль неоднородной рельсовой линии величины тяговых токов и их асимметрии имеют алгоритмический характер, что удобно для программирования и использования при расчетах цифровых ЭВМ.

Проведенные расчеты с использованием предложенной методики показали хорошее совпадение результатов расчетов с результатами измерений в условиях эксплуатации.

Заключение

Основным источником помех на работу аппаратуры рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации на участках железных дорог с электротягой являются тяговые токи в тяговой сети. Возникают помехи при появлении асимметрии сопротивлений рельсовых нитей в рельсовой линии, вызывающей асимметрию тягового тока в ней.

Величина асимметрии тягового тока зависит от многих факторов и может быстро меняться вследствие изменения электромагнитной обстановки на участке пути, а уровень помех на аппаратуру автоматической локомотивной сигнализации в значительной степени определяется еще и электромагнитной обстановкой на электровозе. Поэтому относительно сложная экспериментальная оценка электромагнитной обстановки на определенном участке железной дороги не всегда обеспечивает достоверное определение причин сбоев в работе аппаратуры и не дает возможности прогнозировать изменение этой обстановки.

Автором статьи на основе анализа электрических и электромагнитных процессов разработана методика расчетов асимметрии тяговых токов под приемными локомотивными катушками автоматической локомотивной сигнализации при движении поезда по длине неоднородной рельсовой линии. Создана также методика расчетов асимметрии тяговых токов в местах подключения к рельсам неоднородной рельсовой линии аппаратуры рельсовых цепей. Рассмотрены вопросы нормирования уровня помех в рассматриваемой аппаратуре.

Расчеты входных сопротивлений отрезков рельсовых линий, распределения величины тяговых токов и их асимметрии по длине рельсовой линии имеют алгоритмический характер, что позволяет проводить расчеты на цифровых ЭВМ.

Методика позволяет оценивать электромагнитную обстановку на конкретных участках железных дорог и обеспечивает возможность прогнозирования изменения обстановки при изменении интенсивности движения и/или веса поездов.

Библиографический список

1. *Vantuono W.* Train control systems in the United States / W. Vantuono // *Internationale Railway Journal*. – 2009. – N 10. – P. 32–36.
2. *Büssmann F.* Wirtschaftlichkeit eines satellitenge stützten ERTMS für deutsche Regionalstrecken / F. Büssmann, B. Scheier, F. Brinkmann, B. Jäder // *Signal und Draht*. – 2016. – Vol. 108, N 10. – P. 6–11.
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. *Розенберг Е. Н.* Инновационные технологии управления движением поездов / Е. Н. Розенберг // *Автоматика, связь, информатика*. – 2017. – № 10. – С. 2–4.
5. *Sauer C.* Gleisstromkreise – ein veraltetes oder aktuelles Mittel zur Gleisfreimtliding / C. Sauer // *Eisenbahningenieur*. – 2014. – Vol. 65, N 7. – P. 25–30.
6. *Pachl J.* Railway Operation and Control. 3rd edition / J. Pachl. – Washington: VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace, 2014. – 284 p.
7. *Watanabe I.* Moving Bloc System with Continuous Train Detection Utilizing Train Shutting Impedance of Track Circuit / I. Watanabe, T. Takashige // *Quarterly Reports of RTRI*. – 1989. – N 4. – P. 9–11.
8. *Shamanov V.I.* Influence of traction currents on stability of work equipment of railway automation / V.I. Shamanov // *Sciences of Europe*. – 2019. – Vol. 1, N. 37. – P. 53–59.
9. *Бадер М. П.* Электромагнитная совместимость / М. П. Бадер. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.
10. *Bestem'yanov P.F.* On statistical models of the amplitude and the duration of pulsed electromagnetic interference in automatic-control and telemechanics channels of subway lines / P.F. Bestem'yanov, I. G. Gorlin // *Russian Electrical Engineering*. – 2016. – Vol. 87, N. 9. – P. 493–497.
11. *Shamanov V.* Formation of Interference from Power Circuits to Apparatus of Automation and Remote Control / V. Shamanov // *Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018), Kazan, September 14–17. – 2018. – P. 140–146. DOI: 10.1109/EWDTS.2018*
12. *Котляренко Н. Ф.* Электрические рельсовые цепи / Н. Ф. Котляренко. – М.: Трансжелдориздат, 1961. – 327 с.
13. *Брылеев А. М.* Теория, устройство и работа рельсовых цепей / А. М. Брылеев, Ю. А. Кравцов, А. А. Шишляков. – М.: Транспорт, 1978. – 344 с.
14. *Лисенков В. М.* Методы анализа и синтеза рельсовых цепей (статистический подход) / В. М. Лисенков. – М.: ВИНТИ РАН, 2014. – 202 с.
15. *Кравцов Ю. А.* Электромагнитное влияние перспективного электроподвижного состава на устройства железнодорожной автоматики / Ю. А. Кравцов, П. Е. Мащенко, Е. Г. Щербина. – М.: МИИТ, 2012. – 117 с.
16. *Шаманов В. И.* Компьютерное моделирование динамики переменного тягового тока в рельсах под катушками АЛСН / В. И. Шаманов, Ю. А. Трофимов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – Иркутск: ИрГУПС, 2008. – № 1. – С. 55–60.
17. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2000. – 638 с.
18. *Карни Ш.* Теория цепей. Анализ и синтез / Ш. Карни. – М.: Связь, 1985. – 368 с.
19. *Зевеке Е. Г.* Основы теории цепей / Е. Г. Зевеке, П. А. Ионкин. – М.: Энергия, 1975. – 751 с.

20. *Аркатов В. С.* Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – М.: Транспорт, 1990. – 295 с.
21. *Шаманов В. И.* Помехи на аппаратуру рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации. Средства защиты / В. И. Шаманов. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2018. – 304 с.
22. ГОСТ 9.602–2005. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. – М.: Издательство стандартов, 2010. – 55 с.
23. Свод правил «Железнодорожная автоматика и телемеханика. Правила проектирования». СП 235.1326000.2015. – Утв. приказом Минтранса России № 205 от 06.07.2015 г. – 176 с.
24. *Вахнин М. И.* Устройства СЦБ при электротяге переменного тока / М. И. Вахнин, Н. Ф. Пенкин, М. А. Покровский, Д. К. Пугин, А. А. Талыков // Тр. ВНИИЖТ. – М.: Трансжелдориздат, 1956. – Вып. 126. – 220 с.
25. *Shamanov V.I.* Magnetic properties of rails and the noise level in the hardware of railway automation and remote control / V. I. Shamanov // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86, N. 8. – P. 509–512.
26. *Shamanov V.I.* Alternating Traction Current Dynamics in Track Lines on Double-Track Hauls / V. I. Shamanov // Russian Electrical Engineering. – 2016. – Vol. 87, N 10. – P. 566–571.
27. *Карякин Р. Н.* Тяговые сети переменного тока / Р. Н. Карякин. – М.: Транспорт, 1987. – 168 с.
28. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог (ЦЭ-868). – М.: ТРАНСИЗДАТ, 2002. – 184 с.
29. *Котельников А. В.* Рельсовые цепи в условиях влияния заземляющих устройств / А. В. Котельников, А. В. Наумов, А. П. Слободянюк. – М.: Транспорт, 1990. – 215 с.
30. Устройства и элементы рельсовых линий и тяговой рельсовой сети. Технические требования и нормы содержания. – М.: ОАО «РЖД», 2010. – 22 с.

V. I. Shamanov

*The department of "Automation, Remote Control and Telecommunication on Railway Transport",
Russian University of Transport (MIIT), Moscow*

CALCULATIONS OF INTERFERENCE FROM TRACTION CURRENT IN NONHOMOGENEOUS TRACK LINES

Track circuits and automatic cab signaling are not stable at the electrified railway sections due to interference effect caused by traction current. The process of noise generation depends on a variety of factors that is why it is quite difficult to identify the reasons for generation of unacceptable noise level. The process of noise measurement under service conditions for the assessment of electromagnetic environment in the electric traction network and electric locomotives is complicated and demands considerable amount of time and resources on its fulfillment. Electromagnetic environment may change rapidly, while the results of such measurement are hard to extrapolate to other conditions of traffic intensity or/and different weight and speed of trains at this section, as well as other railway sections. The above-mentioned proves that the theoretical research and the elaboration of noise level calculation methods for railway automation and remote control facilities in question under different service conditions are topical in the given field of study.

Interference from traction current in these facilities appears when asymmetry of longitudinal and/or lateral resistance of track ways takes place. Some results of elaboration of calculation methods were stated in the article identifying the behavior of change in the level of noise from traction current along non-homogenous track lines equipped with track circuits. Electrically long track ways are presented as a cascade of three-terminal devices. The length of these segments is selected on condition that the required accuracy of calculations is provided. The analysis of traction current asymmetry occurrence in the track line becomes complicated due to mutual inductance between its track ways. That is why for calculation of the traction current asymmetry coefficient in a track line the obtained interconnections of the former with an asymmetry coefficient of the track way electrical resistance are used. Harmonic components of traction current that create interference, as well as the dependency of electrical resistance of track from its temperature and the amount of traction current in them are taken into account during calculations. As a result, variation in the traction current asymmetry under sending coils of automatic cab signaling during train operation was found. Moreover, magnitudes of the given asymmetry in places where the track circuit equipment is connected with the track were determined.

Such calculations make it possible to find out the contribution of traction currents in the track into the noise level of track circuit and automatic cab signaling equipment. The elaborated algorithm is convenient for computer calculations. The fact that mutual induction of the track ways with track ways and contact wires of other track lines, as well as with longitudinal power supply lines, is taken into account makes it possible to apply the elaborated method in calculations at multi-lane blocks and stations. Calculations in question may be applied both during the assessment of electromagnetic environment at a specific track section in the present period or other operating conditions and for the prediction of changes in the environment in case of alterations in traffic intensity or/and weight of trains.

Track circuits, automatic cab signaling, track ways, electrical resistance, mutual induction, traction current, asymmetry, interference, calculations.

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-241-267

References

1. Vantuono W. (2009) Train control systems in the United States. *International Railway Journal*, 2009, no. 10, pp. 32–36.
2. Büßmann F., Scheier B., Brinkmann F. & Jäder B. (2016) Wirtschaftlichkeit eines satellitengestützten ERTMS für deutsche Regionalstrecken. *Signal und Draht*, 2016, vol. 108, no. 10, pp. 6–11.
3. Shamanov V.I. (2018) Sistemy intervalnogo regulirovaniya dvizheniya poezdov s tsifrovymy radiokanalami [Interval train control systems with digital radio channels]. *Avtomatika na transpore* [Transport Automation], 2018, vol. 4, no. 2, pp. 223–240. (In Russian)
4. Rosenberg E.N. (2017) Innovatsionniye tekhnologii upravleniya dvizheniyem poezdov [Innovative technologies for train dispatching]. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, telecommunication, information science], 2017, no. 10, pp. 2–4. (In Russian)
5. Sauer C. (2014) Gleisstromkreise – ein veraltetes oder aktuelles Mittel zur Gleisfreimtlung. *Eisenbahningenieur*, 2014, vol. 65, no. 7, pp. 25–30.
6. Pacht J. (2014) Railway Operation and Control. 3rd edition. Washington, VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace Publ., 2014, 284 p.
7. Watanabe I. & Takashige T. (1989) Moving Bloc System with Continuous Train Detection Utilizing Train Shutting Impedance of Track Circuit. *Quarterly Reports of RTRI*, 1989, no. 4, pp. 9–11.

8. *Shamanov V.I.* (2019) Influence of traction currents on stability of work equipment of railway automation. *Sciences of Europe*, 2019, vol. 1, no. 37, pp. 53–59.
9. *Bader M.P.* (2002) Elektromagnitnaya sovместimost [Electromagnetic compatibility]. Moscow, UMK MPS [Educational and Methodological Office of the Ministry of Railways] Publ., 2002, 638 p. (In Russian)
10. *Bestem'yanov P.F. & Gorlin I.G.* (2016) On statistical models of the amplitude and the duration of pulsed electromagnetic interference in automatic-control and telemechanics channels of subway lines. *Russian Electrical Engineering*, 2016, vol. 87, no. 9, pp. 493–497.
11. *Shamanov V.* (2018) Formation of Interference from Power Circuits to Apparatus of Automation and Remote Control. *Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018)*, Kazan, September 14–17, 2018, pp. 140–146. DOI: 10.1109/EWDTS.2018
12. *Kotlyarenko N.F.* (1961) Elektricheskiye relsovyye tsepy [Electric track circuits]. Moscow, Transzheldorizdat, 1961, 327 p. (In Russian)
13. *Bryleev A.M., Kravtsov Yu.A. & Shishlyakov A.A.* (1978) Teoriya, ustroystvo i rabota relsovykh tsepey [Theory, structure and functioning of track circuits]. Moscow, Transport Publ., 1978, 344 p. (In Russian)
14. *Lisenkov V.M.* (2014) Metody analiza i sinteza relsovykh tsepey (statisticheskii podkhod) [Methods of analysis and synthesis of track circuits (statistical approach)]. Moscow, VINITI RAN [All-Union Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences] Publ., 2014, 202 p. (In Russian)
15. *Kravtsov Yu.A., Mashchenko P.E. & Shcherbina E.G.* (2012) Elektromagnitnoye vliyaniye perspektivnogo elektropodvizhnogo sostava na ustroystva zheleznodorozhnoy avtomatiki [Electromagnetic influence of an advanced electric stock on railway automation facilities]. Moscow, MIIT [Russian University of Transport] Publ., 2012, 117 p. (In Russian)
16. *Shamanov V.I. & Trofimov Yu.A.* (2008) Kompyuternoye modelirovaniye dinamiki peremennogo tyagovogo toka v relsakh pod katushkami ALSN [Computer modeling of alternating traction current dynamics in rails under CACS coils]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. Irkutsk, IrGUPS [Irkutsk State Transport University] Publ., 2008, no. 1, pp. 55–60. (In Russian)
17. *Bessonov L.A.* (2000) Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. Elektricheskiye tsepy [Theoretical foundations of electrical engineering. Electrical circuits]. Moscow, Gardariki Publ., 2000, 638 p. (In Russian)
18. *Karni Sh.* (1985) Teoriya tsepey. Analiz i sintez [Circuit theory. Analysis and synthesis]. Moscow, Svyaz [Telecommunication] Publ., 1985, 368 p. (In Russian)
19. *Zeveke E.G. & Igolkin P.A.* (1975) Osnovy teorii tsepey [Foundations of the circuit theory]. Moscow, Energiya [Power] Publ., 1975, 751 p. (In Russian)
20. *Arkatov V.S., Kravtsov Yu.A. & Stepenskiy B.M.* (1990) Relsoviye tsepy. Analiz raboty i tekhnicheskoye obsluzhivaniye [Track circuits. Performance support and maintenance operation]. Moscow, Transport Publ., 1990, 295 p. (In Russian)
21. *Shamanov V.I.* (2018) Pomekhy na apparaturu relsovykh tsepey i avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii. Sredstva zashchity [Disturbances in signal track circuit and automatic train control equipment. Security facilities]. Moscow, “Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte” [“Training and Methodology Centre for Railway Transport”], 2018, 304 p. (In Russian)
22. GOST 9.602–2005. *Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Sooruzheniya podzemniye. Obshchiye trebovaniya k zashchite ot korrozii* [State Standard 9.602–2005. Unified system of protection from corrosion and ageing. Underground structures. General

- regulations to protection from corrosion*]. Moscow, Izdatelstvo standartov [Publishing House of Standards], 2010, 55 p. (In Russian)
23. *Svod pravil "Zheleznodorozhnaya avtomatika i telemekhanika. Pravila proektirovaniya"* [Set of rules «Railway automation and remote control. Design norms»]. SP [Set of Rules] 235.1326000.2015. Utverzhden prikazom Mintransa Rossii [Approved by the order of the Russian Federation Ministry of Transport] № 205 dated July 6th, 2015, 176 p. (In Russian)
 24. *Vakhnin M. I., Penkin N. F., Pokrovskiy M. A., Pugnn D. K. & Talykov A. A.* (1956) *Ustroistva STsB pry elektrodyage peremennogo toka* [Signaling arrangement under the electric traction of alternating current]. *Trudy VNIIZhT* [Proceedings of All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport]. Moscow, Transzheldorizdat, 1956, iss. 126, 220 p. (In Russian)
 25. *Shamanov V. I.* (2015) Magnetic properties of rails and the noise level in the hardware of railway automation and remote control. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no. 8, pp. 509–512.
 26. *Shamanov V. I.* (2016) Alternating Traction Current Dynamics in Track Lines on Double-Track Hauls. *Russian Electrical Engineering*, 2016, vol. 87, no. 10, pp. 566–571.
 27. *Karyakin R. N.* (1987) *Tyagoviye sety peremennogo toka* [Alternating current traction network]. Moscow, Transport Publ., 1987, 168 p. (In Russian)
 28. *Pravila ustroistva i tekhnicheskoy ekspluatatsii kontaktnoy sety elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog (TsE-868)* [Rules for design and maintenance of catenary for electrified railways (TsE-868)]. Moscow, TRANSIZDAT, 2002, 184 p. (In Russian)
 29. *Kotelnikov A. V., Naumov A. V. & Slobodyanyuk A. P.* (1990) *Relsoviye tsepy v usloviyakh vliyaniya zazemlyayushchikh ustroystv* [Track circuits under the influence of grounding devices]. Moscow, Transport Publ., 1990, 215 p. (In Russian)
 30. *Ustroistva i element relsovykh liniy i tyagovoy relsovoy sety. Tekhnicheskiye trebovaniya i normy sodержaniya* [Facilities and elements of track lines and electric traction network. Technical requirements and maintenance standards]. Moscow, OAO "Russian Railways" Publ., 2010, 22 p. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии А. Б. Никитиным
Поступила в редакцию 20.03.2020, принята к публикации 26.03.2020*

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

e-mail: shamanov_vi@mail.ru

© Шаманов В. И., 2020

УДК: 656.25:62-52

В. Г. Новиков, канд. техн. наук
А. И. Сафронов, канд. техн. наук
В. А. Кузюков, канд. техн. наук

*Кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»,
«Управление и защита информации»,
Российский университет транспорта (МИИТ), Москва*

МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДОВ В МОСКОВСКОМ МЕТРОПОЛИТЕНЕ

Статья посвящена обзору систем микропроцессорной централизации, внедренных в Московском метрополитене.

Внедрение микропроцессорных систем управления и обеспечения безопасности движения поездов в Московском метрополитене обусловлено необходимостью замены морально устаревших систем электрической централизации релейного типа. Такие системы были разработаны и внедрены на метрополитене еще в 60–80 годы прошлого века. Системы на базе микропроцессорной техники выбраны для использования в Московском метрополитене на основании ранее проведенного детального анализа мирового опыта. Было известно, что затраты на приобретение и установку микропроцессорных систем управления окажутся экономически оправданными.

К классу микропроцессорных систем управления движением поездов метрополитена относятся системы диспетчерской, релейно-процессорной и микропроцессорной централизации, а также интервального регулирования движения поездов, основанные на применении аппаратуры тональных рельсовых цепей четвертого поколения. Системы микропроцессорной централизации функционируют непрерывно в режиме реального времени. Они обеспечивают автоматический сбор информации о состоянии контролируемых объектов централизации и осуществляют управление ими также в реальном масштабе времени.

В статье проведен анализ евроазиатского опыта применения систем управления движением поездов, на базе которого составлена классификационная схема существующих разновидностей подобных систем. Приведено изображение графического пользовательского интерфейса автоматизированного рабочего места диспетчера поста централизации на примере станции «Битцевский парк» Бутовской линии. Приведена структурная схема диспетчерской централизации Московского метрополитена с разбивкой на взаимосвязанные модули и выполнено ее детальное описание. Обозначено место систем микропроцессорной централизации в учебном процессе передовых железнодорожных вузов.

Безопасность движения поездов, микропроцессорные системы централизации, Московский метрополитен, диспетчерская централизация, система автоматического считывания номера маршрута поезда

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-268-293

Введение

Московский метрополитен — транспортное предприятие, известное высокими показателями эффективности пассажироперевозок. Эффективность связана

с удержанием мирового первенства по скорости движения поездов, в часы «пик» достигнут минимальный межпоездной интервал в 90 секунд. Это значение достигнуто посредством использования на метрополитене систем обеспечения безопасности. Данному параметру уделяется особое внимание при планировании движения поездов.

Отметим, что в настоящее время в мире преобладают релейные системы электрической централизации, призванные обеспечивать безопасность движения поездов [1]. Эти системы известны с 1960–80-х годов прошлого столетия и успели показать свою многолетнюю эффективность [2]. В условиях функционирования метрополитена факторами воздействия внешней среды можно поступиться, все равно остаются слабые места – открытые перегоны (Сокольническая, Филевская, Замоскворецкая линии), а также населяющие тоннели грызуны и протечки грунтовых вод. Сегодня известны более эффективные, надежные, отказоустойчивые системы на иной элементной базе, а именно микропроцессорные системы [3, 4].

С целью повышения качества работы Московского метрополитена непрерывно внедряются новые информационные технологии, модернизируются существующие решения [5]. Первостепенное значение имеет обеспечение безопасности движения поездов и, как следствие, сохранность здоровья и жизни пассажиров. Уделяется внимание повышению пропускной способности участков линий метрополитена и эффективности использования применяемых технических средств автоматизации и управления [6].

Любая авария и/или крушение составов на линиях Московского метрополитена, как правило, приводит к материальным и техническим потерям, большим экономическим затратам на восстановление подвижного состава, объектов станционной и путевой инфраструктуры, угрожает жизни и причиняет вред здоровью пассажиров.

К несчастью, в истории Московского метрополитена известны трагические случаи. 15 июля 2014 года произошла катастрофа, заставившая пересмотреть многое. Авария привела к большому числу жертв. Любые события, как положительные, так и отрицательные, – это неоценимый опыт. Сменилось руководство метрополитена, произошел пересмотр руководящих воздействий. Средства, выделяемые на развитие транспортного предприятия, стали направляться в необходимом объеме на ремонт существующей инфраструктуры и развитие пассажирских сервисов, обеспечивающих более комфортные перевозки и отвлекающих внимание пассажиров от произошедших печальных событий [7]. Пассажиры доверяют подземным скоростным железнодорожным магистралям, считая их основой бурной и многогранной жизни столицы.

Новые управленческие стратегии открыли дорогу современным техническим и технологическим решениям, активно стал перениматься опыт зарубежных метрополитенов. Был открыт центр профориентации – для экскурсий, лекций, наглядной агитации и ознакомления с технической литературой метрополитена.

На базе Центра осуществляется взаимодействие с делегациями из Китая [8], Турции [9], Белоруссии [10], Казахстана [11–13], Франции [14], Бельгии [15], Германии [16], Италии [17, 18], Финляндии [19], Швеции [20], Испании [21], Японии [22], Болгарии, Объединенных Арабских Эмиратов, Сингапура и других государств с высоким уровнем развития городской железнодорожной инфраструктуры, подземной и наземной [23].

Статья призвана продемонстрировать имеющиеся технические решения в области систем сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) на базе микропроцессорных систем управления движением поездов Московского метрополитена в сравнении с имеющимся зарубежным опытом.

1. Диспетчерская централизация

Диспетчерская централизация (ДЦ) – комплекс программно-технических средств оперативного руководства движением поездов, позволяющий поездному диспетчеру с единого диспетчерского центра, а также дежурному поста централизации (ДСЦП) с автоматизированного рабочего места на станции оказывать дистанционные управляющие воздействия стрелочными переводами и сигналами всех пунктов, подлежащих мониторингу и управлению.

В настоящее время все диспетчерские круги линий Московского метрополитена и персонал диспетчеров перевели в единый диспетчерский центр (ЕДЦ). Город и транспортное предприятие ГУП «Московский метрополитен» ставили задачу ускорить взаимодействие между диспетчерским персоналом четырех ключевых служб, а персонал, обеспечивающий ситуационное управление метрополитеном, должен был повысить эффективность и слаженность командной работы [24].

Реализована следующая схема: диспетчеры службы движения, электромеханической службы, службы электроснабжения и эскалаторной службы объединены в единое рабочее пространство – «Объединенный диспетчерский круг» (ОДК).

Данная схема позволяет диспетчерам ОДК существенно повысить оперативность реагирования (за счет сокращения времени передачи информации от службы к службе) на отклонения в нормальной работе метрополитена.

Рабочие места поездного диспетчера «ДЦХ1» и двух «ДЦХ3» оборудованы системой «ДЦ–ММ» и дополнены программой «ГИД» (для автоматического построения графика исполненного движения поездов по линии метрополитена). Программа «ДЦ–ММ» и программа «ГИД» позволяет поездному диспетчеру осуществлять контроль движения согласно установленному плановому графику движения пассажирских поездов (ПГД) и оперативно реагировать на изменения ситуации на конкретной линии метрополитена. «ДЦХ3» осуществляют контроль и управление отдельными объектами линии (станции).

Рабочие места инженеров-электронщиков дистанции ДЦ и ПОНАБ оборудованы новыми автоматизированными рабочими местами (АРМ). На базе

новых АРМ реализован круглосуточный мониторинг линейного оборудования «ДЦ-ММ», АРМ «ДЦХ1», АРМ «ДЦХ3», АРМ «ДСЦП».

В ЕДЦ реализована схема, собравшая в едином пространстве диспетчеров всех представленных в Московском метрополитене служб для повышения взаимодействия отработки нарушения нормальной работы метрополитена, что получило условное название «Центр организации перевозок» (ЦОП).

Комплекс устройств ДЦ включает в себя автоматическую блокировку на перегонах, электрическую централизацию на станциях и аппаратуру телеуправления и телесигнализации (ТУ–ТС), передающую управляющие и оповестительные сигналы. Развитием этих систем для нужд Московского метрополитена занимались ученые и разработчики МИИТа, возглавляемые д. т. н. профессором Л. А. Барановым [3]. С целью развития так называемого института диспетчеризации был создан и долгое время сопровождался тренажер поездного диспетчера [25–30]. Исследование функционирования систем ДЦ и их развитие продолжается [31]. Наряду с МИИТ (ныне РУТ) для нужд Петербургского метрополитена и магистрального железнодорожного сообщения ЛИИЖТ (ныне ПГУПС) параллельно, а где-то и совместно ведет не менее успешные разработки аналогичных систем [32, 33].

Среди недавних научных публикаций Люблянского университета найден качественный обзор имеющихся литературных источников по системам управления движением поездов. Показано место большого количества статей, опубликованных к моменту составления [34]. По результатам изучения статьи составлена схема (рис. 1) классификации и идентификации евроазиатского опыта использования систем управления движением поездов.

При подготовке схемы использованы материалы из зарубежных источников, связанных с системами управления движением поездов [35–41]. Из обзора [34] хорошо видно, что подавляющее большинство статей связано с таким показателем качества, как безопасность.

Крайне редко встречаются статьи о совместимости систем управления движением поездов и доступности этих систем. Эти темы являются узкоспециальными и перспективными. Им, безусловно, будет уделено повышенное внимание, когда мир программного обеспечения полностью откажется от использования десктопных приложений и перейдет на взаимосвязанные браузерные приложения, каждое из которых будет исполнять свою и только свою узкоспециальную функцию.

История развития европейских систем очень удачно проиллюстрирована (рис. 2) в брошюре, посвященной *ERTMS* и *ETCS* [42]. Эта иллюстрация позволяет мгновенно определить класс систем, на которые следует обратить внимание при заимствовании передового зарубежного опыта.

Следует отметить, что *ATP* сегодня признана устаревшей технологией и заменена на Европейскую систему управления железнодорожным сообщением (*European Rail Traffic Management System (ERTMS)*) [37].

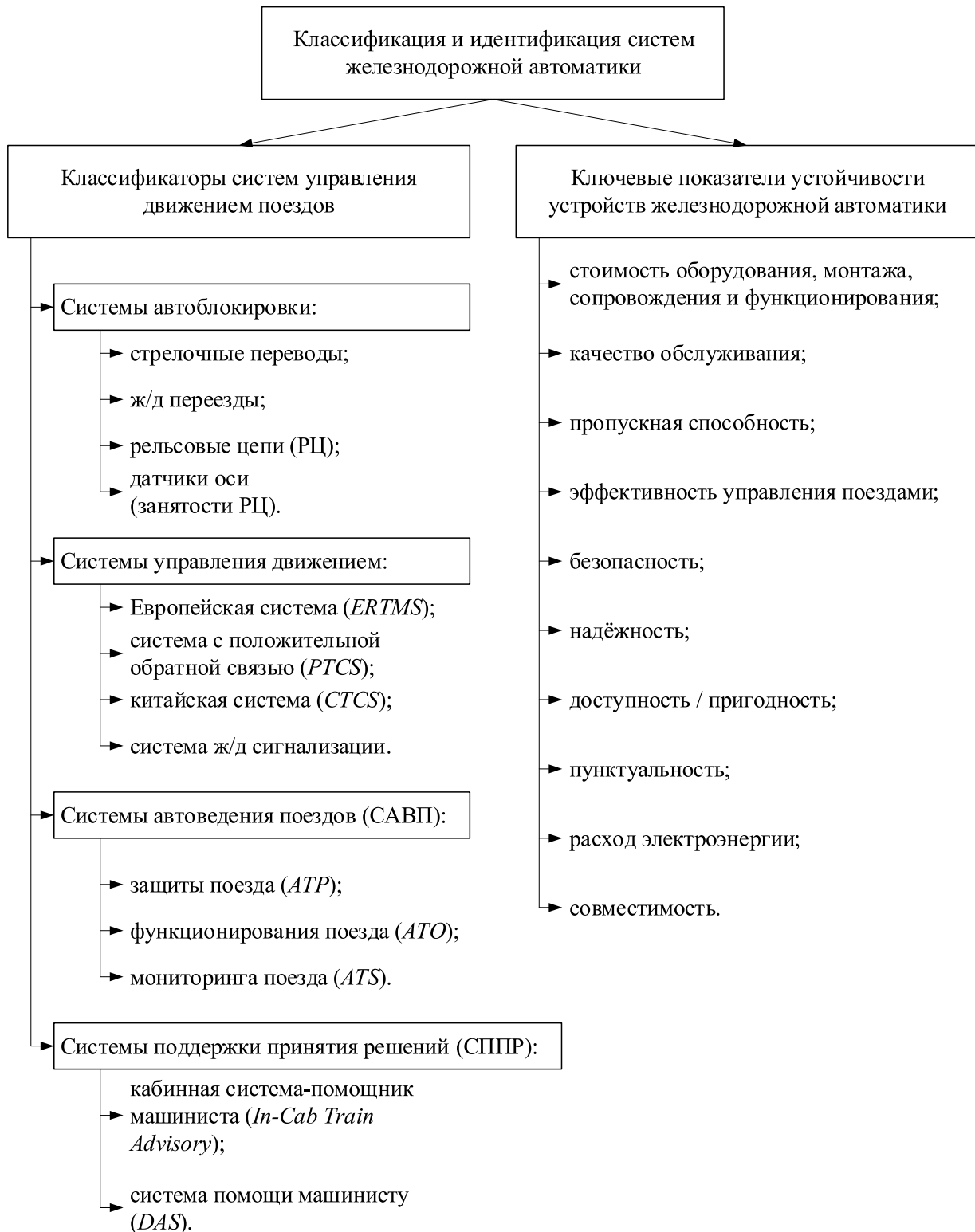


Рис. 1. Схема классификации и идентификации евроазиатского опыта использования систем управления движением поездов

Линии метрополитена оборудованы системой ДЦ и обеспечивают:

- управление из одного (или из ЕДЦ, или с терминала ДСЦП) пункта стрелками и сигналами станций;
- контроль на аппарате управления положением и занятостью стрелок, занятостью путей на станциях и на прилегающих к ним перегонах, а также повторение показаний светофоров на станциях с путевым развитием;
- возможность перехода на местное управление (с пульта-табло или непосредственно с пульта в релейной или с терминала ДСЦП) стрелками и сигналами на самой станции;
- выполнение требований, предъявляемых к электрической централизации, автоматической блокировке и системе автоматического регулирования скорости АЛС–АРС, применяемой в качестве самостоятельного средства сигнализации.

ДЦ дополняется устройствами автоматической записи ГИД, контроля номеров поездов или маршрутов, прибывающих на станции с путевым развитием, и устройствами протоколирования работы технических средств и действий оперативного персонала.

Группа поездных диспетчеров линии одновременно и управляет движением, и передает команды управления: задает маршруты следования поездов при нарушениях графика, открывает пригласительные сигналы светофоров для пропуска поездов без участия дежурных по станциям (ДСП), организует выполнение эффективных вариантов пропуска поездов, обеспечивает безопасность движения.

Система ДЦ Московского метрополитена (ДЦ–ММ) предназначена для мониторинга и контроля строгого исполнения ПГД, графика оборота (ГО) электроподвижного состава (ЭПС). ДЦ–ММ повышает уровень обеспечения безопасности движения поездов и является более высокотехнологичной системой по сравнению с аналогичными предыдущих поколений разработки [2, 43–48].

ДЦ–ММ обеспечивает управление движением поездов и полный контроль ситуации на линии метрополитена.

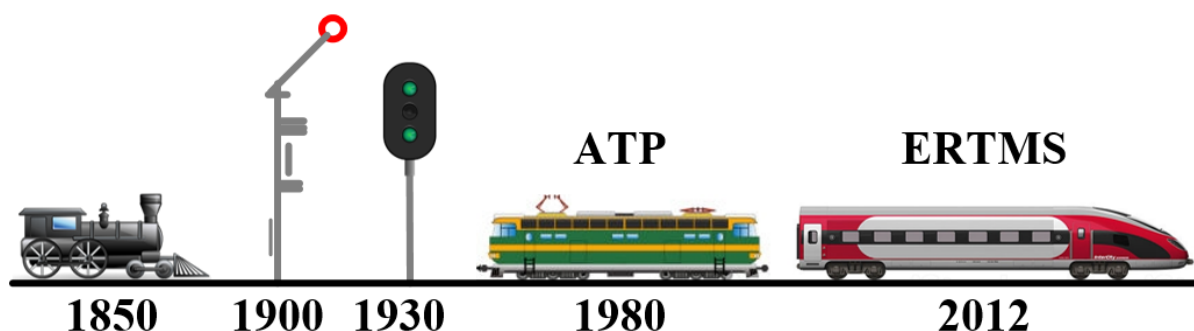


Рис. 2. История развития систем управления движением поездов

Благодаря внедрению и использованию ДЦ–ММ происходит управление объектами зоны мониторинга и контроля через автоматизированное рабочее место поездного диспетчера (АРМ ДЦХ) в режиме диспетчерского управления (ДУ) и через автоматизированное рабочее место дежурного станционного поста централизации, находящегося на станции (АРМ ДСЦП) в режиме местного управления (МУ–Т).

Процедура передачи станции из режима ДУ в режим МУ–Т осуществляется с участием двух работников Службы движения: ДЦХ и ДСЦП в пределах подконтрольной зоны управления. Перевод станции на МУ–Т осуществляется в соответствии с действующими нормативными документами [49]. Система исключает возможность подачи команд управления с АРМ ДСЦП в режиме ДУ и одновременное управление станций с разных АРМ ДЦХ в режиме ДУ.

Зоны управления ДЦ–ММ – линия метрополитена, станции с путевым развитием и прилегающими перегонами, соединительные ветви и пути электродепо. На рисунке 3 представлен графический пользовательский интерфейс АРМ ДСЦП.

Управление поездной работой в зоне мониторинга и контроля обеспечивается соблюдением максимальной расчетной пропускной способности линии метрополитена в соответствии с ранее составленным инженерами-графистами Службы движения ПГД при автоматическом отображении состояний объектов соответствующего иерархического уровня управления (зоны мониторинга и контроля или некоторого железнодорожного полигона (линии метрополите-

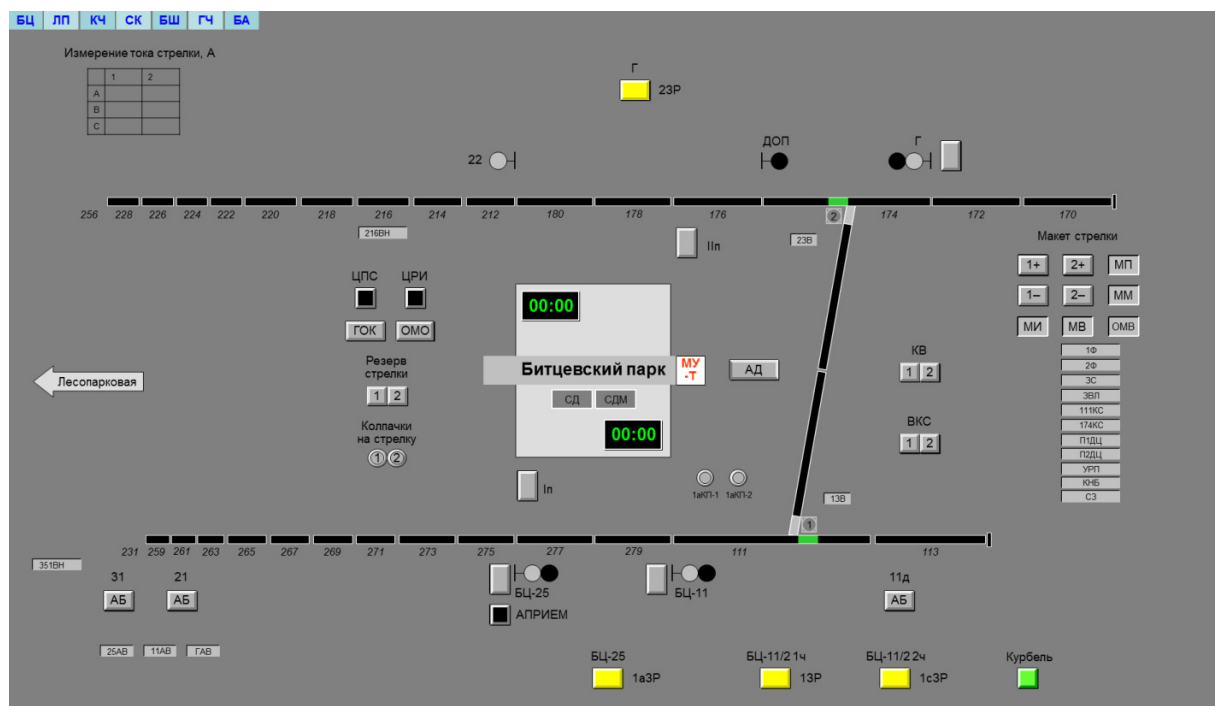


Рис. 3. Графический пользовательский интерфейс АРМ диспетчера поста централизации

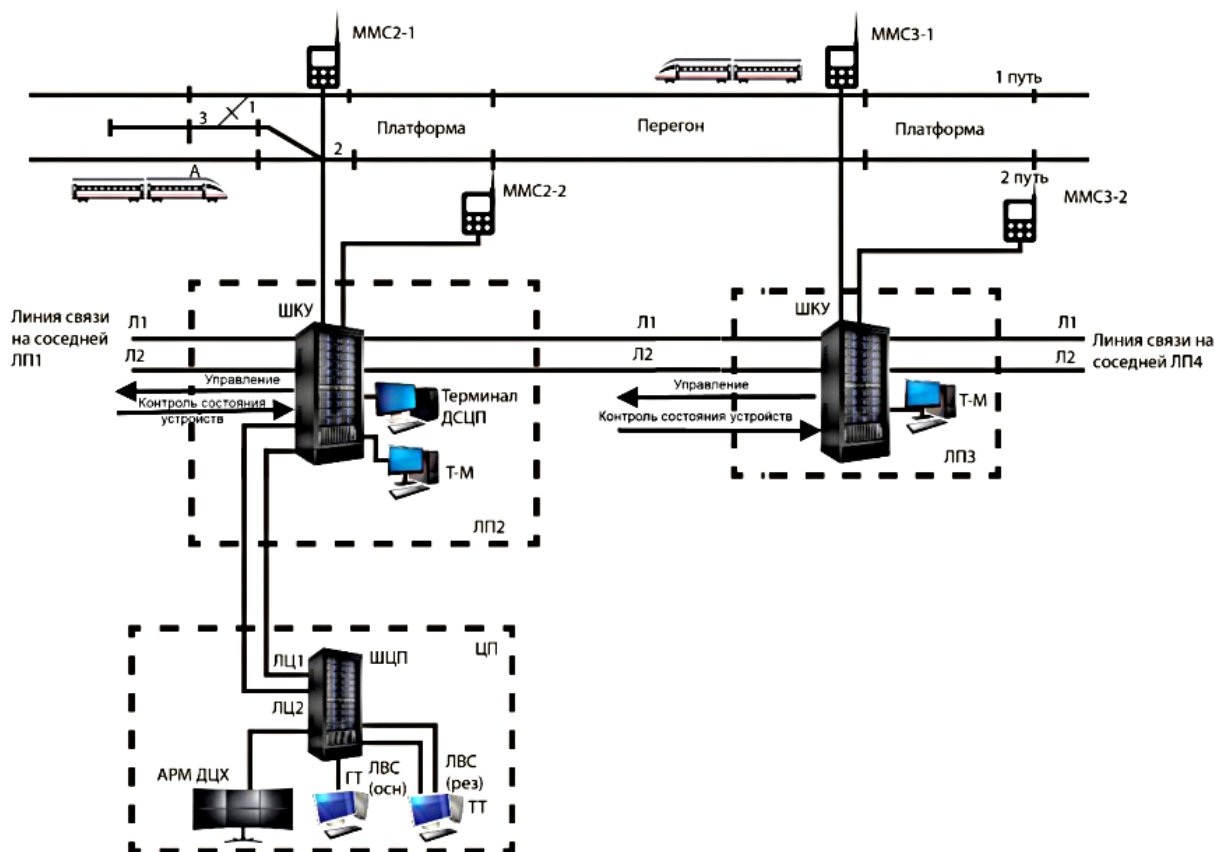


Рис. 4. Структурная схема устройств системы ДЦ–ММ

на)), сложившейся ситуации в движении поездов, предупреждающих сигналах с автоматическим воспроизведением звуковых сообщений.

Подсистемы контроля состояния объектов, логического контроля, мониторинга и диагностики, хранения технологических данных при этом функционируют в автоматическом режиме.

На рисунке 4 представлена структурная схема системы ДЦ–ММ, где:

ММС – модуль мобильной связи;

ШЦП – шкаф центрального поста, представляет собой сервер, осуществляющий обработку информации, приходящей от ШКУ;

ШКУ – шкаф контроля и управления, предназначен для формирования команд управления и обмена этой информацией с ШЦП (состояние напольных устройств, занятость рельсовых цепей, положение стрелок, показания светофоров, кнопочных реле, включение-выключение автоблокировки, наличие курбеля и других устройств);

АРМ ДЦХ – автоматизированное рабочее место поездного диспетчера, предназначенное для управления стрелками и сигналами из диспетчерского центра;

Л1, Л2 – основная и резервная линии связи;

ЛП1, ЛП2, ЛП3 – линейные пункты контроля и управления;

Т–М – терминал механика, предназначенный для мониторинга и диагностики устройств ЭЦ, перегонных устройств и просмотра архивной информации;

ЛЦ – линия связи со шкафом центрального поста;

ГТ – терминал инженера-графиста, предназначенный для формирования и корректировки ПГД;

ТТ – технический терминал, предназначенный для диагностики всех устройств в ДЦ;

ЦП – центральный пост.

Терминал ДСЦП – терминал дежурного по посту централизации, предназначенный для управления стрелками и сигналами, а также для составления маршрутов на станции.

Современные и перспективные системы ДЦ метрополитена могут дополняться функциями:

- автоматизированного отклика работы устройств ДЦ перед началом движения поездов;

- автоматического информирования о регламентных работах;

- автоматизированного составления ПГД;

- автоматизированного построения ГИД;

- составления сводных отчетов о перевозочном процессе;

- автоматизированного формирования и передачи приказов поездного диспетчера;

- получения необходимой справочной информации (по запросу);

- автоматического мониторинга источников бесперебойного питания (ИБП);
- ведения технологического видеонаблюдения за состоянием напольных устройств;

- и др.

Аппаратура системы ДЦ Московского метрополитена обеспечивает непрерывное круглосуточное функционирование с критерием качества «В» [50], допускающим кратковременную потерю выполнения функции и самовосстановление.

При одиночных отказах (сбоях) технических средств ДЦ Московского метрополитена функционирование системы не нарушается. Это обеспечивается за счет резервирования устройств, отвечающих за контроль и управление, серверов управления, узлов связи и каналов передачи данных.

2. Система автоматического считывания номера маршрута поезда

Система автоматического считывания номера маршрута поезда (АСНП–М) обеспечивает передачу с каждой станции (линейного пункта) на центральный пункт к устройствам ДЦ и на ТТ следующей информации [51]:

- номеров маршрутов поездов, головного вагона, находящихся на главных станционных путях;

– признака включения и отключения поездных устройств автоматического регулирования скорости (АРС);

– состояния последней по ходу движения поезда рельсовой цепи (РЦ) на каждом главном станционном пути и состояния смежной с ней РЦ по ходу движения поезда;

– положения стрелки на главном пути промежуточной станции, по которой поезд может уйти на соединительную ветку, в тупик или депо, и состояния стрелочной секции и одной из смежных с ней РЦ.

Система АСНП допускает отображение информации о номерах маршрутов поездов на блок-посту станции.

Система АСНП–М обеспечивает:

– передачу на поезд информации о номере станции и номере пути при проследовании поездом каждой станции;

– считывание с поезда информации о номере его маршрута и состоянии устройств АРС при проследовании поездом каждой станции (номер маршрута вводится в поездные устройства машинистом с наборного многофункционального пульта ПНМ).

Обмен данными между аппаратурой линейных пунктов и аппаратурой в центральном пункте обеспечивается по двум оптико-волоконным линиям связи (ВОЛС) через два порта Ethernet. Имеются два основных и два резервных волокна. В качестве ВОЛС и аппаратуры связи может использоваться оборудование, предусмотренное соответствующими проектами действующих устройств ДЦ.

Время, измеряемое с момента считывания информации с поезда до момента ее приема на центральном посту при числе линейных постов не менее 25, составляет не более 1,0 с.

Обмен данными между поездными и станционными устройствами АСНП обеспечивается через модули мобильной связи (ММС) по двум каналам – в инфракрасном диапазоне и по радиоканалу в диапазоне 434 МГц. Выходная мощность не превышает 1 мВт. Время обмена данными между поездными и станционными ММС в каждом канале – не более 0,1 с при скорости передачи 19 200 Бод в диапазоне 434 МГц и при скорости 57 600 Бод в инфракрасном диапазоне.

В диапазоне 434 МГц станционный модуль ММС обеспечивает вызов поезда по номеру пути движения. Исходно этот номер фиксируется поездными устройствами при вводе машинистом данных с наборного многофункционального пульта (ПНМ). Дальность обмена данными по радиоканалу на частоте 434 МГц составляет до 40 м. Инфракрасный канал – дублирующий. Он обеспечивает узконаправленный безадресный обмен данными с поездом на расстоянии до 15 м.

Основная аппаратура линейного пункта и в центре управления дублируется. При проектировании дублируются ВОЛС и устройства связи (УС).

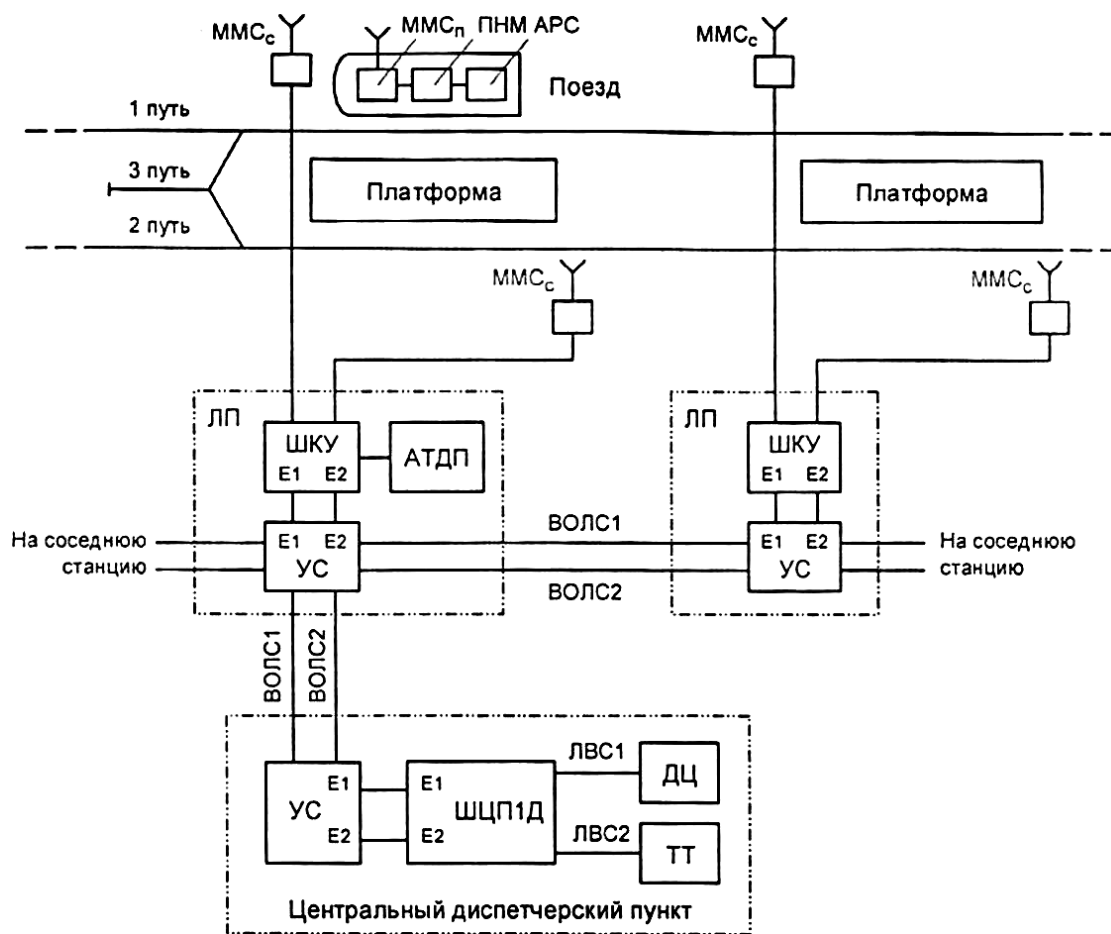


Рис. 5. Структурная схема АСНП

Принцип действия системы АСНП проиллюстрирован структурной схемой (рис. 5). На поезде, находящемся на линии, в контроллере пульта ПНМ [52] записана информация о номере маршрута и номере пути движения поезда. К нему поступает информация о состоянии устройств АРС. Контроллер управляет работой поездного модуля мобильной связи ММСп.

На каждой станции по обоим путям устанавливается стационарный модуль ММСс. Работой станционных модулей управляет контроллер, размещенный в шкафу ШКУ. Шкаф ШКУ устанавливается в станционном помещении.

Станционные модули ММСс располагаются в зоне знака «Остановка головного вагона» по каждому пути. Они поочередно (примерно через 150 мс) посылают на поезда сообщение, содержащее, в частности, номер пути и название станции. Поездной модуль ММСп начинает принимать это сообщение в диапазоне 434 МГц при нахождении поезда примерно в 40 м от места установки ММСс. В инфракрасном диапазоне прием сообщения начинается примерно в 10–15 м от места установки ММСс.

Сообщение на частоте 434 МГц содержит адресную часть с номером соответствующего пути и информационную часть. Если адрес в сообщении совпа-

дает с номером пути, записанным в поездном контроллере, то содержащаяся в сообщении информация со станции записывается в контроллер пульта ПНМ и отображается на его дисплее.

Сообщения в инфракрасном канале не содержат адресной части, поскольку в зону действия станционного ММСс может попасть только тот поезд, который находится непосредственно перед местом установки модуля ММСс. При расхождении сведений о номере маршрута поезда, полученных в разных каналах, приоритет будет отдан данным, полученным по инфракрасному каналу. Поэтому, если по выходу из электродепо состав не считался по инфракрасному каналу на первой станции, до следующей станции он проследует символьным обозначением, несмотря на то, что радиоканал работает и номер маршрута система получает.

После окончания приема сообщения от станционного ММСс поездной модуль ММСп включается в режим передачи и посылает на линейный пункт ЛП свое сообщение. Оно содержит, в частности, номер маршрута поезда и сведения о состоянии устройств автоматического регулирования скорости (АРС).

На линейном пункте ЛП данные, содержащиеся в принятых станционными модулями ММС сообщениях, передаются по линии и записываются в память контроллеров ШКУ. По этим же линиям обеспечивается электропитание модулей ММС. На станциях, где есть релейные помещения устройств АТДП, к контроллерам ШКУ поступают данные о состоянии рельсовых цепей и стрелок.

Через два порта Ethernet данные от ШКУ поступают в устройства связи УС и передаются ими по основной и резервной линиям ЛВС1 и ЛВС2 (совместно с потоками данных системы ДЦ) в центральный пункт. В центральном пункте эти данные через аналогичные порты поступают от устройств связи УС в шкаф центрального пункта ШЦП. От него необходимые для отображения данные поступают к устройствам ДЦ через локальную вычислительную сеть ЛВС1 системы ДЦ. Персональный компьютер ТТ подключается к ШЦП через другую сеть – ЛВС2.

ТТ служит для контроля работы АСНП–М, включая контроль взаимодействия стационарных и поездных ММС, для чего используется информация о состоянии РЦ и стрелок.

Аппаратура центрального диспетчерского пункта содержит:

- шкаф центрального пункта ШЦП;
- персональный компьютер ТТ.

Аппаратура линейного пункта содержит:

- шкаф линейного пункта типа ШКУ 100 с интегрированной системой АСНП;
- модуль мобильной связи ММС.

Устройства связи ВОЛС подключаются к двум портам Ethernet на линейных пунктах и на центральном пункте.

В кабине машиниста головного вагона поезда располагаются:

- модуль ММС;
- пульт наборный многофункциональный ПНМ.

Наборный многофункциональный пульт предназначен для ввода постоянных характеристик поезда, передаваемых посредством ММС.

3. Микропроцессорная централизация

МПЦ обеспечивает управление с основного или резервного автоматизированного рабочего места дежурного по посту централизации (АРМ ДСЦП). При наличии нескольких зон управления на станциях система обеспечивает управление каждой зоной с соответствующего АРМ ДСЦП.

При этом в системе соблюден принцип единоначалия, т. е. исключена возможность одновременного управления устройствами разными операторами.

Система обеспечивает следующие режимы управления:

- маршрутный – управление путем задания с АРМ ДСЦП основного или составного маршрутов;
- раздельный – поэлементное управление с индивидуальной выдачей на исполнение команд для каждого объекта управления.

По варианту управления:

- первый – управление осуществляется через первый комплект аппаратуры;
- второй – управление осуществляется через второй комплект аппаратуры.

МПЦ обеспечивает выполнение функций управления и контроля состояния объектов, диагностики технического состояния устройств, самодиагностики, протоколирование работы. По требованиям функциональной безопасности и исполнению системы МПЦ, внедряющиеся в Московском метрополитене, соответствуют европейским стандартам CENELEC и СТО РЖД [50].

Первый опыт внедрения МПЦ на Московском метрополитене произошел в 2015 году с продлением Сокольнической линии метро до станции «Саларьево».

Функции контроля и управления:

- контроль положения и режима работы стрелок;
- контроль состояния путей и изолированных участков (занятость, свобода, неисправность);
- контроль состояния (показания, неисправность) светофоров;
- контроль состояния (занятость, свобода) перегонов и участков приближения;
- контроль состояния других устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), приборов обнаружения нагрева букс (ПОНАБ), контрольно-габаритных устройств (КГУ) и других устройств и подсистем;

- контроль состояния устройств электроснабжения;
- отображение на экранах мониторов состояния (включение, выключение и т. п.) объектов контроля и управления;
- задание и отмена маршрутов, включая их искусственное размыкание;
- проверка условий безопасности движения поездов;
- автоматическое посекционное размыкание маршрута, в т. ч. размыкание неиспользованной части маршрута при угловых заездах;
- управление стрелками, светофорами и другими устройствами СЦБ, в т. ч. и направлением движения на перегонах;
- выключение и обратное включение в ЭЦ стрелок;
- автовозврат охранных стрелок в соответствии с проектом (с защитой от кратковременной потери шунта);
- управление аппаратом выдачи стрелочного курбеля;
- выбор и передача сигналов АЛС–АРС;
- взаимодействие с устройствами обдувки и электрообогрева стрелок, оповещения работников на пути и другими устройствами автоматики.

Функции самодиагностики аппаратуры:

- поддержание надежности функционирования аппаратуры на заданном уровне (предусмотрено автоматическое в соответствии с определенным регламентом переключение вычислительных средств при появлении отказов);
- полное тестирование аппаратного и программного обеспечения системы при включении после восстановления работоспособности и при внесении изменений в ее аппаратное и программное обеспечение, а также фоновое тестирование в процессе функционирования.

Функции протоколирования работы системы:

- протоколирование и хранение информации о состоянии объектов контроля, команд управления и действий ДСЦП, сообщений о сбоях и отказах функционирования устройств системы, результатов тестирования, самодиагностики устройств и их регламентных проверок;
- просмотр архива событий на АРМ ДСЦП и АРМ ШН в статическом, пошаговом и динамическом режимах с применением фильтров событий, возможность предоставления протокола событий в виде копии на носителе.

Обработка оперативной информации производится в соответствии с функциональными задачами на общей базе данных, содержащей сведения о состоянии напольных объектов.

Управление стрелками, светофорами, другими объектами СЦБ, задание и отмена маршрутов, выбор режимов управления выполняются ДСЦП с помощью устройств ввода соответствующих команд на АРМ ДСЦП.

ДСЦП получает доступ к управлению объектами только после своей регистрации на рабочем месте и подтверждения устройствами имеющихся у него полномочий [6].

При управлении стрелками в раздельном или маршрутном режиме исключается их перевод при занятом или замкнутом в маршруте путевом участке, в который входит управляемая или спаренная с ней стрелка. Автовозврат охранных стрелок осуществляется с применением защиты от кратковременной потери шунта (выдержка времени).

При управлении светофорами в раздельном или маршрутном режиме исключается:

- открытие поездного светофора, если в маршруте имеется занятый путевой изолированный участок (включая негабаритный), открытие маневрового светофора, если в маршруте есть занятый стрелочный путевой участок;

- открытие светофора, если стрелки (включая охранные), входящие в маршрут, не замкнуты или не имеют контроля требуемого положения;

- сохранение разрешающего показания светофора при потере контроля положения стрелки, входящей в маршрут (включая охранные), а также при занятии любого изолированного путевого участка, входящего в маршрут, за исключением первого участка за светофором и пути в маневровых маршрутах;

- погасшее или не соответствующее требованиям руководящих указаний состояние открытого светофора при перегорании лампы разрешающего огня в течение времени большего, чем время замедления, предусмотренное в системе, на перекрытие светофора с разрешающего показания на запрещающее показание;

- открытое состояние светофора при срабатывании КГУ и устройство контроля схода подвижного состава (УКСПС).

РПЦ исключает установку встречных маршрутов на любой участок пути в горловине станции.

Отмена неиспользованного маршрута выполняется при условии, что все путевые участки, входящие в маршрут, находятся в состоянии «свободен, замкнут», имеется контроль положения входящих в маршрут стрелок, на светофоре, ограждающем отменяемый маршрут, запрещающее показание.

При вступлении подвижного состава за светофор, ограждающий отменяемый маршрут, или нарушении целостности маршрута режим отмены сбрасывается, а маршрут остается замкнутым.

Автоматическое размыкание маршрута происходит только при поочередном занятии и освобождении путевых участков маршрута и выполнении следующих условий:

- размыкание секции происходит только при наличии контроля проследования по двум смежным путевым участкам;

- размыкание неиспользованной части маршрута при угловых заездах выполняется в начале движения в обратную сторону после занятия первого по ходу движения путевого участка и освобождения занятого путевого участка неиспользованной части маршрута.

Включение и выключение устройств пневмоочистки стрелок, оповещения работников на путях выполняется ДСЦП по мере необходимости отпращиванием соответствующей команды с АРМ ДСЦП.

Вспомогательный перевод стрелки производится ДСЦП при условии, что стрелка не замкнута в маршруте, с соблюдением мер по обеспечению безопасности движения поездов.

Искусственное размыкание путевых участков маршрута выполняется в случае невозможности отмены маршрута в штатном режиме, невыполнения автоматического размыкания их после прохода поезда или возникновения неисправности до его прохода. Искусственное размыкание выполняется при условии, что светофор, ограждающий маршрут, закрыт и обеспечена выдержка времени: три минуты для всех участков, находящихся в состоянии искусственного размыкания.

МПЦ в сравнении с централизацией стрелок и светофоров релейного типа имеет ряд преимуществ [1]:

- более высокий уровень надежности за счет дублирования многих узлов, в том числе центрального процессора, являющегося «сердцем» централизации;
- более высокий уровень обеспечения безопасности движения поездов за счет непрерывного обмена информацией между центральным процессорным устройством и объектами управления и контроля;
- повышенная информативность для эксплуатационного и технического персонала о состоянии устройств СЦБ;
- меньшая энергоемкость;
- возможность непрерывного архивирования действий эксплуатационного персонала по управлению объектами СЦБ и всей поездной ситуацией на станции, с последующим анализом необходимых ситуаций;
- встроенный диагностический контроль состояния аппаратных средств централизации и объектов управления и контроля;
- возможность регистрации номеров поездов, следующих через станцию, и всех отказов устройств СЦБ на станции и перегоне;
- значительно меньшие габариты оборудования и, как следствие, в три-четыре раза меньший объем помещений для его размещения;
- значительно меньший объем строительно-монтажных работ;
- пониженные затраты на эксплуатационное обслуживание;
- возможность замены на станциях централизаций устаревшего типа без строительства новых постов ЭЦ.

Таким образом, составленный обзор в деталях показывает, что системы МПЦ перспективны для качественного и эффективного использования на любых железнодорожных транспортных предприятиях. В передовых железнодорожных вузах преподаватели совместно с обучающимися ведут разработку лабораторных стендов для изучения принципов работы МПЦ [53]. В связи с этим вы-

сказывается рекомендация о расширении ведущими вузами соответствующей лабораторной базы.

Заключение

В статье выполнен обзор известных систем обеспечения безопасности движения поездов с учетом зарубежного (евроазиатского) опыта. Рассмотрены вопросы функционирования микропроцессорных систем управления в метрополитенах в отечественной практике, преимущественно на примере использования систем Московского метрополитена. В частности, рассмотрена система ДЦ–ММ, обеспечивающая безопасность движения поездов. Отмечена высокая роль этой и аналогичных систем для повышения значений ряда общепринятых показателей качества работы, таких как стоимость оборудования, уровень обслуживания, пропускная способность участков линий метрополитена, эффективность управления поездами, безопасность, надежность, доступность, пунктуальность, расход электроэнергии, совместимость.

Анализ работ ученых и разработчиков из исследовательских институтов Российской Федерации и зарубежных научных организаций показал, что упомянутые критерии качества микропроцессорных систем обладают заметным единством. Надежность работы устройств ДЦ достигается за счет того, что при одиночных отказах (сбоях) технических средств ДЦ метрополитена функционирование системы не нарушается. Это обеспечивается резервированием устройств, отвечающих за контроль и управление, серверов управления, узлов связи, а также каналов передачи данных.

Выполнен детализированный обзор структуры, функций и принципов работы системы автоматического считывания номера маршрута поезда, которая передает с подвижного состава на центральный пункт к устройствам ДЦ и на ТТ полезную и избыточную информацию. Сделан также обзор системы микропроцессорной централизации, режимов ее работы, функций контроля и управления, самодиагностики аппаратуры, протоколирования работы [54], реализация которых, бесспорно, повышает надежность функционирования технических средств, безопасность движения поездов, информативность диагностики, сокращает размеры занимаемых помещений и затраты на эксплуатацию.

Полученные результаты анализа функционирования систем МПЦ коррелируют с результатами исследования, полученными [1], а также зарубежными авторами. Рекомендовано развитие лабораторной базы железнодорожных вузов, которая позволит изучать рассмотренные в статье системы, повышать квалификацию персонала, работающего с ними и обслуживающего их. Специалисты смогут исследовать и развивать эти системы, улучшать показатели эффективности работы, адаптируя под специфические условия функционирования и унифицируя перечень компонентов, входящих в состав систем, подготавливая весь

аппарат диспетчеризации в целом к тотальному переходу от релейных устройств к микропроцессорным.

Библиографический список

1. *Шерстюков О. С.* Преимущества микропроцессорных централизаций перед релейными системами управления движением поездов на станциях / О. С. Шерстюков // Человек и общество в системе современных научных парадигм. – 2019. – № 1. – С. 32–35.
2. *Лаврик В. В.* Электрическая централизация стрелок и сигналов метрополитена / В. В. Лаврик. – М.: Транспорт, 1977. – 135 с.
3. *Баранов Л. А.* Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава / Л. А. Баранов, Я. М. Головичер, Е. В. Ерофеев, В. М. Максимов; под ред. Баранова Л. А. – М.: Транспорт, 1990. – 305 с.
4. *Ковкин А. Н.* Бесконтактное управление светофорами в системе микропроцессорной централизации МПЦ-МПК / А. Н. Ковкин // Автоматика на транспорте. – 2019. – Т. 5, № 3. – С. 307–325.
5. *Порошков В. С.* Модернизация рельсовых цепей в системах микропроцессорной централизации / В. С. Порошков // Стратегии и тренды развития науки в современных условиях. – 2019. – № 1. – С. 48–52.
6. Правила технической эксплуатации метрополитенов. – М.: ЗАО Издательский центр ТА Инжиниринг, 2003. – 109 с.
7. Военное обозрение. Крупнейшая авария в истории московского метро: как это было и кто ответил. – URL: <https://topwar.ru/160102-krupnejshaja-avarija-v-istorii-moskovskogo-metro-kak-jeto-bylo-i-kto-otvetil.html> (дата обращения: 29.03.2020 г.).
8. *Ning B.* Advanced Train Control Systems / B. Ning. – Southampton: WIT Press, 2010. – 158 p.
9. *Durmus M. S.* The application of automation theory to railway signaling systems: the Turkish national railway signaling project / M. S. Durmus, U. Yildirim M. T. Soylemez // Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. – 2013. – Vol. 19, Iss. 5. – P. 216–223. DOI: 10.5505/pajes.2013.14633.
10. *Шкуринов В. В.* Анализ работы аппаратно-программных средств микропроцессорных систем в сравнении с традиционными (релейными) системами электрической централизации / В. В. Шкуринов // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2014. – № 1. – С. 24–26.
11. *Шагиахметов Д. Р.* Особенности внедрения микропроцессорных систем централизации / Д. Р. Шагиахметов, Б. С. Байкенов, Ж. Т. Джулаева, А. Е. Касымова // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2016. – № 1. – С. 65–65.
12. *Сулейменова Г. А.* Проблемные аспекты разработки национальной системы микропроцессорной централизации стрелок и сигналов МПЦ-КАЗАТК / Г. А. Сулейменова, М. Б. Орунбеков // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. – 2017. – № 2. – С. 29–32.
13. *Шульц В. А.* Повышение пропускной способности участка дистанции сигнализации и связи путем применения современной системы диспетчерской централизации – «СЕ-ТУНЬ» / В. А. Шульц, К. Б. Бахытбекова // Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика: материалы XLII Международной научно-практической конференции КазАТК им. М. Тынышпаева. – 2018. – Т. 3. – С. 49–53.

14. *Laroche F.* European rail traffic management system (ERTMS): supporting competition on the European rail network? / F. Laroche, L. Guihery // *Research in Transportation Business and Management*. – 2013. – N 6. – P. 81–87.
15. *Cappart Q.* Verification of interlocking systems using statistical model checking / Q. Cappart, C. Limbree, P. Schaus, J. Quilbeuf, L.-M. Traonouez, A. Legay // *IEEE 18th International Symposium on High Assurance Systems Engineering (HASE)*. – 2017. – P. 61–68.
16. *Pachl J.* *Railway Operation and Control*. 4th edition / J. Pachl. – Washington: VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace, 2018. – 302 p.
17. *Ferrari A.* The Metrô Rio case study / A. Ferrary, A. Fantechi, G. Magnani, D. Grasso, M. Tempestini // *Science of Computer Programming*. – 2013. – Vol. 78. – P. 828–842.
18. *Fantechi A.* Formal methods for railway control systems / A. Fantechi, F. Flammini, S. Gnesi // *International Journal of Software Tools for Technology Transfer*. – 2014. – Vol. 16. – P. 643–646.
19. *Laapotti V.* Comparison of fatal motor vehicle accidents at passive and active railway level crossings in Finland / V. Laapotti // *IATSS Researches*. – 2016. – Vol. 40. – P. 1–6.
20. *Forsberg R.* Conditions affecting safety on the Swedish railway – train drivers’ experiences and perceptions / R. Forsberg // *Safety Science*. – 2016. – Vol. 85. – P. 53–59.
21. *Fernández-Rodríguez A.* Design of Robust and Energy-Efficient ATO Speed Profiles of Metropolitan Lines Considering Train Load Variations and Delays / A. Fernández-Rodríguez, A. Fernández-Cardador, A. P. Cucala, M. Domínguez, T. Gonsalves // *IEEE Transport. Intellectual Transportation Systems*. – 2015. – Vol. 16, N 4. – P. 2061–2071.
22. *Miyoshi M.* Development of an energy efficient train traffic control system for saving electricity / M. Miyoshi, T. Takeba, M. Miyatake // *WIT Trans Built Environ*. – 2012. – Vol. 127. – P. 499–510.
23. Урбанистический «Кот Шредингера». Зачем Москва перенимает опыт других столиц. – URL: <https://www.forbes.ru/biznes-photogallery/347433-urbanisticheskiy-kot-shredingera-zachem-moskva-perenimaet-opyt-drugih> (дата обращения: 29.03.2020 г.).
24. Собянин открыл Единый диспетчерский центр метро на севере Москвы. – URL: <https://tass.ru/moskva/6960663> (дата обращения: 29.03.2020 г.).
25. *Сидоренко В. Г.* Система поддержки принятия решения поездного диспетчера метрополитена / В. Г. Сидоренко // *Датчики и системы*. – 2001. – № 10. – С. 21–26.
26. *Баранов Л. А.* Тренажер поездных диспетчеров линий Московского метрополитена / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко // *Железные дороги мира*. – 2002. – № 8. – С. 64.
27. *Баранов Л. А.* Синтез законов централизованного управления движением поездов на линии метрополитена на базе имитационной модели / Л. А. Баранов, Л. Н. Воробьева // *Вестник МИИТ*. – 2004. – № 11. – С. 3.
28. *Балакина Е. П.* Автоматика выполняет функции диспетчера / Е. П. Балакина // *Мир транспорта*. – 2008. – Т. 6, № 2. – С. 104–109.
29. *Логонова Л. Н.* Роль системы автоматизированной проверки знаний поездных диспетчеров линии метрополитена в повышении качества обучения / Л. Н. Логонова // *Наука и техника транспорта*. – 2011. – № 1. – С. 62–65.
30. *Баранов Л. А.* Тренажер поездного диспетчера линии метрополитена / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, Е. В. Ерофеев, В. М. Максимов, Д. Б. Васьков // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. – 2012. – № 10. – С. 32.
31. *Баранов Л. А.* Беспилотная система управления движением поездов как составляющая цифровизации городского транспорта / Л. А. Баранов // *Автоматика на транспорте*. – 2019. – Т. 5, № 4. – С. 441–449.
32. *Сапожников Вл. В.* Микропроцессорные системы централизации / Вл. В. Сапожников, В. А. Кононов, С. А. Куренков, А. А. Лыков, О. А. Наседкин, А. Б. Никитин, А. А. Про-

- кофьев, М. С. Трясов. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2008. – 398 с.
33. Сапожников В. В. Особенности расчета и проектирования электроснабжения постов микропроцессорной централизации / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, А. Б. Никитин, В. А. Шагохин // Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта. Elltrans 2013. Тезисы докладов Седьмого международного симпозиума Elltrans 2013. – СПб.: ПГУПС, 2013. – С. 80–81.
 34. Krnac E. An evaluation of train control information systems for sustainable railway using the analytic hierarchy process (AHP) model / E. Krnac, B. Djordjevic // European Transport Research Review. – 2017. – N 9. – P. 35. DOI: 10.1007 / s12544-017-0253-9
 35. Emery D. Towards a versatile European driver advisory system / D. Emery // WIT Transactions on the Built Environment. – 2014. – Vol. 135. – P. 365–374.
 36. Fauser J. Dependability in open proof software with hardware virtualization – The railway control systems perspective / J. Fauser, J. Peleska // Science of Computer Programming. – 2014. – Vol. 91. – P. 188–210.
 37. Ghazel M. Formalizing a subset of ERTMS / ETCS specifications for verification purposes / M. Ghazel // Transportation Research Conference. – 2014. – Vol. 42. – P. 60–75.
 38. Bersani C. Rapid, robust, distributed evaluation and control of train scheduling on a single line track / C. Bersani, S. Qiu, R. Sacile, M. Sallak, W. Schon // Control Engineering Practice. – 2015. – Vol. 35. – P. 12–21.
 39. Zhu L. Communication-based train control (CBTC) systems with cooperative relaying: design and performance analysis / L. Zhu, F. R. Yu, B. Ning, T. Tang // IEEE Transport. Vehicular Technologies. – 2014. – Vol. 63, N 5. – P. 2162–2172.
 40. Carvajal-Carreño W. Fuzzy train tracking algorithm for the energy efficient operation of CBTC equipped metro lines / W. Carvajal-Carreño, A. P. Cucala, A. Fernández-Cardador // Engineering Application of Artificial Intelligence. – 2016. – Vol. 53. – P. 19–31.
 41. Wang J. Research on parallel control mechanism and its implementation in ATP / J. Wang, Y. Li, Y. Zhang // IEEE Transport. Intellectual Transportation Systems. – 2016. – Vol. 17, N 6. – P. 1652–1662.
 42. Railway Signalling. The ERTMS / ETCS signalling system. – URL: <http://www.railwaysignalling.eu/> (дата обращения: 29.03.2020).
 43. Системы управления движением поездов «Диалог». – URL: <https://asi-rzd.ru/nomera/2016-7/sistemi-upravleniya-dvijeniem-poezdov-dialog> (дата обращения: 29.03.2020 г.).
 44. Карвацкий С. Б. Диспетчерская централизация системы «Нева» / С. Б. Карвацкий, Н. Г. Егоренков, Н. Ф. Пенкин. – М.: Транспорт, 1973. – 216 с.
 45. Переборов А. С. Диспетчерская централизация: учебник для вузов / А. С. Переборов, О. К. Дрейман, Л. Ф. Кондратенко; под ред. В. В. Сапожникова. – М.: Транспорт, 1989. – 303 с.
 46. Гавзов Д. В. Системы диспетчерской централизации: учебник для вузов / Д. В. Гавзов, О. К. Дрейман, В. А. Кононов, А. Б. Никитин; под ред. В. В. Сапожникова. – М.: Маршрут, 2002. – 407 с.
 47. Карвацкий С. Б. Новые системы диспетчерской централизации / С. Б. Карвацкий, Н. Ф. Пенкин. – М.: Транспорт, 1971. – 216 с.
 48. Сапожников В. В. Концентрация и централизация оперативного управления движением поездов / В. В. Сапожников, Д. В. Гавзов, А. Б. Никитин. – М.: Транспорт, 2002. – 102 с.
 49. «Порядок передачи на МУ станции». – Указания начальника Московского метрополитена № 921 от 17.12.2004 г.; № 967 от 29.12.2004 г.

50. Категории стандартов. В зависимости от того, кто является сторонами (участниками) стандартизации, к какому географическому региону. – URL: <http://helpiks.org/1-117554.html> (дата обращения: 29.03.2020 г.).
51. Новиков В. Г. Диспетчерская централизация московского метрополитена: учебное пособие / В. Г. Новиков, А. И. Сафронов, А. А. Валвенкин, А. Ю. Ярославцев, Б. В. Горельшев, В. П. Зосимов. – М.: Российский университет транспорта (МИИТ), 2019. – 130 с.
52. Парсаков А. Система АСНП–М / А. Парсаков // Мое метро. – 2019. – № 7. – С. 9.
53. Артамонова А. А. Подготовка учебного стенда МПЦ / А. А. Артамонова // Труды 78-й студенческой научно-практической конференции РГУПС. – Воронеж: филиал РГУПС, 2019. – С. 15–18.
54. Новиков В. Г. Перспективы внедрения микропроцессорных систем управления и обеспечения безопасности движения поездов на Московском метрополитене / В. Г. Новиков; под ред. А. Б. Косарева, Г. В. Гогричани // Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта: материалы Всероссийской научно-практической конференции к 75-летию аспирантуры Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. Часть 2. – М.: РАС, 2019. – С. 300.

V. G. Novikov

A. I. Safronov

V. A. Kuzyukov

The departments of "Automation, Remote Control and Telecommunication on Railway Transport", and "Control and Information Protection", Russian University of Transport (MIIT), Moscow

MICROPROCESSOR-BASED TRAIN CONTROL SYSTEMS FOR THE MOSCOW SUBWAY

The paper is an overview of the microprocessor-based interlocking systems implemented on the Moscow subway.

The introduction of microprocessor-based control systems and ensuring the safety of train traffic on the Moscow subway is due to the need to replace obsolete relay electric interlocking systems. Such systems were developed and implemented on the subway back in 60–80s of the past century. Microprocessor-based systems have been chosen for use on the Moscow subway based on a previous detailed analysis of global experience. It was known that purchasing and installing microprocessor-based control systems would be cost-effective.

The microprocessor-based control systems related to subway train traffic comprise dispatch interlocking systems, relay and processor interlocking, microprocessor interlocking, as well as train traffic interval control systems based on the use of the generation IV tonal track circuits. Microprocessor-based interlocking systems operate continuously in real time. They provide automatic collection of information about the state of monitored interlocked elements while controlling them in real time.

This article analyzes the Eurasian experience of using train traffic control systems with a classification diagram of existing varieties of such systems drawn up on its basis. The image of the graphical user interface of an interlocking station dispatcher's automated workstation is shown on the example of the Bittsevsky Park station, Butovskaya line. A dispatch interlocking structural diagram of the Moscow subway is presented with a breakdown into interconnected modules and a system's detailed

description. The place of microprocessor-based interlocking systems in the educational process of leading railway universities is indicated.

Train traffic safety, microprocessor-based interlocking systems, Moscow subway, dispatch interlocking, automatic train route number reading system

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-268-293

References

1. *Sherstyukov O. S.* (2019) Preimushchestva mikroprotssessornykh tsentralizatsiy pered releynymi sistemami upravleniya dvizheniyem poyezdov na stantsiyakh [Advantages of microprocessor-based interlocking over relay train control systems at stations]. *Chelovek i obshchestvo v sisteme sovremennykh nauchnykh paradigm* [Man and society in the system of contemporary scientific paradigms], 2019, no. 1, pp. 32–35. (In Russian)
2. *Lavrik V. V.* (1977) Elektricheskaya tsentralizatsiya strelok i signalov metropolitena [Metro electrical interlocking control]. Moscow, Transport Publ., 1977, 135 p. (In Russian)
3. *Baranov L. A., Golovicher Ya. M., Erofeev E. V. & Maksimov V. M.* (1990) Mikroprotssessornyye sistemy avtovedeniya elektropodvizhnogo sostava [Microprocessor-based systems for automatic control of electric rolling stock]. Ed. by Baranov L. A. Moscow, Transport Publ., 1990, 305 p. (In Russian)
4. *Kovkin A. N.* (2019) Beskontaknoye upravleniye svetoforami v sisteme mikroprotssessornoy tsentralizatsii MPTs-MPK [Contactless control of traffic lights in the microprocessor-based computer interlocking system MPTs-MPK]. *Avtomatika na transporte* [Automatic Equipment in Transport], 2019, vol. 5, no. 3, pp. 307–325. (In Russian)
5. *Poroshkov V. S.* (2019) Modernizatsiya rel'sovykh tsepey v sistemakh mikroprotssessornoy tsentralizatsii [Upgrading track circuits in microprocessor-based interlocking systems]. *Strategii i trendy razvitiya nauki v sovremennykh usloviyakh* [Strategies and trends in the development of science in modern environment], 2019, no. 1, pp. 48–52. (In Russian)
6. (2003) *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii metropolitenov* [Rules for Technical Operation of Subways]. Moscow, ZAO Izdatel'skiy tsentr "TA Inzhiniring" ["TA Engineering" Publishing Center CJSC] Publ., 2003, 109 p. (In Russian)
7. *Voyennoye obozreniye. Krupneyshaya avariya v istorii moskovskogo metro: kak eto bylo i kto otvetil* [Military Review. The biggest accident in the history of the Moscow metro: how it happened and who was responsible]. URL: <https://topwar.ru/160102-krupnejshaja-avariya-v-istorii-moskovskogo-metro-kak-jeto-bylo-i-kto-otvetil.html> (accessed: 29.03.2020). (In Russian)
8. *Ning B.* (2010) Advanced Train Control Systems. Southampton, WIT Press, 2010, 158 p.
9. *Durmus M. S., Yildirim U., Soylemez M. T.* (2013) The application of automation theory to railway signaling systems: the Turkish national railway signaling project. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2013, vol. 19, iss. 5, pp. 216–223. DOI: 10.5505/pajes.2013.14633
10. *Shkurinov V. V.* (2014) Analiz raboty apparatno-programmnykh sredstv mikroprotssessornykh sistem v sravnenii s traditsionnymi (releynymi) sistemami elektricheskoy tsentralizatsii [Analysis of the operation of hardware and software of microprocessor-based systems in comparison with traditional (relay-based) electric interlocking systems]. *Bulletin of Belarusian State University of Transport: Science and Transport*, 2014, no. 1, pp. 24–26. (In Russian)
11. *Shagiakhmetov D. R., Baykenov B. S., Dzhulayeva Zh. T. & Kasymova A. E.* (2016) Osobennosti vnedreniya mikroprotssessornykh sistem tsentralizatsii [Specific features of

- the implementation of microprocessor-based interlocking systems]. *The Bulletin of Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpaev*, 2016, no. 1, pp. 65–65. (In Russian)
12. *Suleymenova G. A. & Orunbekov M. B.* (2017) Problemnyye aspekty razrabotki natsional'noy sistemy mikroprotssessornoy tseentralizatsii strelok i signalov MPTS-KAZATK [Problematic aspects of the development of a national microprocessor-based computer interlocking system MPTS-KazATC]. *Sovremennaya nauka: aktual'nyye problemy i puti ikh resheniya* [Modern Science: Current Problems and Ways to Solve Them], 2017, no. 2, pp. 29–32. (In Russian)
 13. *Shul'ts V. A. & Bakhytbekova K. B.* (2018) Povysheniye propusknoy sposobnosti uchastka distantsii signalizatsii i svyazi putem primeneniya sovremennoy sistemy dispetcherskoy tseentralizatsii – “SETUN” [Increasing the throughput of the signaling and communication distance section through the use of a modern dispatch interlocking system “SETUN”]. *Innovatsionnyye tekhnologii na transporte: obrazovaniye, nauka, praktika* [Innovative technologies in transport: education, science, practice]. *Materialy XLII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii KazATK im. M. Tynyshpaeva* [Proceedings of the XLII International Scientific and Practical Conference of KazATC n. a. M. Tynyshpaev], 2018, vol. 3, pp. 49–53. (In Russian)
 14. *Laroche F. & L. Guihery* (2013) European rail traffic management system (ERTMS): supporting competition on the European rail network? *Research in Transportation Business and Management*, 2013, no. 6, pp. 81–87.
 15. *Cappart Q., Limbree C., Schaus P., Quilbeuf J., Traonouez L.-M. & Legay A.* (2017) Verification of interlocking systems using statistical model checking. *IEEE 18th International Symposium on High Assurance Systems Engineering (HASE)*, 2017, pp. 61–68.
 16. *Pachl J.* (2018) *Railway Operation and Control*. 4th edition. Washington, VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace, 2018, 302 p.
 17. *Ferrari A., Fantechi A., Magnani G., Grasso D. & Tempestini M.* (2013) The Metrô Rio case study. *Science of Computer Programming*, 2013, vol. 78, pp. 828–842.
 18. *Fantechi A., Flammini F. & Gnesi S.* (2014) Formal methods for railway control systems. *International Journal of Software Tools for Technology Transfer*, 2014, vol. 16, pp. 643–646.
 19. *Laapotti V.* (2016) Comparison of fatal motor vehicle accidents at passive and active railway level crossings in Finland. *IATSS Researches*, 2016, vol. 40, pp. 1–6.
 20. *Forsberg R.* (2016) Conditions affecting safety on the Swedish railway – train drivers' experiences and perceptions. *Safety Science*, 2016, vol. 85, pp. 53–59.
 21. *Fernández-Rodríguez A., Fernández-Cardador A., Cucala A. P., Domínguez M. & Gonsalves T.* (2015) Design of Robust and Energy-Efficient ATO Speed Profiles of Metropolitan Lines Considering Train Load Variations and Delays. *IEEE Transport. Intellectual Transportation Systems*, 2015, vol. 16, no. 4, pp. 2061–2071.
 22. *Miyoshi M., Takeba T. & Miyatake M.* (2012) Development of an energy efficient train traffic control system for saving electricity. *WIT Trans Built Environ*, 2012, vol. 127, pp. 499–510.
 23. Urbanisticheskiy “Kot Shryodingera”. *Zachem Moskva perenimayet opyt drugikh stolits* [Urban “Schrödinger's cat”. Why is Moscow adopting the experience of other capitals]. URL: <https://www.forbes.ru/biznes-photogallery/347433-urbanisticheskiy-kot-shredingera-zachem-moskva-perenimaet-opyt-drugih> (accessed: 29.03.2020). (In Russian)
 24. *Sobyanin otkryl Edinyy dispetcherskiy tsentr metro na severe Moskvyy* [Sobyanin opens the Unified Metro Dispatch Center in the north of Moscow]. URL: <https://tass.ru/moskva/6960663> (accessed: 29.03.2020). (In Russian)
 25. *Sidorenko V. G.* (2001) Sistema podderzhki prinyatiya resheniya poyezdnogo dispetchera metropolitena [Subway train dispatcher decision support system]. *Datchiki i sistemy* [Sensors & Systems], 2001, no. 10, pp. 21–26. (In Russian)

26. Baranov L. A. & Sidorenko V. G. (2002) Trenazhyor poyezdnykh dispetcherov linii Moskovskogo metropolitena [Simulator for train dispatchers of Moscow metro lines]. *Zheleznyye dorogi mira* [Railways of the world], no. 8, pp. 64. (In Russian)
27. Baranov L. A. & Vorob'yeva L. N. (2004) Sintez zakonov tsentralizovannogo upravleniya dvizheniyem poyezdov na linii metropolitena na baze imitatsionnoy modeli [Synthesis of the train traffic interlocking control laws on subway lines based on a simulation model]. *Bulletin of MIIT*, 2004, no. 11, pp. 3. (In Russian)
28. Balakina E. P. (2008) Avtomatika vpolnyayet funktsii dispetchera [Automation performing the dispatcher functions]. *World of Transport and Transportation*, 2008, no. 6, no. 2, pp. 104–109. (In Russian)
29. Loginova L. N. (2011) Rol' sistemy avtomatizirovannoy proverki znaniy poyezdnykh dispetcherov linii metropolitena v povyshenii kachestva obucheniya [The role of the subway train dispatcher automated knowledge testing system in improving the quality of training]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology in Transport], 2011, no. 1, pp. 62–65. (In Russian)
30. Baranov L. A., Sidorenko V. G., Erofeev E. V., Maksimov V. M. & Vas'kov D. B. (2012) Trenazhyor poyezdnogo dispetchera linii metropolitena [Simulator for a subway line train dispatcher]. *Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2012, no. 10, pp. 32. (In Russian)
31. Baranov L. A. (2019) Bepilotnaya sistema upravleniya dvizheniyem poyezdov kak sostavlyayushchaya tsifrovizatsii gorodskogo transporta [Unmanned train control system as a component of urban transport digitalization]. *Avtomatika na transporte* [Automatic Equipment in Transport], 2019, vol. 5, no. 4, pp. 441–449. (In Russian)
32. Sapozhnikov V. V., Kononov V. A., Kurenkov S. A., Lykov A. A. et al. (2008) Mikroprotsessornyye sistemy tsentralizatsii [Microprocessor-based interlocking systems]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Railway educational training center] Publ., 2008, 398 p. (In Russian)
33. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Nikitin A. B. & Shatokhin V. A. (2013) Osobennosti raschyota i proyektirovaniya elektrosnabzheniya postov mikroprotsessornoy tsentralizatsii [Specific features of calculation and design of power supply for microprocessor-based interlocking stations]. *Elektrifikatsiya i razvitiye infrastruktury energoobespecheniya tyagi poyezdov skorostnogo i vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta. Tezisy dokladov Sed'mogo mezhdunarodnogo simpoziuma Elltrans 2013* [Electrification and development of power supply infrastructure for traction of rapid and high-speed rail transport. Abstracts of the Seventh International Symposium Elltrans 2013]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2013, pp. 80–81. (In Russian)
34. Krmac E. & Djordjevic B. (2017) An evaluation of train control information systems for sustainable railway using the analytic hierarchy process (AHP) model. *European Transport Research Review*, 2017, no. 9, pp. 35. DOI: 10.1007/s12544-017-0253-9
35. Emery D. (2014) Towards a versatile European driver advisory system. *WIT Transactions on the Built Environment*, 2014, vol. 135, pp. 365–374.
36. Fauser J. & Peleska J. (2014) Dependability in open proof software with hardware virtualization – The railway control systems perspective. *Science of Computer Programming*, 2014, vol. 91, pp. 188–210.
37. Ghazel M. (2014) Formalizing a subset of ERTMS / ETCS specifications for verification purposes. *Transportation Research Conference*, 2014, vol. 42, pp. 60–75.
38. Bersani C., Qiu S., Sacile R., Sallak M. & Schon W. (2015) Rapid, robust, distributed evaluation and control of train scheduling on a single line track. *Control Engineering Practice*, 2015, vol. 35, pp. 12–21.

39. Zhu L., Yu F.R., Ning B. & Tang T. (2014) Communication-based train control (CBTC) systems with cooperative relaying: design and performance analysis. *IEEE Transport. Vehicular Technologies*, 2014, vol. 63, no 5, pp. 2162–2172.
40. Carvajal-Carreño W., Cucala A.P. & Fernández-Cardador A. (2016) Fuzzy train tracking algorithm for the energy efficient operation of CBTC equipped metro lines. *Engineering Application of Artificial Intelligence*, 2016, vol. 53, pp. 19–31.
41. Wang J., Li Y. & Zhang Y. (2016) Research on parallel control mechanism and its implementation in ATP. *IEEE Transport. Intellectual Transportation Systems*, 2016, vol. 17, no. 6, pp. 1652–1662.
42. *Railway Signalling. The ERTMS / ETCS signalling system*. URL: <http://www.railwaysignalling.eu/> (accessed: 29.03.2020).
43. *Sistemy upravleniya dvizheniyem poyezdov "Dialog"* [Train traffic control systems "Dialog"]. URL: <https://asi-rzd.ru/nomera/2016-7/sistemi-upravleniya-dvijeniem-poezdov-dialog> (accessed: March 29, 2020). (In Russian)
44. Karvatskiy S. B., Egorenkov N. G. & Penkin N. F. (1973) Dispetcherskaya tsentralizatsiya sistemy "Neva" [Dispatch interlocking of the "Neva" system]. Moscow, Transport Publ., 1973, 216 p. (In Russian)
45. Pereborov A. S., Dreiman O. K. & Kondratenko L. F. (1989) Dispetcherskaya tsentralizatsiya: uchebnik dlya vuzov [Dispatch interlocking: textbook for universities]. Edited by V. V. Sapozhnikov. Moscow, Transport Publ., 1989, 303 p. (In Russian)
46. Gavzov D. V., Dreiman O. K., Kononov V. A. & Nikitin A. B. (2002) Sistemy dispetcherskoy tsentralizatsii: uchebnik dlya vuzov [Dispatch interlocking systems: textbook for universities]. Edited by V. V. Sapozhnikov. Moscow, Marshrut Publ., 2002, 407 p. (In Russian)
47. Karvatskiy S. B. & Penkin N. F. (1971) Novyye sistemy dispetcherskoy tsentralizatsii [New dispatch interlocking systems]. Moscow, Transport Publ., 1971, 216 p. (In Russian)
48. Sapozhnikov V. V., Gavzov D. V. & Nikitin A. B. (2002) Kontsentratsiya i tsentralizatsiya operativnogo upravleniya dvizheniyem poyezdov [Concentration and centralization of train traffic operational management]. Moscow, Transport Publ., 2002, 102 p. (In Russian)
49. *Poryadok peredachi na MU stantsii* [The order of transmission to a station control bus]. Instructions of the Head of the Moscow Metro No. 921 dated December 17, 2004. No. 967 dated December 29, 2004. (In Russian)
50. *Kategorii standartov. V zavisimosti ot togo, kto yavlyayetsya storonami (uchastnikami) standartizatsii, k kakomu geograficheskomu regionu* [Categories of standards depending on the parties (participants) of standardization, and the geographic regions they are attributed to]. URL: <http://helpiks.org/1-117554.html> (accessed: March 29, 2020). (In Russian)
51. Novikov V. G., Safronov A. I., Valvenkin A. A., Yaroslavtsev A. YU., Gorelyshev B. V. & Zosimov V. P. (2019) Dispetcherskaya tsentralizatsiya moskovskogo metropolitena: uchebnoye posobiye [Dispatch interlocking of the Moscow metro: Training manual]. Moscow, MIIT Publ., 2019, 130 p. (In Russian)
52. Parsakov A. (2019) Sistema ASNP–M [ASNP–M system for train number automatic reading]. *Moye metro* [My Metro corporate journal], 2019, no. 7, pp. 9. (In Russian)
53. Artamonova A. A. (2019) Podgotovka uchebnogo stenda MPTs [Preparation of the training simulator for microprocessor-based computer interlocking system]. *Trudy 78-y studencheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the 12th Students Scientific and Practical Conference held by RSTU]. Voronezh, RSTU Branch Publ., 2019, pp. 15–18. (In Russian)
54. Novikov V. G. (2019) Perspektivy vnedreniya mikroprotsessornykh sistem upravleniya i obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poyezdov na Moskovskom metropolitene [Prospects for the introduction of microprocessor-based control systems and ensuring the train traffic

safety on the Moscow metro]. *Aktual'nyye voprosy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta. Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii k 75-letiyu aspirantury Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [Relevant issues of the development of railway transport. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 75th anniversary of the postgraduate programme at the Railway Research Institute]. Part 2. Ed. by A. B. Kosarev, G. V. Gogrichiani. Moscow, RAS Publ., 2019, pp. 300. (In Russian)*

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Л. А. Барановым
Поступила в редакцию 20.02.2020, принята к публикации 14.04.2020*

НОВИКОВ Вячеслав Геннадьевич — доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта (МИИТ)

e-mail: 9268888805@mail.ru

САФРОНОВ Антон Игоревич — доцент кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта (МИИТ)

e-mail: safronov-ai@mail.ru

КУЗЮКОВ Василий Александрович — доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта (МИИТ)

e-mail: Super-1990@yandex.ru

© Новиков В. Г., Сафронов А. И., Кузюков В. А., 2020

УДК 656.212.5

К. Е. Ковалев, канд. техн. наук

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

В. Л. Белозеров, д-р экон. наук

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

В. А. Шаров, д-р техн. наук

*Кафедра «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте»,
Российский университет транспорта, Москва*

МОДЕЛЬ ЗАГРУЖЕННОСТИ ОПЕРАТИВНО-ДИСПЕТЧЕРСКОГО ПЕРСОНАЛА НА МАЛОДЕЯТЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ

В статье рассмотрена актуальная для железнодорожного транспорта тема функционирования малодеятельных железнодорожных линий. Функционирование этого вида линий экономически невыгодно, но приостановка их деятельности невозможна с государственной точки зрения.

Современные исследования по данной тематике направлены на снижение затрат функционирования таких линий с учетом сохранения надежности работы устройств и их производительности. Малодеятельные линии могут служить полигоном для внедрения новых технических и технологических решений, которые в дальнейшем можно применить и на интенсивных направлениях.

Актуален вопрос о потребном количестве оперативного персонала, выполняющего поездную и маневровую работу на направлении. Поездной и маневровой работы здесь мало, что приводит к слабой загрузке оперативного персонала. С этой целью в статье построена модель зависимости потребного количества дежурных по станции от числа транзитных грузовых поездов и местных вагонов на участке. Модель позволяет прогнозировать потребное количество дежурных по станции при изменении объема и характера поездной и местной работы. Приведена оценка сложности алгоритма и полученной модели. Сделан вывод об адекватности модели и дана интерпретация полученных результатов в части количества дежурных по станции и снижения их загрузки с помощью применения малолюдных технологий. Достоинством данной модели является простота расчета и алгоритма.

Малодеятельные линии, загрузка оперативного персонала, пропускная способность, железнодорожный транспорт

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-294-308

Введение

В наследство от предыдущей системы государственного управления нашей стране досталась разветвленная сеть железнодорожных линий. При их проектировании и строительстве пропускная и перерабатывающая способности закладывались с учетом производственных мощностей в регионе. Отметим, что данная проблема актуальна и для транспортных компаний на постсоветском пространстве [1].

В условиях рыночной экономики большинство работавших ранее предприятий закрылись либо диверсифицировали производство и оптимизировали цепи поставок сырья и готовой продукции не в пользу железнодорожного транспорта. Этот фактор серьезно влияет на социально-экономическое развитие регионов. Действительный член Российской академии транспорта Л. В. Тербенев отмечает: «Важнейшим фактором в процессе конструирования социально-экономической модели развития Ленинградской области и государства в целом является рост протяженности малоинтенсивных (малодеятельных) линий, станций, узлов» [2]. Уже к 2008 году протяженность убыточных железнодорожных линий в России составляла более 8000 км, а численность персонала, занятого на их обслуживании, – более 10 000 человек.

К малодеятельным относятся линии с малым размером пассажирского и грузового движения, с грузонапряженностью не более 5,0 млн т-км брутто/км в год [3]. В зависимости от расположения и характера работы малодеятельные линии подразделяются на транзитные, тупиковые, пограничные. Такие линии убыточны, а их эксплуатационные расходы превышают 4 млн рублей в год, что лишь в незначительной части покрывается доходами от перевозок.

Целью статьи является разработка модели (на основе анализа статистических данных), позволяющей определять потребное количество дежурных по станции на малодеятельной линии в зависимости от набора факторов. Для этого были собраны и обработаны статистические данные о размерах движения на малодеятельных участках, а также о виде и характере местной грузовой работы.

1. Современное состояние вопроса в области эксплуатации малодеятельных линий

В последние годы вопросам эксплуатации малодеятельных линий на отечественных железных дорогах посвящено множество научно-исследовательских работ [4, 5, 6, 7].

Актуальная проблема – разработка методики выбора целесообразного типа подвижного состава для обслуживания малоинтенсивных линий пригородного пассажирского сообщения. Задачу предложено решать с использованием классического метода линейного программирования, где в качестве целевой выбрана функция минимизации затрат на организацию движения по малодеятельному

пригородному участку. В статье также дано детальное описание математических зависимостей при нахождении себестоимости перевозок пассажиров – поездом локомотивной тяги малой составности, рельсовым автобусом и дизель-поездом. Приведены детальные формулы расчета расходов, связанных с перемещением пригородных поездов, включая оборот составов, расходы, связанные с посадкой и высадкой пассажиров, в зависимости от типа подвижного состава.

Рассмотренная методика позволяет определять вариант организации движения при минимальном числе свободных мест и с учетом характеристик возможных типов подвижного состава. Очевидно, что потребное количество вагонов в составе пригородного поезда должно определяться плотностью пассажиропотока. При коэффициенте использования предложенных мест 0,7–0,85 целесообразно устанавливать регулярное пригородное сообщение с учетом сезонной и суточной неравномерности.

При эксплуатации малодеятельных линий важна разработка и организация экономически эффективных, технически современных средств оперативно-технологической связи (ОТС).

В работе [8] описана технология и результаты перевода ОТС на каналы фиксированной спутниковой связи (на одной из малодеятельных линий Свердловской железной дороги). В частности, для организации взаимодействия центров управления с местом проведения аварийно-восстановительных работ на малодеятельных участках и внутри самого участка применялось оборудование спутниковой связи и беспроводного доступа. Оно включало в себя станцию спутниковой связи Инмарсат ВGAN «Hughes 9250» с антенной, базовую станцию и носимые телефонные трубки DECT, а также приемник видео- и аудиосигналов. Авторы утверждают, что применение перечисленных устройств сокращает время проведения ремонтных, строительных и аварийно-восстановительных работ, улучшает оперативность и достоверность передачи сведений с помощью видеoinформации. Представленный подход позволяет снизить капитальные вложения на сооружение каналов передачи данных.

Работа [9] посвящена анализу особенностей организации цифровой радиосвязи и передачи данных между станциями на малодеятельных линиях с учетом минимальных затрат на внедрение и эксплуатацию. Авторы отмечают преимущество технологии DMR (Digital Mobile Radio) перед технологиями GSM-R (Global System for Mobile communications – Railway) и TETRA (Terrestrial Trunked Radio) и предлагают применять ее для организации станционной и поездной цифровой радиосвязи (СРС-Ц и ПРС-Ц соответственно) на указанных линиях. Выполнен расчет дальности действия СРС-Ц и ПРС-Ц, определены их технические параметры и характеристики для условий эксплуатации на малодеятельных линиях. Доказана целесообразность применения цифровой радиосвязи ввиду отсутствия контактной сети на станциях и перегонах. Обоснована возможность устанавливать радиопередатчики мощностью 5 Вт на высоте 5 м от уровня головки рельсов, что обеспечит дальность действия радиосигнала

до 4 км с надежностью 99 %. С увеличением параметров мощности датчика и высоты установки передающей антенны дальность действия радиосигнала возрастает.

Вопросы повышения эффективности и обоснованности использования инфраструктуры на малодеятельных линиях в современных условиях реструктуризации ОАО «РЖД» освещаются в работе [10]. Предложены подходы к созданию программно-технического комплекса ситуационного центра (автоматизированная интеллектуальная система управления и мониторинга). Отмечено, что «адаптивный механизм использования инфраструктуры линий – это композиция процедур прогнозирования, планирования, финансирования и стимулирования эффективной деятельности линий, построенных на единой нормативно-методической базе». При этом основное внимание уделено здесь рассмотрению механизмов рационального и оптимального использования именно технических (инфраструктурных) ресурсов малодеятельных линий.

Малодеятельные линии можно классифицировать в зависимости от их назначения.

1. Линии Министерства обороны Российской Федерации, Министерства чрезвычайных ситуаций и других ведомств.

2. Малоинтенсивные линии с перспективой повышения нагрузки. Могут рассматриваться как обходные маршруты интенсивных железнодорожных линий.

3. Убыточные малодеятельные участки, которые могут быть переданы путям необщего пользования.

Сейчас около 19,4 % всей эксплуатационной длины железных дорог Российской Федерации являются малодеятельными (рис. 1). Наибольшая доля



Рис. 1. Соотношение интенсивных и малодеятельных линий

малодеятельных участков находится на полигонах Московской, Октябрьской, Дальневосточной и Северной железных дорогах.

Исходя из анализа работ, посвященных вопросам эксплуатации малодеятельных линий на сети ОАО «РЖД», установлено, что законсервировать их невозможно в силу социального и оборонного значения последних. Линии позволяют связывать отдаленные населенные пункты с крупными региональными центрами и обеспечивать местное население рабочими местами, содействовать организации специальных заказов на воинские перевозки [11]. Однако существующие размеры движения и уровень автоматизации отдельных технологических операций привели к снижению загруженности оперативного персонала станций. Работа дежурных по станции, приемосдатчиков, составителей и др. приобрела разъездной характер. В силу всех этих причин нерационально распределяется фонд оплаты труда, оперативный персонал загружен в течение месяца весьма неравномерно.

Анализ международного опыта [12, 13, 14, 15, 16] показал, что государственно-частное партнерство и конкуренция в транспортной отрасли [17, 18] позволяют снизить риски и потери при организации движения поездов на малодеятельных направлениях [19, 20, 21].

Указанные предпосылки и описанная проблематика свидетельствуют об актуальности задачи по разработке механизмов автоматизированного адаптивного расчета динамической загрузки оперативно-диспетчерского персонала на станциях малодеятельных линий.

2. Методы исследования и предлагаемая модель

Малодеятельные участки – это участки с размерами движения пассажирских и грузовых поездов по графику не более восьми пар в сутки. В некоторых современных источниках понятие «малодеятельные линии» заменили на «малоинтенсивные линии». Малоинтенсивные линии – железнодорожные пути с невысокой грузонапряженностью и низкой эффективностью работы.

Согласно Постановлению Правительства РФ от 27.03.2018 № 330 «Об утверждении критериев отнесения железнодорожных путей общего пользования к малоинтенсивным линиям (участкам)», определен следующий критерий: грузонапряженность не более 5 млн т-км брутто/км в год и размеры грузовых и пассажирских поездов не более восьми пар поездов в сутки (16 поездов в сутки). В соответствии с перечисленными условиями создан алгоритм распределения зон управления на малодеятельной линии (рис. 2).

Разработана методика расчета загруженности оперативного персонала. Затраты времени дежурного по станции на выполнение каждой r -й функции управления t_{ovr} рассчитываются по формуле:

$$t_{ovr} = \sum_{i=1}^m t_{oi} + \sum_{j=1}^n t_{oj} q_j + \sum_{k=1}^n t_k (1 - q_j), \forall v, r,$$

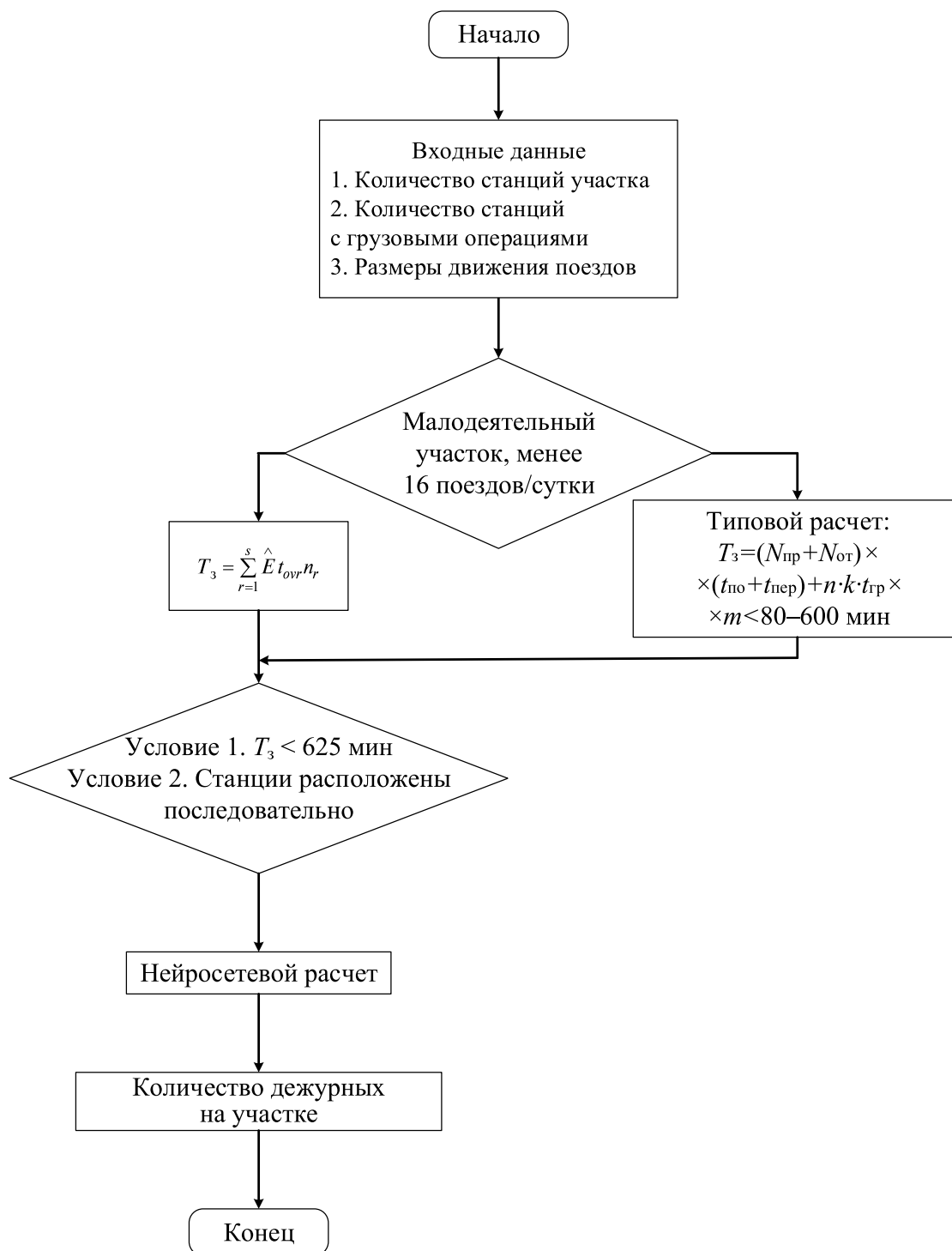


Рис. 2. Алгоритм расчета потребного количества дежурных по станции на малодеятельном участке

где t_{oi} – затраты времени на безусловное выполнение i -го блока операторов алгоритма; m – количество безусловно выполняемых блоков операторов в алгоритме r -й функции управления; t_{oj} – затраты времени на выполнение j -го блока операторов при условии q_j в алгоритме r -й функции управления; n – количество

j -х и k -х блоков операторов в алгоритме r -й функции управления; t_{ok} — затраты времени на выполнение k -го блока операторов при условии $l - q_j$ в алгоритме r -й функции управления; v — наблюдение затрат времени на выполнение каждого оператора алгоритма r -й функции управления.

Оценка математического ожидания $\hat{E}t_{ovr}$ затрат рабочего времени на выполнение r -й функции управления определяется выражением:

$$\hat{E}t_{ovr} \approx \frac{1}{w} \sum_{v=1}^w t_{ovr}, \forall r,$$

где w — количество наблюдений затрат времени на выполнение каждого оператора алгоритма и соблюдение логического условия r -й функции управления.

В соответствии с теоремой Чебышева, при увеличении количества наблюдений случайной величины затрат времени на выполнение r -й функции управления их среднее арифметическое $\frac{1}{w} \sum_{v=1}^w t_{ovr}$ сходится по вероятности к математическому ожиданию Et_{ovr} :

$$P\left(\left|\frac{1}{w} \sum_{v=1}^w t_{ovr} - Et_{ovr}\right| < \varepsilon\right) > 1 - \delta \text{ при } w \rightarrow \infty,$$

где ε, δ — сколь угодно малые положительные числа.

Следовательно, оценку математического ожидания $\hat{E}t_{ovr}$ при расчетах загрузки оперативного персонала следует использовать как детерминированную величину.

Результаты оценок математических ожиданий затрат рабочего времени на выполнение всех функций управления составляют основу для определения загрузки оперативного работника участковой станции за смену. Загрузку оперативного персонала, рассчитанную на основе алгоритмического описания функций управления, с целью сокращения описания предлагается называть загруженностью и рассчитывать по формуле:

$$T_3 = \sum_{r=1}^s \hat{E}t_{ovr} n_r,$$

где $\hat{E}t_{ovr}$ — оценка математического ожидания затрат рабочего времени на выполнение r -й функции управления; n_r — количество функций r -го типа, выполняемых за смену $r \subset s$; s — количество типов функций управления, выполняемых оперативным работником за смену.

Норма загрузки оперативного работника за смену равна 675 минутам. Расчет загрузки дежурного по станции по приведенной методике в развернутом виде приведен в [20].

Для оценки вариантов распределения зон управления на малодеятельных линиях рассчитывается загруженность дежурного по каждой станции T_3 по при-

веденной выше методике. В качестве критериев дополнительно учтены размеры транзитных грузовых поездов, проходящих по каждой станции, количество местных вагонов на станции и потребное количество дежурных по станции в зависимости от суммарной загруженности дежурных на малодеятельной линии.

Для реализации модели рассмотрен участок с последовательным расположением семи станций, на четырех из которых имеется примыкание путей необщего пользования (рис. 3).

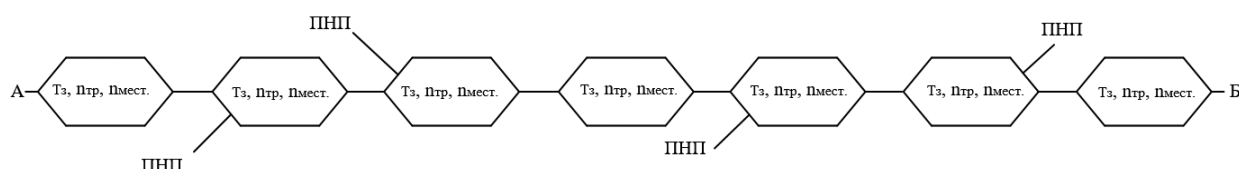


Рис. 3. Схема малодеятельного участка

В результате анализа исходных данных установлены ограничения по входным данным. Суммарная загруженность дежурных по станции на участке имеет ограничение $675 \leq T_3 \leq 4725$. Нижняя граница обусловлена необходимостью присутствия хотя бы одного дежурного по станции на участке. Верхняя граница характеризует наличие дежурных на каждой станции при максимально допустимой загруженности.

Параметр размеров движения (N) имеет ограничение $2 \leq N \leq 16$, характеризующее минимальные размеры движения поездов за сутки и верхнюю границу размеров движения поездов, установленную для малодеятельных линий.

Параметр количества местных вагонов на участке (n) имеет ограничение $1 \leq n \leq 40$. Данное ограничение получено в результате сбора и обработки статистических данных по малодеятельным линиям. Фрагмент входных данных для нейросетей модели приведен в таблице 1.

Таблица 1. Фрагмент входных данных для нейросетей модели

№ наблюдения	Суммарная загруженность дежурных по станции на участке, мин (T_3)	Количество поездов, N	Количество местных вагонов на участке, n	Количество дежурных на участке
1	1985	16	21	3
2	2910	16	22	4
3	2814	11	8	4
4	2313	12	26	3
5	1326	12	14	2
....

Для построения модели обработано более 1500 наблюдений. На основании полученных статистических данных построена нейросетевая модель с помощью анализа регрессии. В качестве непрерывной целевой функции взято количество дежурных по станции, в качестве переменных выбраны параметры «количество поездов» и «количество местных вагонов». Создана автоматизированная нейронная сеть с размером обучающей предвыборки 70 %, контрольной и тестовой подвыборки по 15 % соответственно.

Рассматриваемый алгоритм имеет рекурсивную функцию линейной зависимости быстрого действия $O(n)$. Количество операций будет увеличиваться пропорционально количеству исходных данных.

В работе построена нейронная сеть с двумя нейронами на входе, семью нейронами на скрытом слое и одним нейроном на выходе. Функция активизации гиперболическая, а на выходе – тождественная.

Построен набор обученных нейронных сетей. Производительность самой лучшей из них характеризуется коэффициентом детерминации, который составил: для обучающей сети – 0,89, для контрольной – 0,91, для тестовой – 0,91. Ошибка обучения – 0,012. Построена поверхность отклика обученной сети (рис. 4).

Из графика видно, что нейронная сеть с высокой степенью достоверности улавливает зависимость, существенных выбросов нет.

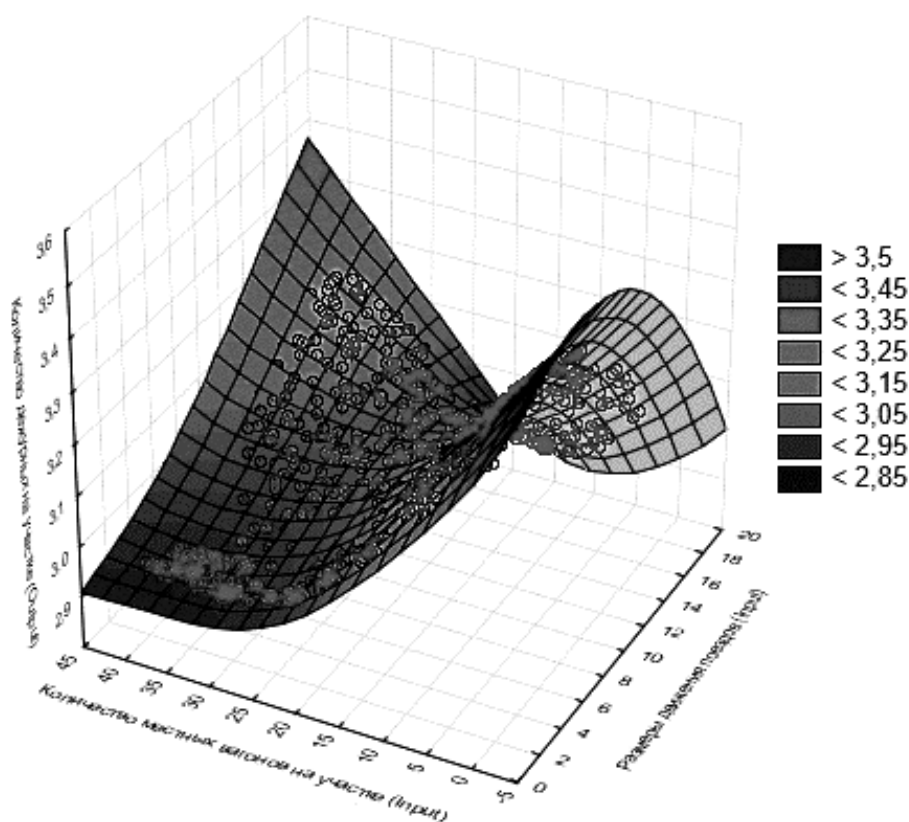


Рис. 4. Итоговая поверхность расположения сети, построенная с помощью нейронной сети

Анализ полученной поверхности позволяет сделать вывод о том, что на малодеятельных линиях, имеющих указанные исходные данные, необходимо от двух до четырех дежурных по станции в зависимости от размеров движения поездов и количества местных вагонов.

Сети имеют также промежуточные значения потребного количества дежурных по станции в виде 2,9; 3,3; 3,5 и т. д. Значение 3,5 можно воспринимать как усредненное и интерпретировать следующим образом: в смену на трех станциях необходима круглосуточная работа дежурных посменно, а на одной станции достаточно дежурного, работающего только в одну смену (дневную или ночную, в зависимости от характера работы). Значения потребного количества дежурных по станции в виде 2,9; 3,3 не позволяют в целых числах определить потребное количество дежурных по станции. Поэтому необходим дополнительный анализ исходных данных в части расчета загруженности дежурного по функциям управления, затраты на которые можно снизить с помощью применения новых технических устройств и технологий выполнения работ. Ведение электронных журналов, наличие искусственного зрения для выполнения технического и коммерческого осмотра, применение стопперов для закрепления подвижного состава и другие технические и технологические решения позволят снизить загруженность дежурных по станции на малодеятельных линиях, где наиболее актуальны безлюдные технологии.

На малодеятельных линиях при загруженности оперативного персонала станции ниже 50 % целесообразно передавать ему дополнительный объем работы для приведения загруженности к нормативным значениям. Если работа требует специальной подготовки при загруженности ниже 20 %, то такая деятельность может носить разъездной характер.

Заключение

Эксплуатация малодеятельных линий в современных условиях – важная задача. Как установлено, около 20 % железнодорожных линий, принадлежащих ОАО «Российские железные дороги», являются малодеятельными. В связи с изменением характера производимой продукции, созданием и банкротством предприятий, а также естественной миграцией населения изменяется конъюнктура перевозки грузов и пассажиров.

К сожалению, инфраструктура железнодорожного транспорта трансформируется не так гибко и оперативно, что приводит к появлению малодеятельных линий. Современные технические и экономические аспекты эксплуатации малодеятельных железнодорожных линий направлены на снижение затрат на организацию перевозочного процесса. Это позволяет использовать малодеятельные линии как полигон для испытания современных технических решений с дальнейшей возможностью их применения на интенсивных железнодорожных линиях.

По мнению авторов, необходимо также проводить исследования возможностей применения малодеятельных железнодорожных линий в части повышения их доходности. Так, представляется перспективным отведение земель рядом с такими линиями для строительства новых предприятий, разработка сезонных экскурсионных маршрутов. Подобная диверсификация поможет снизить общие убытки от эксплуатации малодеятельных линий.

Представленная модель обученной нейронной сети позволяет определить требуемое количество дежурных по станции при изменении входных данных. Соответственно, можно рассчитать количество дежурных по станции на этапе проектирования малодеятельных линий.

Малодеятельные линии убыточны, но они могут стать полигонами для опытного применения современных малолюдных технологий с последующим внедрением этих технологий и на интенсивных направлениях. А применение новых технологий на малодеятельных линиях позволит поэтапно повышать доходность и тем самым снижать общую убыточность малодеятельных линий.

Присутствие дежурных по станции на малодеятельных линиях необходимо там, где выполняется местная работа. Станции, на которых местная работа не ведется, можно передавать на диспетчерское управление либо дежурному по станции, где местная работа есть. Однако необходима техническая проработка этого вопроса в части управления стрелочными переводами и светофорами. Способ объединения нескольких станций для управления одним дежурным требует дальнейших исследований и может быть реализован с помощью кластерного анализа.

Библиографический список

1. *Кириленко О. Н.* Экономическая эффективность методов эксплуатации малодеятельных линий / О. Н. Кириленко // Экономика железных дорог. – 2014. – № 8. – С. 79–85.
2. *Вакуленко С. П.* Малодеятельные линии: состояние и варианты оптимизации / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Н. Ю. Евреенова // Мир транспорта. – 2017. – Т. 15, № 3. – С. 174–180.
3. *Никитин А. Б.* Возможность внедрения цифровой радиосвязи и организации передачи данных между станциями на малодеятельных линиях / А. Б. Никитин, И. В. Кушпиль // Автоматика на транспорте. – 2019. – Т. 5, № 1. – С. 45–61.
4. *Курбатова А. В.* Возможные стратегии решения проблемы малодеятельных железнодорожных линий с учетом мирового опыта / А. В. Курбатова, Е. С. Прошкина // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2009). Материалы Третьей международной конференции (секции 4–6). – М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2009. – С. 97–100.
5. *Писаревский Г. Е.* Экономические методы оптимизации работы малодеятельных линий / Г. Е. Писаревский, Л. А. Мартынова, Н. М. Ломакина, Н. М. Зарецкая // Экономика железных дорог. – 2015. – № 5. – С. 55–66.

6. *Теребнев Л. В.* Малодеятельные железнодорожные линии или неинтенсивная экономика / Л. В. Теребнев // Транспорт Российской Федерации. – 2008. – № 6. – С. 20–24.
7. *Муковнина Н. А.* Методика выбора целесообразного типа подвижного состава для обслуживания малодеятельных пригородных линий / Н. А. Муковнина, В. И. Солдаткин // Вестник транспорта Поволжья. – 2008. – № 1. – С. 67–71.
8. *Ищенко В. А.* Организация связи на малодеятельных линиях / В. А. Ищенко, А. А. Черников, А. В. Дуренков // Железнодорожный транспорт. – 2009. – № 3. – С. 72–74.
9. *Ялышев Р. Ф.* Один из критериев отнесения железнодорожных линий к категории малодеятельных / Р. Ф. Ялышев // Проблемы развития сети железных дорог. Межвузовский сборник научных трудов; под ред. В. С. Шварцфельда. – Хабаровск, 2006. – С. 105–108.
10. *Епишкин И. А.* Причины появления малодеятельных линий в РФ / И. А. Епишкин, К. В. Фионова // Транспортное дело России. – 2018. – № 6. – С. 262–264.
11. *Ковалев К. Е.* Совершенствование перевозочного процесса доставки контейнеров в условиях перехода к цифровой железной дороге / К. Е. Ковалев, А. Д. Обухов // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2019. – № 12. – С. 8–13.
12. *Frumin D.* Branching processes of conservative nested Petri nets / D. Frumin, I. A. Lomazova // VPT 2014. Second International Workshop on Verification and Program Transformation: EPIc Series. EasyChair. – 2014. – Vol. 28. – P. 19–35.
13. *Chan Y. K.* The establishment of an integrated management system paradigm for railway engineering management / Y. K. Chan, P. Gaffney, K. Neailey, W. H. Ip // The TQM Magazine. – 1998. – Vol. 10, N 6. – P. 420–424.
14. *Purnell C. J.* Development and management of a radon assessment strategy suitable for underground railway tunnelling projects / C. J. Purnell, G. Frommer, K. Chan, A. A. Auch // Radiation Protection Dosimetry. – 2004. – N 4. – 353 p.
15. *Fröhling R. D.* Wheel/rail interface management in heavy haul railway operations – applying science and technology / R. D. Fröhling // Vehicle System Dynamics. – 2007. – Vol. 45, N 7–8. – P. 649–677.
16. *Ballis A.* Issues on railway wagon asset management using advanced information systems / A. Ballis, L. Dimitriou // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2010. – Vol. 18, N. 5. – P. 807–820.
17. *Hiraguri S.* Train Control System for Secondary Lines Using Radio Communications in Specific Area / S. Hiraguri, M. Fukuda, H. Fujita, Y. Ono // Quarterly Report of RTRI. – 2012. – P. 1–6.
18. *Sauer C.* Gleisstromkreise – ein veraltetes oder aktuelles Mittel zur Gleisfreimtding / C. Sauer // Eisenbahningenieur. – 2014. – N 7. – P. 25–30.
19. *Shen Q.* Intermittent fault's parameter framework and stochastic petri net based formalization model / Q. Shen, J. Qiu, G. Liu, K. Lv // Eksploatacja i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability. – 2016. – Vol. 18, N 2. – P. 210–217.
20. *Buchina N.* The tool for modeling of wireless sensor networks with nested Petri nets. In Proceedings of 7th the Spring / N. Buchina, L. Dworzanski // Summer Young Researchers' Colloquium on Software Engineering, SYRCoSE '13. – М.: Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences, 2013. – P. 15–18.
21. *Jian W.* A Train Control System for Low Density Line in China / W. Jian, J. Cheng Mingm, C. Baigen, L. Jiang // Journal of the China railway society. – 2015. – P. 46–53.

K. E. Kovalev

*The department of "Logistics and Commercial Work",
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg*

V. L. Belozarov

*The department of "Transport Economics",
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg*

V. A. Sharov

*The department of "Field Operation and Transport Security Management",
Russian University of Transport (MIIT), Moscow*

WORKLOAD MODEL OF OPERATING AND DISPATCHING PERSONNEL AT LOW-DENSITY LINES

The issue of low-density railway lines operation which is topical for railway transport is considered in the article. Operation of the type of lines in question is non-value added, though the suppression of its activity is impossible due to political reasons.

Modern research in the given scope is aimed at cost cutting in performance of such lines at the same time maintaining operational reliability of equipment and its efficiency. Low-density lines may be used as polygons for implementation of technical and engineering solutions which in future can be applied at the routes with high-density traffic.

The required number of operating personnel to fulfill train and shunting service at a certain direction is one of the topical issues of the study. The lack of train and shunting service leads to low workload of operating personnel. The dependency model of the required number of station operators from the number of through freight trains and local cars at a section was built in the study. The model makes it possible to predict the required number of station operators in case of change in the volume and type of train and local service. The assessment of complexity index of the presented algorithm and the obtained model was carried out. A conclusion was made on adequacy of the model in question; an interpretation of the obtained results as to the number of station operators and the reduction of their work load by means of minimal-manning technologies was carried out. The simplicity of calculations and the algorithm is one of the advantages of the model in question.

Low-density lines, workload of operating personnel, carrying capacity, railway transport

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-294-308

References

1. *Kirilenko O. N.* (2014) Ekonomicheskaya effektivnost metodov ekspluatatsii malodeyatelnykh liniy [Economic efficiency of operating methods of low-density lines]. *Ekonomika zheleznikh dorog [Railroad economics]*, 2014, no. 8, pp. 79–85. (In Russian)
2. *Vakulenko S. P., Kolin A. V. & Evreenova N. Yu.* (2017) Malodeyatelniye linii: sostoyaniye i variant optimizatsii [Low-density lines: condition and options for optimization]. *Mir transport [The world of transport]*, 2017, vol. 15, no. 3, pp. 174–180. (In Russian)
3. *Nikitin A. B. & Kushpil I. V.* (2019) Vozmozhnost vnedreniya tsifrovoy radiosvyazy i organizatsii peredachy dannykh mezhdru stantsiyamy na malodeyatelnykh liniyakh [The potential of implementing digital radio communication and data transmission arrangement between

- stations at low-density lines]. *Avtomatika na transporte [Transport automation]*, 2019, vol. 5, no. 1, pp. 45–61. (In Russian)
4. Kurbatova A. V. & Proshkina E. S. (2009) Vozmozhniye strategii resheniya problem malodeyatelnykh zheleznodorozhnykh liniy s uchetom mirovogo opyta [Feasible strategies for problem solution of low-density railway lines based on best practices]. *Upravleniye razvitiem krupnomasshtabnykh system (MLSD '2009) [Development control of large-scale systems (MLSD '2009)]*. Materialy Tretyey mezhdunarodnoy konferentsii (sektzii 4–6) [Proceedings of the third International Conference (sections 4–6)]. Moscow, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences Publ., 2009, pp. 97–100. (In Russian)
 5. Pisarevskiy G. E., Martynova L. A., Lomatkina N. M. & Zaretskaya N. M. (2015) Ekonomicheskiye metody optimizatsii raboty malodeyatelnykh liniy [Economic methods of optimization performance of low-density lines]. *Ekonomika zheleznykh dorog [Railroad economics]*, 2015, no. 5, pp. 55–66. (In Russian)
 6. Terebnev L. V. (2008) Malodeyatelniye zheleznodorozhniye linii ili neintensivnaya ekonomika [Low-density railway lines or soft economics]. *Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, 2008, no. 6, pp. 20–24. (In Russian)
 7. Mukovnina N. A. & Soldatkin V. I. (2008) Metodika vybora tselesoobraznogo tipa podvizhnogo sostava dlya obsluzhivaniya malodeyatelnykh prigorodnykh liniy [The selection method of an appropriate type of the railway stock for running low-density lines]. *Vestnik transporta Povolzhya [The Volga region transport Bulletin]*, 2008, no. 1, pp. 67–71. (In Russian)
 8. Ishchenko V. A., Chernikov A. A. & Durenkov A. V. (2009) Organizatsiya svyazy na malodeyatelnykh liniyakh [Telecommunication arrangement at low-density lines]. *Zheleznodorozhniy transport [Railway transport]*, 2009, no. 3, pp. 72–74. (In Russian)
 9. Yalyshev R. F. (2006) Odin iz kriteriev otneseniya zheleznodorozhnykh liniy k kategorii malodeyatelnykh [A criterion of attributing railway lines to the category of low-density lines]. *Problemy razvitiya zheleznykh dorog [Problems of railway system development]*. Mezhevuzovskiy sbornik nauchnykh trudov [Interuniversity collection of scientific papers]. Ed. by V. S. Shchwarzfeld. Khabarovsk, 2006, pp. 105–108 (In Russian)
 10. Epishkin I. A. & Fionova K. V. (2018) Prichiny proyavleniya malodeyatelnykh liniy v RF [Appearance causes of low-density lines in the Russian Federation]. *Transportnoye delo Rossii [Transport business of Russia]*, 2018, no. 6, pp. 262–264. (In Russian)
 11. Kovalev K. E. & Obukhov A. D. (2019) Sovershenstvovaniye perevozochnogo protsessa dostavki konteynerov v usloviyakh perekhoda k tsifrovoy zheleznoy doroge [The improvement of transportation delivery process of containers in response to transition to digital railway]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye. Nauchniy informatsionniy sbornik [Transport: science, engineering, management. Research information digest]*, 2019, no. 12, pp. 8–13. (In Russian)
 12. Frumin D. & Lomazova I. A. (2014) Branching processes of conservative nested Petri nets. *VPT 2014. Second International Workshop on Verification and Program Transformation: EP-iC Series. EasyChair*, 2014, vol. 28, pp. 19–35.
 13. Chan Y. K., Gaffney P., Neailey K. & Ip W. H. (1998) The establishment of an integrated management system paradigm for railway engineering management. *The TQM Magazine*, 1998, vol. 10, no. 6, pp. 420–424.
 14. Purnell C. J., Frommer G., Chan K. & Auch A. A. (2004) Development and management of a radon assessment strategy suitable for underground railway tunneling projects. *Radiation Protection Dosimetry*, 2004, no. 4, pp. 353.
 15. Fröhling R. D. (2007) Wheel/rail interface management in heavy haul railway operations – applying science and technology. *Vehicle System Dynamics*, 2007, vol. 45, no. 7–8, pp. 649–677.

16. *Ballis A. & Dimitriou L.* (2010) Issues on railway wagon asset management using advanced information systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2010, vol. 18, no. 5, pp. 807–820.
17. *Hiraguri S., Fukuda M., Fujita H. & Ono Y.* (2012) Train Control System for Secondary Lines Using Radio Communications in Specific Area. *Quarterly Report of RTRI*, 2012, pp. 1–6.
18. *Sauer C.* (2014) Gleisstromkreise – ein veraltetes oder aktuelles Mittel zur Gleisfreimtlung. *Eisenbahningenieur*, 2014, no 7, pp. 25–30.
19. *Shen Q., Qiu J., Liu G. & Lv K.* (2016) Intermittent fault's parameter framework and stochastic petri net based formalization model. *Eksploatacja i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability*, 2016, vol. 18, no. 2, pp. 210–217.
20. *Buchina N. & Dworzanski L.* (2013) The tool for modeling of wireless sensor networks with nested Petri nets. In Proceedings of 7th the Spring. N. Buchina, L. Dworzanski. *Summer Young Researchers' Colloquium on Software Engineering, SYRCoSE'13*. Moscow, Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences, 2013, pp. 15–18.
21. *Jian W., Cheng Mingm J., Baigen C. & Jiang L.* (2015) A Train Control System for Low Density Line in China. *Journal of the China railway society*, 2015, pp. 46–53.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии И. М. Кокуриным
Поступила в редакцию 16.03.2020, принята к публикации 13.04.2020*

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

БЕЛОЗЕРОВ Владимир Леонидович – доктор экономических наук, профессор кафедры «Экономика транспорта» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I
e-mail: etran@pgups.ru

ШАРОВ Виктор Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте» Российского университета транспорта
e-mail: uerbt@miit.ru

© Ковалев К. Е., Белозеров В. Л., Шаров В. А., 2020

МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА В ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 656.25

Р. Б. Абдуллаев

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

РЕАЛИЗАЦИЯ ПОДСИСТЕМЫ СБОРА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ НА ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ КОНТРОЛЛЕРАХ

В статье рассмотрены вопросы применения промышленных программируемых логических контроллеров для задач построения системы автоматизации процесса технического диагностирования состояния устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. Приведены существующие методы технического обслуживания подобных устройств и их недостатки. Перечислены эксплуатируемые системы технического диагностирования и непрерывного мониторинга объектов железнодорожной автоматики на российских железных дорогах.

С учетом немалой стоимости существующих систем технического диагностирования и мониторинга предложена разработка подобной системы на основе программируемых логических контроллеров. Для этого приводятся основные принципы получения дискретных и аналоговых данных с объектов железнодорожной автоматики. Даны некоторые примеры, места подключения модулей, датчиков к контрольным точкам диагностируемых объектов. Показано, что некоторые модули отечественных производителей не требуют для измерения параметров объектов отдельных датчиков-преобразователей, что значительно удешевляет стоимость будущей системы. Организационная структура системы строится на основе предлагаемых контроллеров и места их оптимального расположения на объектах железных дорог.

Продемонстрирован принцип обмена диагностическими данными напольных объектов автоматики с постом электрической централизации, приведены некоторые характеристики помехозащищенных каналов связи, в которых используются в основном полиномиальные коды. Обозначены пути решения задачи организации питания модулей программируемых логических контроллеров и датчиков. В большинстве случаев это готовые решения существующей системы управления движением. Указаны примерные затраты на реализацию системы на базе программируемых логических контроллеров и влияние реализуемых систем на качественные показатели деятельности железнодорожного транспорта.

Техническое диагностирование устройств автоматики, непрерывный мониторинг, программируемые логические контроллеры на транспорте, полиномиальные коды в системах мониторинга

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-309-331

Введение

Железнодорожная автоматика и телемеханика (ЖАТ) является одной из важнейших отраслей в обеспечении безопасного и бесперебойного перевозочного процесса на железнодорожном транспорте [1–3]. В настоящее время наблюдается тенденция реализации систем ЖАТ на базе микроэлектронных и микропроцессорных компонентов [1, 4], хотя подавляющее большинство эксплуатируемых на железных дорогах систем построено на базе технических решений прошлого века – с использованием реле. Тем не менее, свои функции морально устаревшие устройства и системы выполняют на высоком уровне безопасности.

Для поддержания заложенного при проектировании уровня надежности устройств и систем ЖАТ, независимо от используемой элементной базы, необходимо техническое обслуживание устройств и узлов данных систем [5–7]. Применение современной элементной базы при проектировании подобных систем, как и использование необслуживаемых устройств и модулей, в некоторой степени облегчает, но не исключает задачу технического обслуживания некоторых объектов. Техобслуживание устройств и систем ЖАТ заблаговременно устраняет возможные отказы и сбои на основе оценки технического состояния диагностируемых узлов. Продлевается срок службы устройств и систем, исключаются нештатные ситуации в перевозочном процессе.

Задачи технического обслуживания устройств и систем ЖАТ заключаются в измерении параметров диагностируемых узлов, общей оценке технического состояния, выявлении причин изменения параметров за пределы нормы, осуществлении мероприятий для сохранения параметров в допустимых пределах, выявлении элементов, узлов, ставших причиной сбоя или отказа, восстановлении работоспособного состояния устройств, систем, осуществлении плановых и регламентных работ по поддержке надлежащего технического состояния устройств и систем ЖАТ. Перечень может расширяться и дополняться, а также сокращаться в зависимости от применяемого подхода технического обслуживания, что непосредственно может влиять на качество технического диагностирования устройств ЖАТ.

Самым распространенным является ручной способ технического диагностирования устройств ЖАТ. В некоторой степени он сохраняется даже при автоматизации данного процесса. Для этого на дистанциях службы сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) постоянно работают группы специалистов, закрепленных на конкретных участках и объектах железной дороги. В этом случае очевидно, что на качество обслуживания в большей степени влияет человеческий фактор, что можно считать существенным недостатком такого способа диагностирования. Для исключения подобных ошибок и повышения качества технического обслуживания вместе с системами управления движением на объектах железных дорог используют различные устройства и системы технического диагностирования и мониторинга (СТДМ) устройств ЖАТ [8–12]. Они позволяют автоматизировать процесс технического обслуживания, вести

непрерывный мониторинг состояний, параметров диагностируемых объектов, выявлять их предотказное состояние и причины отказов. Получили широкое применение такие отечественные системы, как «Аппаратно-программный комплекс диспетчерского контроля» (АПК-ДК), «Автоматизированная система диспетчерского контроля» (АСДК) и «Автоматизированная система диагностирования и контроля устройств сигнализации, централизации и блокировки» (АДК-СЦБ) [13–15]. Активно разрабатывают и внедряют устройства технического диагностирования и СТДМ устройств ЖАТ в зарубежных странах [3, 7, 8, 16]. На железных дорогах Европы используются изделия Siemens, Shift2Rail и др. [8, 9]. Наметилась тенденция внедрения подсистем для объектов железнодорожной инфраструктуры и других отраслей. Некоторые крупные производители предлагают целый комплекс подсистем мониторинга [8].

Разработкой всего комплекса аппаратных и программных средств СТДМ ЖАТ занимаются специализированные фирмы, которых не так много в РФ. Их СТДМ ЖАТ имеют немалую стоимость и при любой реконфигурации объектов железных дорог полностью зависят от производителя. Во многом из-за этих причин на большинстве участков железных дорог продолжает применяться ручной способ диагностирования.

Отметим также отсутствие в этих системах анализа диагностических данных и обоснованности выбора ряда контрольных точек измерения.

Учитывая минусы традиционного способа диагностирования, высокую стоимость существующих СТДМ ЖАТ и некоторые другие недостатки [6, 10, 17–19], автор данной работы рассматривает вопросы построения СТДМ ЖАТ на базе промышленных программируемых логических контроллеров (ПЛК) [20–22]. Они широко применяются для построения систем управления и мониторинга в атомной энергетике, химической, нефтеперерабатывающей, судостроительной, текстильной и в других отраслях промышленности [20, 23]. Есть примеры использования ПЛК на магистральном железнодорожном транспорте [16] – в бортовом оборудовании электровозов [24].

Целесообразность использования ПЛК при построении СТДМ ЖАТ объясняется отсутствием возложения на подобные системы ответственных команд, задач по управлению движением поездов. Имеют значение и невысокая стоимость, и широкая доступность их модификаций на рынке, что позволяет строить довольно гибкие системы мониторинга. Но стоит упомянуть, что в некоторых отраслях применяются и ПЛК с достаточно высоким уровнем надежности, таких как УПБЗ (SIL3) [16, 25], что в перспективе может затронуть вопрос управления движением [26–28].

1. Система технического диагностирования и мониторинга с использованием программируемых логических контроллеров

Итак, для определения технического состояния осуществляют замер различных физических величин параметров объекта диагностирования специ-

альными измерительными приборами и инструментами. Снятие таких величин осуществляют в схемных решениях контрольных объектов, таких как выводы питания путевого реле, выходные клеммы питающего трансформатора, напряжение между фазами питания стрелочного электродвигателя переменного тока, получение дискретных данных со свободных контактов реле, коммутаторов и т. п.

Наработками ручного способа диагностирования и разработчиками вышеперечисленных СТДМ уже сформирован необходимый перечень измеряемых параметров объектов ЖАТ. Но специалисты фирм-производителей продолжают совершенствовать принципы измерения параметрических величин объектов, искать «оптимальные» контрольные точки съема информации в узлах систем. При внедрении новых устройств ЖАТ появляется необходимость поиска контрольных точек для получения диагностической информации с достаточной глубиной и полнотой процесса диагностирования.

В [6, 13] приводится перечень основных измеряемых параметров и места их съема, чего вполне хватает для интересующего нас вопроса. При рассмотрении конкретных проектов данный перечень может сокращаться.

В промышленной автоматике для воплощения технологических задач уже довольно давно используют ПЛК разных производителей. С их помощью реализуются проекты автоматизации производственного процесса во многих отраслях, начиная с таких, как атомная, нефтегазовая, железнодорожная, и заканчивая технологиями типа «умный дом» [29–31]. Возникает интерес к применению их в области автоматике на железнодорожном транспорте, с возложением на эти устройства задач, пока не связанных с безопасностью движения поездов.

На рынке присутствует множество производителей ПЛК, зарубежных и отечественных. Наиболее популярны Siemens, Schneider Electric, ABB, Fastwel, «Овен», «Вымпел». Не забывая о стратегии импортозамещения и стоимости зарубежных аналогов, рассмотрим решение поставленной задачи на примере продукции одного из отечественных производителей – ПЛК Fastwel [32].

Полный перечень функциональных модулей Fastwel I/O состоит из следующих устройств:

- контроллеры узла сети;
- модули ввода/вывода дискретной информации;
- модули ввода/вывода аналоговой информации;
- модули питания, размножения потенциала;
- модули сетевых интерфейсов;
- модули расширения внутренней шины FastwelBUS (FBUS);
- модули измерения температуры и оконечные модули.

Исполнение всех модулей предусмотрено в корпусе WAGO с креплением на DIN-рейку (см. рис. 1).

Для реализации задачи построения СТДМ ЖАТ на основе модулей Fastwel I/O требуется выбрать подходящие по параметрам аппаратные средства производи-

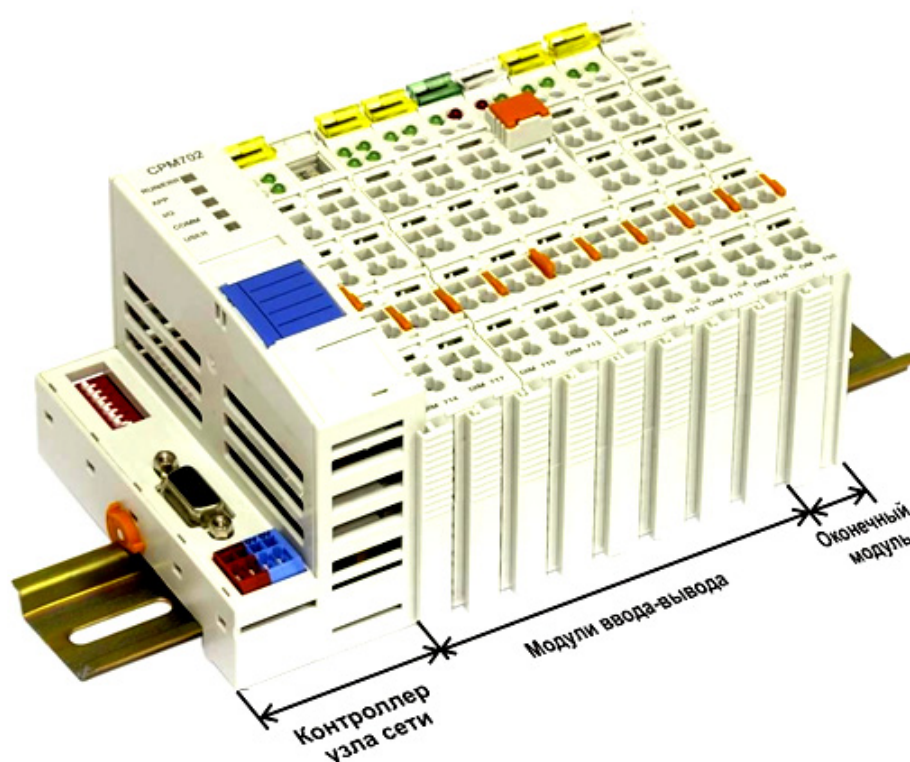


Рис. 1. Установка модулей Fastwel I/O на DIN-рейку и порядок их размещения

теля, а также учесть их стоимость. Далее мы приведем некоторые рекомендации по выбору модулей для построения СТДМ ЖАТ, примеры снятия диагностической информации и подключения модулей к контрольным точкам объектов ЖАТ.

Контроллеры узла сети (рис. 2) предназначены для получения от модулей ввода оцифрованных (преобразованных в стандартный вид) данных, их обработку, выполнение заложенных программным обеспечением команд, обмен данными с другими модулями сети, вывод информации конечному пользователю через графические преобразователи.

В зависимости от модификации, каждый контроллер узла сети обладает определенной емкостью временной и постоянной памяти, а некоторые – возможностью расширения постоянной памяти с помощью флэш-накопителей типа ММС. Все модули функционируют на основе операционной системы реального времени. Комплекс программного обеспечения для модулей Fastwel I/O (операционная система, программы для автоматизированного рабочего места, драйверы периферийных модулей, сетевых интерфейсов и т. п.) разрабатывается в единой для данных контроллеров программной среде CoDeSys [33] версии 2.3 и выше. Использование одной программной оболочки для разработки множества средств системы считается очень удобным. Кроме этого, в этой программной среде предусмотрена эмуляция написанного программного комплекса для системы мониторинга, что позволяет производить его отладку во время написания кода программ.

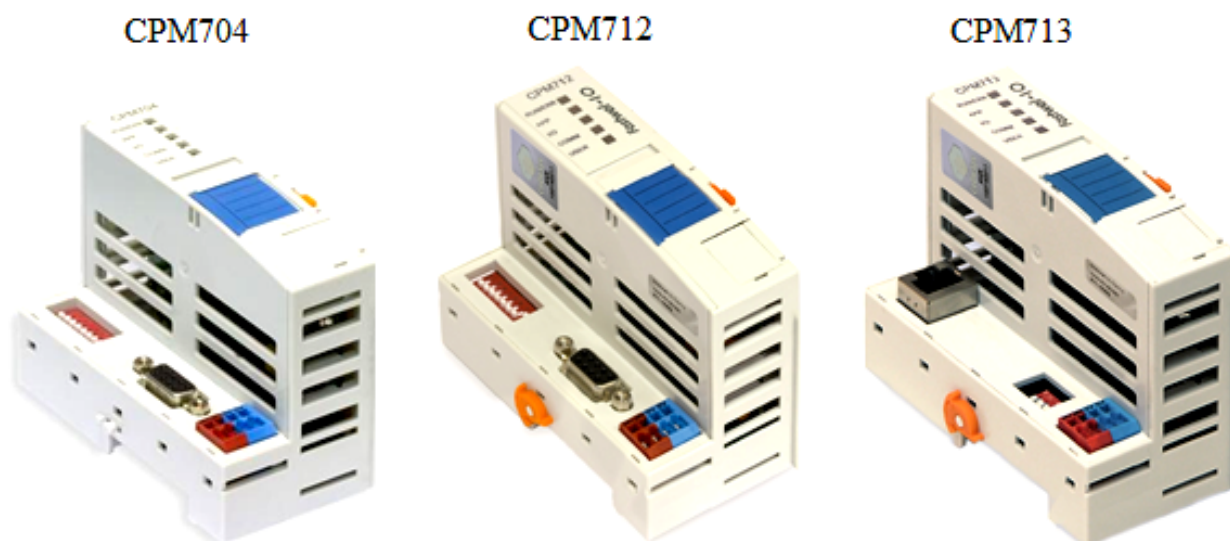


Рис. 2. Рекомендуемые контроллеры узла сети Fastwel I/O

Обмен информации контроллеров узла сети с модулями ввода (только ввода — в системе мониторинга осуществляется лишь снятие диагностических данных!) и модулями сетевых интерфейсов осуществляется по внутренней межмодульной шине FBUS со скоростью передачи данных до 2 Мб/с. FBUS также является шиной питания некоторых «слаботочных» модулей ввода; это аналогия физического интерфейса RS-485 с протоколом передачи Modbus RTU [34]. При данном протоколе центральный модуль производит поочередной опрос состояния буфера данных вводных модулей по шине FBUS, а затем на основе алгоритма написанного программного обеспечения осуществляет команды.

При реализации распределенной СТДМ ЖАТ требуется использование нескольких контроллеров узла сети. Обмен информацией может происходить по уже готовым решениям производителя и (в зависимости от модификации используемых контроллеров сети) по физическим интерфейсам CAN (протяженностью до 1000 м), RS-422 (до 1200 м), RS-485 (до 1200 м), Ethernet (до 100 м) [34]. Можно передать данные по беспроводному каналу связи WiFi, но в данном случае необходимо оценить расходы по стыковке различных интерфейсов и сопоставить с расходами существующих решений, поскольку для данного канала связи готовых решений у производителя нет.

По рисунку 3 можно увидеть, что при использовании сети Ethernet показана возможность реализации нескольких master-устройств. Для некоторых специфических задач может понадобиться и такой вариант обмена данными. Это предусмотрено в Fastwel I/O при любом интерфейсе связи.

Автоматизированное техническое диагностирование объектов ЖАТ требует снятия различных параметрических величин с их контрольных точек. В основном величины подразделяются на два вида: дискретные и аналоговые. Для этой задачи у производителя Fastwel I/O имеется множество модулей дискретного

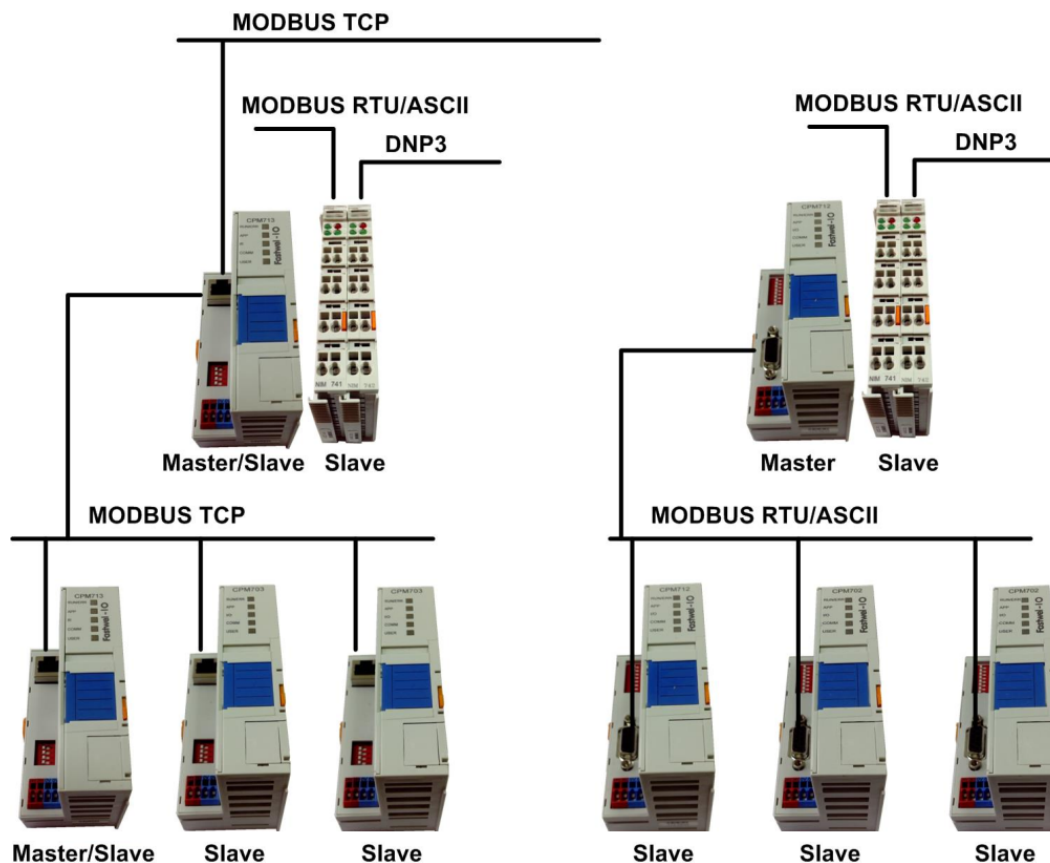


Рис. 3. Примеры подключения нескольких контроллеров сети к интерфейсам связи Ethernet и CAN, RS-422 (485)

и аналогового ввода. Для питания большого количества устройств ЖАТ используется напряжение постоянного тока +24 В и напряжение переменного тока 230 В. Поэтому отметим, что для измерения модулями Fastwel I/O определенного диапазона величин параметров (напряжение постоянного тока от -3 до +60 В, дискретный замер переменного 230 В) и в некоторых случаях для вышеперечисленных величин не требуется использовать специальные преобразователи величин [35] – датчиков тока, напряжения и т. п., что значительно удешевляет стоимость будущей системы мониторинга.

Модули дискретного ввода Fastwel I/O предусматривают замер напряжений постоянного тока. Для снятия дискретных данных с объектов ЖАТ можно использовать датчики в виде свободных контактов реле (так называемые «сухие» контакты), свободные контакты от коммутаторов, кнопок, подводимое питание ламп пульт-табло (табло). Для примера на рисунке 4 приведено подключение датчиков типа «сухой» контакт к портам модуля ввода DIM717. Подача напряжения на модуль DIM717 осуществляется через дискретные датчики, подводимые от модуля питания OM752 напряжением +24 В.

Если необходимо применить контроль целостности цепи дискретного канала, можно использовать дискретные модули DIM765 (766), в которых предусмо-

требуются подключение шунтирующих резисторов номиналом от 1,8 до 33,0 КОм для создания токов утечки. Дребезг сигнала при коммутации контактов исключается при задании настроек дискретных модулей, т. е. программным способом. На входы всех дискретных модулей «0–24» возможна подача напряжения до 30 В.

Для снятия аналоговых величин параметров в Fastwel I/O применяются модули ввода аналоговых величин типа АІМ. Выше отмечалось, что некоторые диапазоны параметров могут измеряться напрямую самими модулями, без использования специальных датчиков-преобразователей. При подборе конкретных модулей имеется возможность подключения к датчикам информации в однопроводном режиме с общей землей, а также в дифференциальном. Например, без использования датчиков напряжения с помощью модулей АІМ726 (727) можно измерять напряжения от 0 до +40 В, при модулях АІМ729 (728) – от –20 до +20, соответственно, в каждом случае в однопроводном и дифференциальном подключении напрямую к контрольным точкам. Во всех модулях АІМ используются аналогово-цифровые преобразователи на основе процессора Atmega с разрядностью до 22 бит. Для замера напряжений постоянного тока слаботочных цепей можно использовать универсальный модуль АІМ792, в ко-

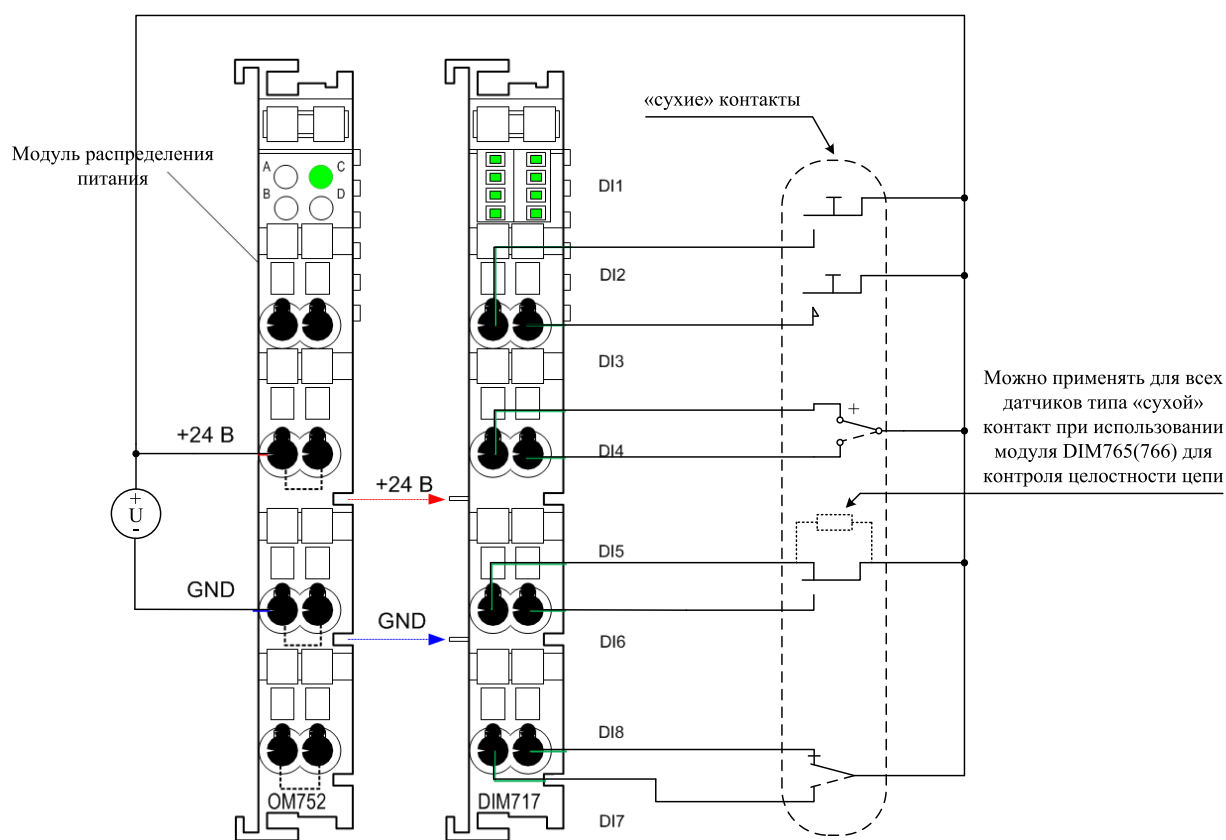


Рис. 4. Подключение модуля снятия дискретных сигналов DIM717 к датчикам типа «сухой» контакт устройств ЖАТ

тором возможна индивидуальная настройка диапазона измерений напряжений 0–5 В, 0–10 В, –5...+5 В, –10...+10 В.

Надо заметить, что в железнодорожной автоматике применяются более широкие диапазоны напряжений и токов, чем вышеприведенные, а при техническом диагностировании возникают и другие специфические задачи. Они не ограничиваются простым измерением токов и напряжений при помощи вышеперечисленных аналоговых модулей ввода. В их числе определение сопротивления изоляции кабеля, которое требует специализированных приборов. В таком случае рекомендуется использовать другие аналоговые модули ввода Fastwel с датчиками-преобразователями (датчики тока, напряжения, мощности, см. рис. 5). Многие производители выпускают подобные датчики со стандартными для ввода в аналоговые модули ПЛК выходными сигналами постоянного тока 0–20 мА или 4–20 мА.

На рисунке 6 приведена схема подключения через датчики тока и напряжения модуля АІМ791 к контрольным точкам схемы управления электроприводом переменного тока. В существующих СТДМ ЖАТ с помощью измеренных величин параметров в этих точках осуществляют косвенную оценку усилий перевода острия стрелки электроприводом [6]. Из рисунка можно видеть принципы подключения модуля ввода к контрольным точкам ЖАТ для измерения напряжения питания фазочувствительных рельсовых цепей (датчик



Рис. 5. Внешний вид датчиков тока и напряжений

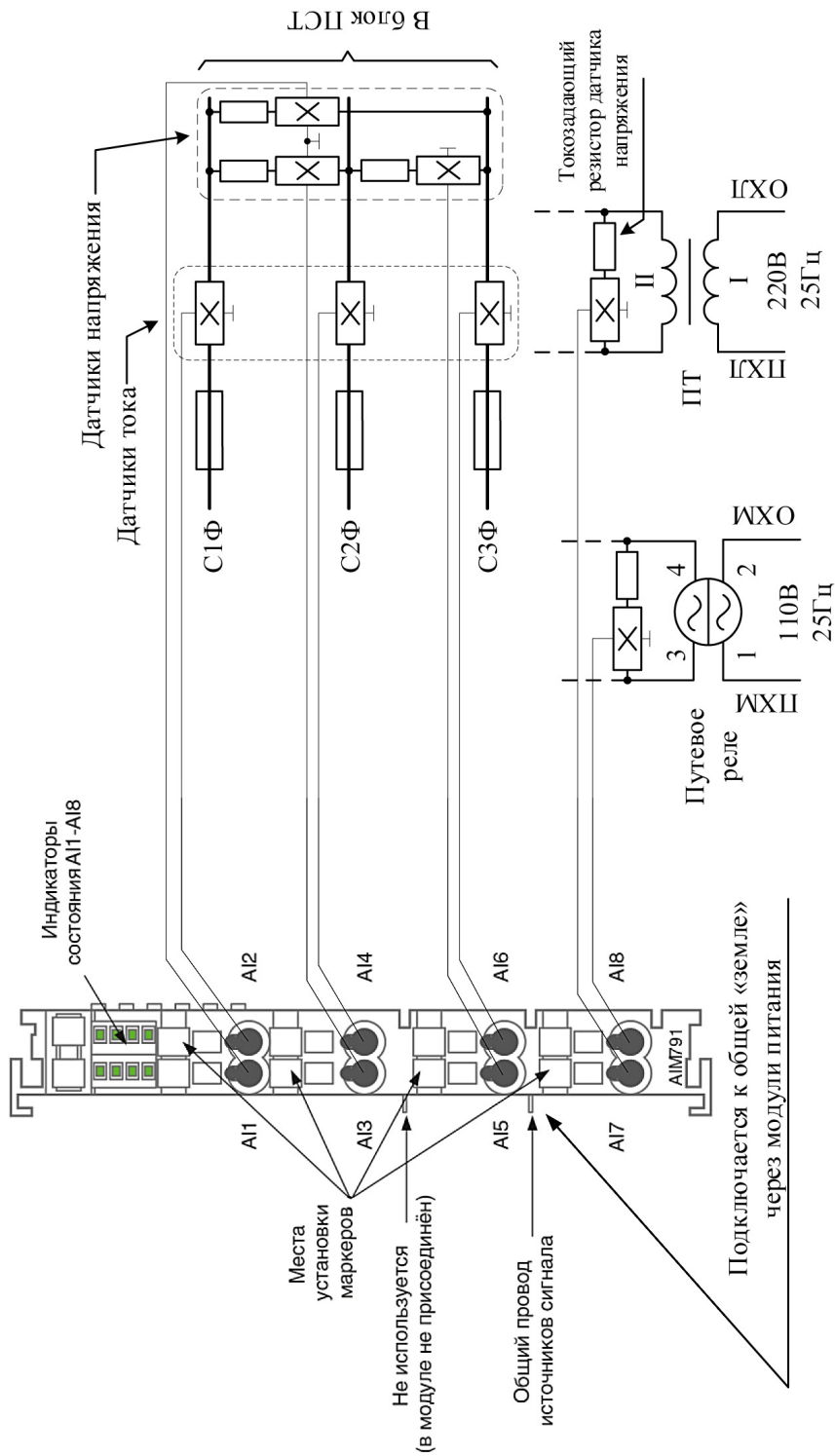


Рис. 6. Подключение датчиков тока и напряжения к вводу модуля АИМ791 для измерения аналоговых величин токов и напряжений в контрольных точках объектов ЖАТ

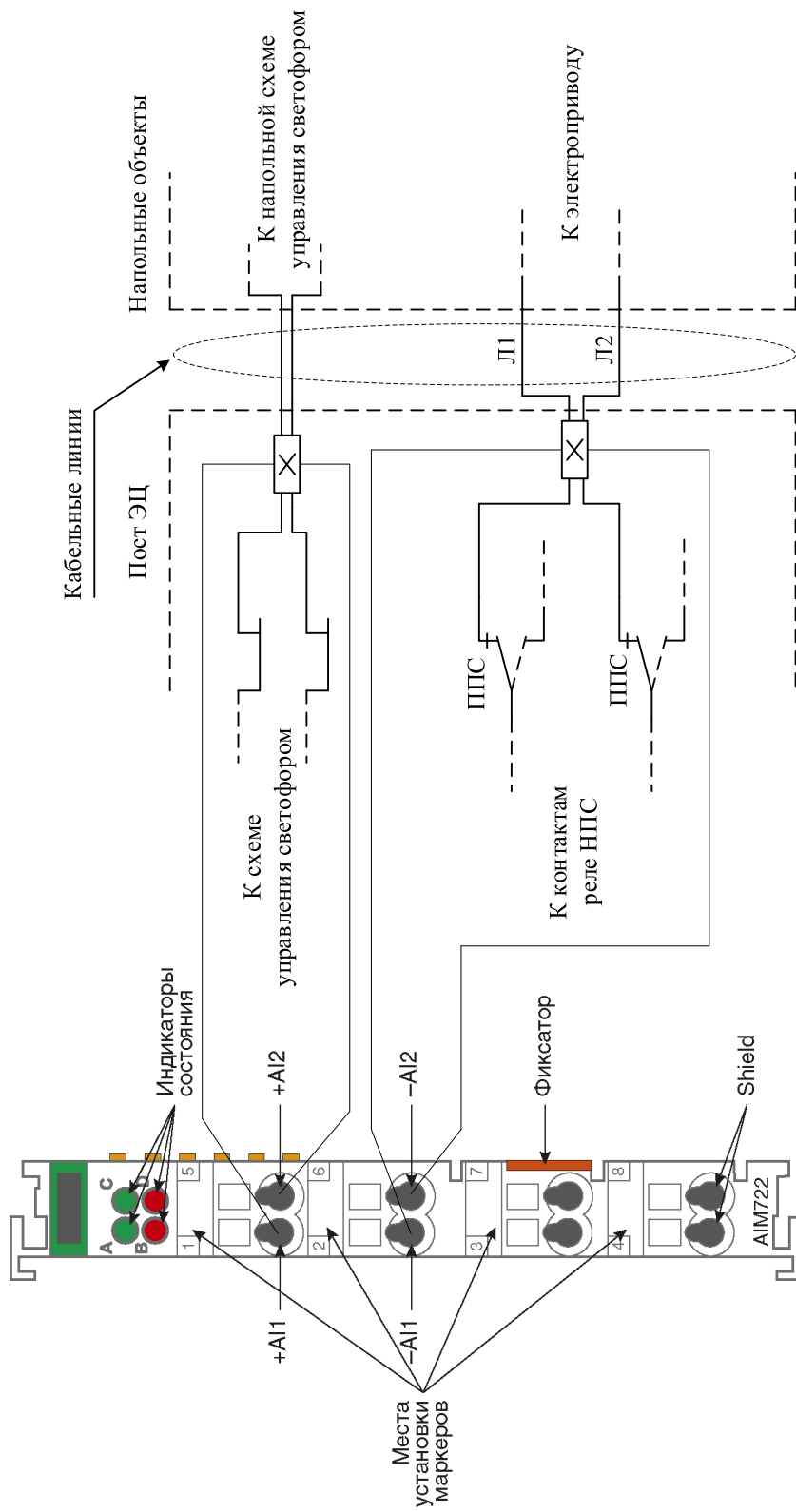


Рис. 7. Метод измерения сопротивления изоляции кабельных линий между постом ЭЦ и напольными объектами с помощью дифференциальных датчиков тока и модуля AIM722

напряжения подключен к выходным клеммам вторичной обмотки питающего трансформатора) и питания самого путевого реле. Модуль АІМ791 предусматривает подключение к датчикам по однопроводному принципу с общей землей.

Если по каким-либо причинам подключение с общей землей к датчикам считается недопустимым, то рекомендуется использовать модули ввода типа АІМ722, который предусматривает подключение к датчикам по двухпроводной линии. На рисунке 7 показан принцип измерения по той самой дифференциальной паре сопротивления изоляции кабеля между постом электрической централизации и напольными объектами ЖАТ. Для измерения сопротивления изоляции кабеля используются специальные дифференциальные датчики тока. Они осуществляют замер токов утечки, точнее, сопоставляют величину протекающего тока по обоим проводам. Также измерить сопротивление изоляции кабеля можно с использованием четырехканального модуля АІМ721 (723). Но в этом случае подключение модулей к дифференциальным датчикам предусматривается по однопроводному принципу с общей землей.

Некоторые датчики тока и напряжений получают питание по той же самой петле «4–20 мА», что очень удобно и не требует лишних питающих устройств и прокладки соответствующей линии. Для датчиков, нуждающихся в отдельном питании, необходима подача стандартного напряжения для всех +24 В.

Подключение датчиков тока и дифференциальных датчиков тока к контрольным точкам производится без разрыва физической линии: через отверстия датчиков просто пропускаются контролируемые провода.

Датчики тока, напряжения, дифференциальные, дискретные и другие датчики подсоединяются к модулям аналогового и дискретного ввода медным проводом сечением 0,08–2,5 мм².

2. Структурная схема реализуемой системы технического диагностирования и мониторинга

Все модули Fastwel I/O монтируются на DIN-рейку и в таком виде могут располагаться на релейных стativaх поста электрической централизации. Такое централизованное нахождение всех модулей и подключение к объектам диагностирования считается целесообразным, если контролируемые объекты присутствуют только на посту электрической централизации. Но иногда это может приводить к перерасходу кабельной сети при подключении к датчикам. Например, во время снятия диагностических данных с объектов ЖАТ, расположенных в аккумуляторных помещениях; при установке датчиков в кроссовом помещении и подключении их к кабельной сети централизации; при снятии дискретных данных с пульт-табло. К тому же множество объектов ЖАТ расположено на поле, и тогда требуется их диагностирование с места.

В целях сокращения перерасхода кабельной сети оптимальным решением будет построение распределенной системы мониторинга. На рисунке 8 при-

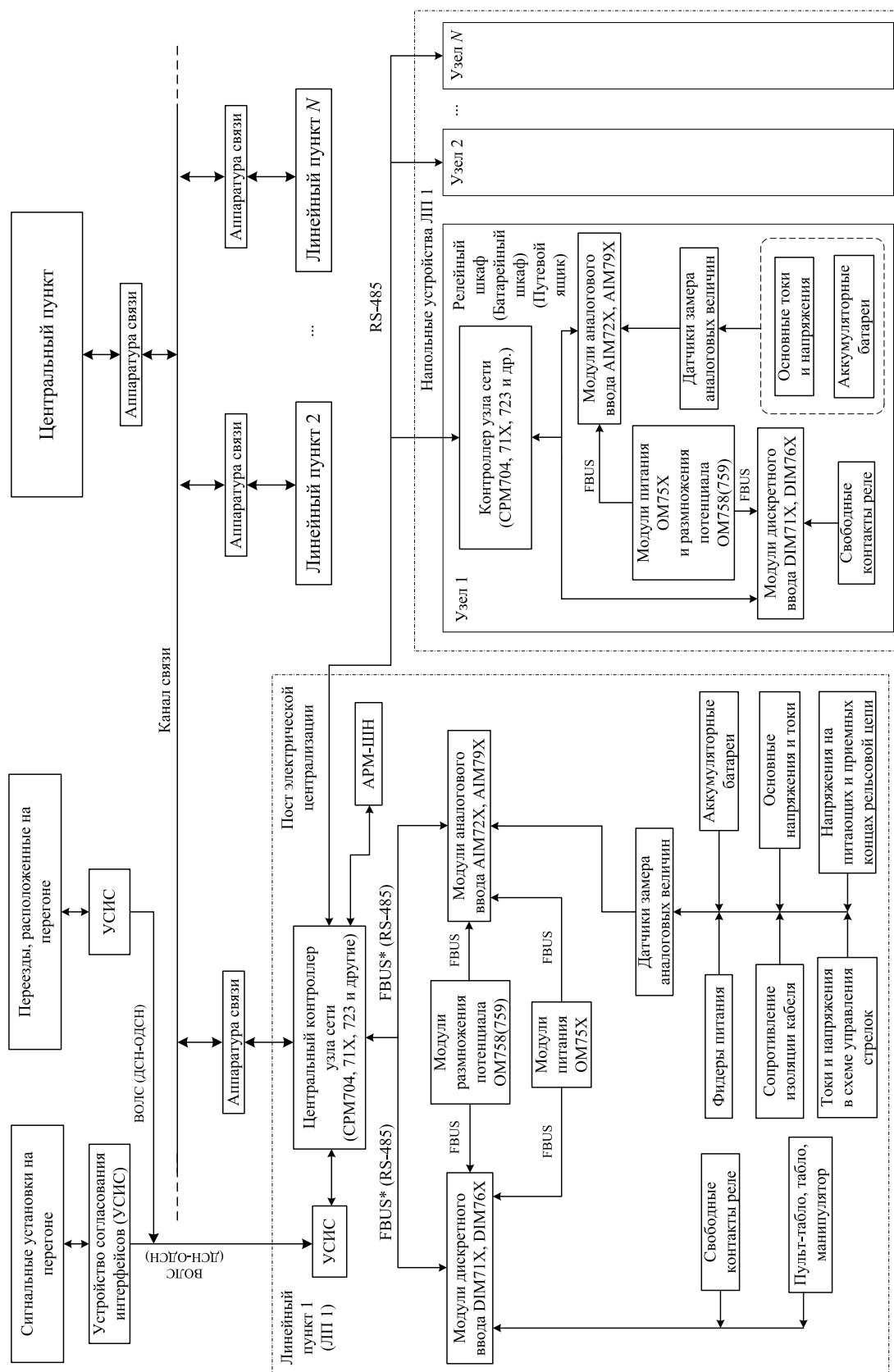


Рис. 8. Организационная структура СТДМ ЖАТ на основе контроллеров Fastweld I/O

* - для сокращения расхода кабеля модули ввода могут размещаться вблизи датчиков, но при этом необходимо использование отдельного модуля узла сети, который будет связан с центральным узлом сети по RS-485 (например, при размещении центрального узла сети в релейном помещении, а модулей ввода дискретных сигналов – в табло (манипуляторе))

ведена организационная структура СТДМ ЖАТ на основе ПЛК Fastwel. Принцип организации передачи информации с переездов и сигнальных установок на станцию (линейный пункт) и далее по каналам связи в центральный пункт (ситуационные центры, диспетчерский центр, дистанция СЦБ и т. д.) напоминают принятые в системе «Частотный диспетчерский контроль» [36].

По рисунку можно заметить, что распределенная структура станционной системы подразумевает разделение объектов контроля по узлам сети. В качестве узла могут выступать подходы к станции, группа выходных светофоров одной горловины, переезды и отдельные близко расположенные группы объектов (см. также рис. 9). Модули ПЛК в таком случае могут размещаться в установленных релейных и батарейных шкафах, а при отсутствии таковых – вблизи объектов диагностирования в отдельно устанавливаемых для модулей ПЛК путевых ящиках.

Техническая документация Fastwel I/O показывает, что питание любых модулей, как и практически всех датчиков-преобразователей, осуществляется напряжением +24 В. Соответственно, питание может сниматься с полюсов П и М в релейных и батарейных шкафах либо через выпрямители с полюсов ПХ и ОХ в релейных шкафах. Если поблизости нет источника питания, оно может сниматься с высоковольтной линии автоблокировки, линии электропередач и даже с контактной сети через специальные понижающие трансформаторы. Для обмена информацией между контроллерами узлов сети и центральным контроллером, расположенным на посту электрической централизации, возможно использование интерфейсов связи RS-485 или CAN (в зависимости от типа контроллеров). При большой удаленности станционных объектов от поста централизации увеличить дальность канала RS-485 можно с помощью специальных репитеров. Несмотря на то, что в RS-485 используется более устойчивый к помехам дифференциальный способ передачи, помехоустойчивость линии в обоих интерфейсах связи обеспечивается применением циклических кодов CRC16 и LRC.

В качестве отдельных узлов сети также могут рассматриваться постовые помещения централизации: кроссовые, аккумуляторные, дизель-генераторные помещения и др. Для подключения контроллеров узлов сети, расположенных на посту помимо CAN и RS-485, можно использовать более скоростной интерфейс связи Ethernet. В данном интерфейсе связи для помехоустойчивости канала также применяются полиномиальные коды.

Принципы подключения, обмена информацией между модулями ПЛК для перегонных переездов и сигнальных точек реализуются наподобие любого станционного узла сети. Полученные диагностические данные через устройство согласования интерфейсов передаются на ближайшую станцию по существующей линии ДСН-ОДСН или по оптоволоконной линии связи. Необходимое питание для модулей ПЛК и датчиков в релейных шкафах перегонных объектов имеется.

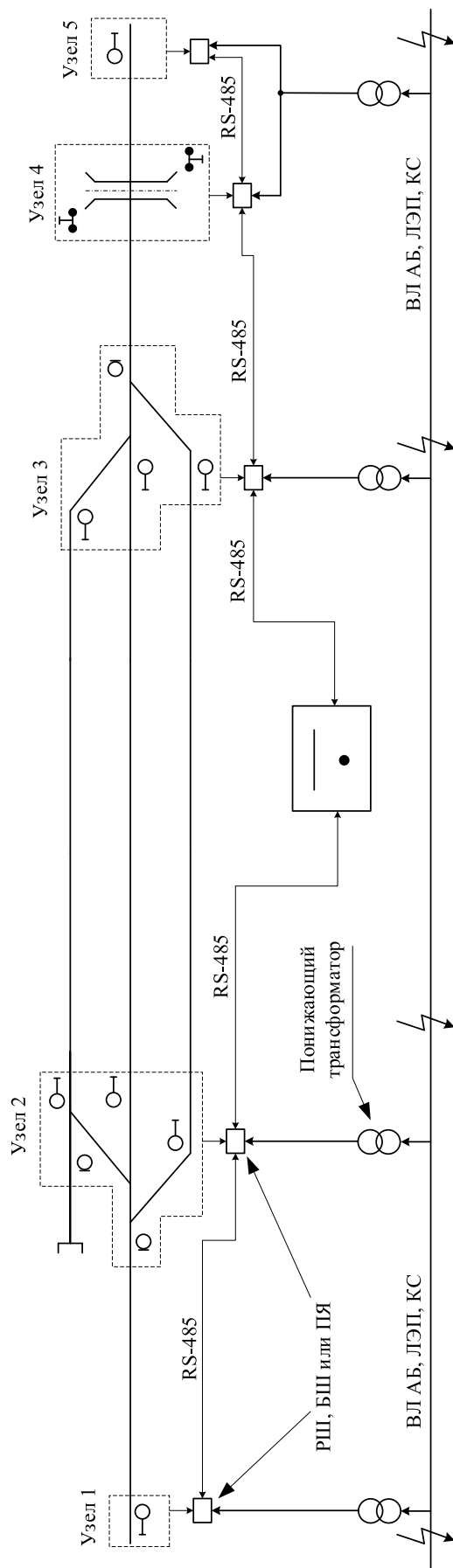


Рис. 9. Условное разделение станционных напольных объектов на узлы СТДМ и организационная структура питания и обмена информацией с постом электрической централизации

3. Некоторые экономические вопросы использования программируемых логических контроллеров

Стоимость будущей системы на базе ПЛК в основном складывается из расходов на закупку модулей контроллеров, датчиков-преобразователей, разработку программного обеспечения системы, кабельную сеть и пусконаладочные работы. Приведем условно небольшой расчет материальных затрат аппаратной части, поскольку все прочие расходы присутствуют и при выборе других существующих систем.

Допустим, необходимо реализовать СТДМ ЖАТ со ста контрольными точками, с вводом аналоговых и дискретных данных в соотношении 40/60 и распределением данной системы на шесть узлов сети. Расходы на модули ПЛК Fastwel составят 265 698 рублей (см. табл., цены на модули ПЛК взяты с сайта <http://antrel31.ru/>).

Таблица. Примерные затраты на закупку модулей ПЛК для реализации системы мониторинга со 100 контрольными точками

Модуль	Цена, руб. (без НДС)	Кол-во	Всего, руб.
СРМ712-01	22414	6	134 484
АІМ791-01	15570	5	77 850
ДИМ71701	5910	8	47 280
ОМ75001	1059	6	6 354
ИТОГО			265 698

Цены на датчики тока и напряжений зависят от максимальных значений тока и напряжения в измеряемой сети. Для наших задач подойдут датчики (по данным сайта www.priborelektro.ru) в ценовом диапазоне от 3060 до 4560 рублей. Следовательно, максимальные расходы на датчики (40 штук) при цене 4560 рублей за каждый составят 182 400 рублей. В таком случае примерные аппаратные затраты в итоге будут равняться **448 098** рублям.

В расчетах не учтены материальные расходы на кабельный материал для организации канала связи и питания модулей, увязки датчиков с измерительными контроллерами, подготовку автоматизированного рабочего места пользователя и прочие траты, которые уместны и при существующих СТДМ ЖАТ.

Если сравнивать полученные цифры с расходами на аппаратную часть существующих производителей СТДМ ЖАТ, а именно на центральное вычислительное устройство (концентратор или какой-либо другой прибор – у каждого производителя свое наименование) и измерительные контроллеры, то суммы получаются намного меньше. Данный расчет является приблизительным. При осуществлении реальных проектов количество контрольных точек модулей ПЛК может быть значительно больше.

Следует также указать и малые габариты модулей ПЛК, которые, как было сказано, устанавливаются на DIN-рейку, а при наличии свободного места – на релейных стативах, в релейных и батарейных шкафах. В отличие от других СТДМ ЖАТ они не требуют выделения отдельного места, стоек и т. п.

Эксплуатационные расходы СТДМ ЖАТ на базе ПЛК минимальны, системы, построенные на их базе, рассчитаны на долгосрочную перспективу. У каждого модуля практически всех производителей большое количество часов наработки на отказ.

Наименьшее время наработки на отказ у Fastwel I/O имеет контроллер узла сети SRM712 (360 000 часов). Потребление электроэнергии модулей того же производителя ПЛК в среднем составляет 150 мА.

При применении ПЛК в разработке СТДМ ЖАТ (в силу устранения недостатков существующих СТДМ) предусматривается разработка и внедрение в ПО модулей ПЛК алгоритмов анализа диагностических данных устройств ЖАТ, подсистемы поддержки принятия решений, прогнозирования дальнейшего состояния диагностируемых устройств. Все это позволило бы своевременно предотвращать причины отказов, сбоев, сводить к минимуму нештатные ситуации в перевозочном процессе.

Заключение

Возможности применения промышленных ПЛК для реализации задач построения СТДМ ЖАТ рассмотрены на примере технических решений Fastwel I/O. Указаны особенности подключения измерительных модулей ПЛК к контрольным точкам объектов диагностирования, места размещения модулей ПЛК.

Исходя из характеристик модулей ПЛК, отметим, что диапазон напряжений и род питающего тока для модулей уже имеется на посту ЭЦ и в релейных шкафах ЖАТ. Это ощутимо облегчает организацию питания и снижает стоимость системы мониторинга. Значительных затрат средств, выделяемых на закупку аппаратной части системы на базе ПЛК, требуют датчики-преобразователи для снятия аналоговых величин. А чтобы проложить кабель для подсоединения аналоговых и дискретных датчиков к модулям ввода (данные кабели имеют небольшую длину из-за близкого расположения к объектам), станцию необходимо обеспечить дополнительной линией связи узлов системы мониторинга – RS-485 или CAN.

Но даже с учетом всех этих расходов (большая их часть уместна и при внедрении СТДМ ЖАТ специализированных фирм-производителей) реализация процесса автоматизированного технического диагностирования и мониторинга объектов ЖАТ с использованием программируемых логических контроллеров получается низкочувствительной. Это подтверждает актуальность их применения и в таком приложении.

Библиографический список

1. *Theeg G.* Railway Signalling & Interlocking: 3ed Edition / G. Theeg, S. Vlasenko. – Germany, Leverkusen PMC Media House GmbH, 2020. – 552 p.
2. *Schmidt St.* APS – Advanced Protection System; the low-cost introduction of ETCS Level 2/3/St. Schmidt // DVV Media Group GmbH: Signal + Draht. – 2019. – Vol. 111, iss. 10. – P. 22–31.
3. *Langschwert C.* End position detector systems – safety on the right track / C. Langschwert, H. Achleitner // DVV Media Group GmbH: Signal + Draht. – 2019. – Vol. 111, iss. 9. – P. 50–58.
4. *Казимов Г. А.* Микропроцессорная централизация стрелок и сигналов EBIlock 950 / Г. А. Казимов, В. Н. Алешин, А. Е. Деревянко, С. В. Золотарева, Г. Ф. Лекута, С. Б. Платунов, А. В. Сураев, С. А. Хохлов, К. Д. Хромушкин / под ред. Г. Д. Казиева. – М.: ТРАНС-ИЗДАТ, 2008. – 368 с.
5. Надежность и эффективность в технике: справочник. Н17. В 10 т. / под общ. ред. В. В. Клюева, П. П. Пархоменко // Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1987. – Т. 9. – 352 с.
6. *Ефанов Д. В.* Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Ефанов. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. – 171 с.
7. *Wernet M.* Digital tools for relay interlocking diagnostics and condition assessment / M. Wernet, M. Brunokowski, Ph. Witt, T. Meiwald // DVV Media Group GmbH: Signal + Draht. – 2019. – Vol. 111, iss. 11. – P. 39–45.
8. TD 3.7 – Railway Integrated Measuring and Monitoring System (RIMMS) Demonstrator. – URL: https://projects.shift2rail.org/s2r_ip_TD_r.aspx?ip=3&td=615ae1da-7add-453e-8b390b7b0ce89921. (дата обращения: 11.02.2020 г.)
9. Rail Automation. – URL: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rail/automation.html> (дата обращения: 11.02.2020 г.)
10. *Karevs V.* Railway Automation and Telematics Systems' Monitoring and Diagnostic Methods' Research and Development. PhD Thesis / V. Karevs. – Riga: [RTU], 2013. – 172 p.
11. *Брейдо А. И.* Организация обслуживания железнодорожных устройств автоматики и связи / А. И. Брейдо, В. А. Овсянников. – М.: Транспорт, 1983. – 209 с.
12. *Namadache M.* On the fault detection and diagnosis of railway switch and crossing systems: an overview / M. Namadache, S. Dutta, O. Olaby, R. Ambur, E. Stewart, R. Dixon // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9, N 23, 5129. – P. 2–32. DOI: 10.3390/app9235129
13. *Молодцов В. П.* Системы диспетчерского контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: учеб. пособие / В. П. Молодцов, А. А. Иванов. – СПб.: Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2010. – 140 с.
14. *Горбунов Б. Л.* Аппаратные средства диспетчерского комплекса АПК-ДК / Б. Л. Горбунов // Автоматика, связь, информатика. – 2000. – № 9. – С. 19–21.
15. *Федорчук А. Е.* Автоматизация технического диагностирования и мониторинга устройств ЖАТ (система АДК-СЦБ) / А. Е. Федорчук, А. А. Сепетый, В. Н. Иванченко. – М.: УМЦ ЖДТ, 2013. – 400 с.
16. *Beat F.* A cutting-edge PLC-based interlocking system which has been certified in accordance with CENELEC SIL4 / F. Beat, S. Sedat // DVV Media Group GmbH: Signal + Draht. – 2018. – Vol. 110, iss. 9. – P. 56–60.
17. *Guo J.* Future prospects on the intelligent monitoring technologies for railway signaling systems in China / J. Guo, X. Wang, Y. Zhang, Y. Yang // 6th IET Conference on Railway Condition Monitoring (RCM 2014). – Birmingham, 2014. – P. 1–5.

18. *Ефанов Д. В.* Интеграция систем непрерывного мониторинга и управления движением на железнодорожном транспорте / Д. В. Ефанов // Транспорт Российской Федерации. – 2017. – № 4. – С. 62–65.
19. *Сепетый А. А.* Технология диагностирования и мониторинга устройств ЖАТ на уровне дистанций автоматики и телемеханики / А. А. Сепетый, А. Е. Федорчук // Информатизация и связь. – 2013. – № 2. – С. 71–76.
20. *Мишель Ж.* Программируемые контроллеры: архитектура и применение / Ж. Мишель. – М.: Машиностроение, 1986. – 176 с.
21. *Анисимов И. И.* Интеллектуальный транспорт: Эпоха ПЛК / И. И. Анисимов, А. Э. Кейян // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 3. – С. 43.
22. *Ефанов Д. В.* Система непрерывного мониторинга устройств железнодорожной автоматики на основе программируемых логических контроллеров / Д. В. Ефанов, Р. Б. Абдуллаев; под ред. проф. А. И. Адилходжаева // Научные труды республиканской научно-технической конференции с участием зарубежных ученых «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» (20–21 декабря 2019 г.). – Ташкент: ТаШИИТ, 2019. – 371 с.
23. *Банников Е. В.* Использование ПЛК в промышленности / Е. В. Банников // International scientific review. – 2019. – № 3. – С. 25–28
24. *Медведев А. В.* Отечественные контроллеры Fastwel I / О для ответственных применений / А. В. Медведев // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 8. – С. 38–42.
25. *Ландрини Г.* Интегральные уровни безопасности в соответствии со стандартами МЭК 61508 и 61511 и анализ их связи с техническим обслуживанием / Г. Ландрини // Современные технологии автоматизации. – 2009. – № 1. – С. 72–78.
26. *Nair V.* EC001 “Automation of Railway Signaling Using PLC and Scada” / V. Nair, C. Nikhil. – Coimbatore, Dr. N. G. P. Institute of Technology, 2016. – P. 350–357.
27. *Dhanashree A.* PLC Based Fully Automated Railway System / A. Dhanashree, T. Khushabu, S. Samrudhi, S. Geeta // International Journal of Advance Engineering and Research Development. – 2017. – Vol. 4, iss. 6. – P. 487–494.
28. *Saykowski R.* Alister 2.0 – Programmable Logic Controllers in Railway Interlocking Systems for Regional Lines of the DB Netze AG / R. Saykowski, E. Schultz, J. Bleidiessel; ed. by N. Luttenberger, H. Peters // 17th GI / ITG Conference on Communication in Distributed Systems (KiVS'11). – 2011. – P. 205–207.
29. *Langmann R.* The PLC as a Smart Service in Industry 4.0 Production Systems / R. Langmann // Applied Sciences. – 2019. – N 9, 3815. – P. 1–20. DOI: 10.3390/app9183815.
30. *Crispin A. J.* Programmable logic controllers and their engineering applications / A. J. Crispin. – London: McGraw-Hill, 1990. – 164 p.
31. СМ1820М в системах автоматизации атомных станций. – URL: <https://www.controlengrussia.com/programmnye-sredstva/sm1820m-v-sistemakh-avtomatizacii-atomnykh-stancii> (дата обращения: 05.03.2020 г.)
32. *Константинов А. В.* Модульный ПЛК Fastwel I/O – от замысла до реализации / А. В. Константинов // Автоматизация в промышленности. – 2012. – № 8. – С. 38–42.
33. *Petry J.* IEC 61131–3 mit CoDeSys V3: Ein Praxisbuch für SPS-Programmierer / J. Petry. – Kempten: 3S-Smart Software-Solutions, 2011. – 839 p.
34. *Локотков А.* Fastwel I / О изнутри / А. Локотков // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 1. – С. 58–64.
35. *Портной Г. Я.* Датчики измерения тока и напряжения для систем автоматизации / Г. Я. Портной // Информатизация и системы управления в промышленности. – 2011. – № 5. – С. 3–12.

36. Шариков В. А. Частотный диспетчерский контроль / В. А. Шариков, И. И. Эбель. – М.: Транспорт, 1969. – 184 с.

R. B. Abdullaev

*The department of "Automation and Remote Control on the Railway",
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg*

**IMPLEMENTATION OF THE SUBSYSTEM OF
DIAGNOSTIC INFORMATION GATHERING IN CONTINUOUS
MONITORING SYSTEMS OF RAILWAY AUTOMATION FACILITIES
BASED ON PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLERS**

Application of industrial programmable logic controllers was considered in the article, in order to build a system automating the process of technical diagnosis of the condition of railway automation and remote control facilities. The existing methods of technical diagnosis for similar devices as well as their deficiencies were given in the article. The technical diagnosis and continuous monitoring systems in operation used for the Russian railway automation facilities were listed.

Taking into account the considerable cost of the existing technical diagnosis and continuous monitoring systems, the elaboration of a similar system on the basis of programmable logic controllers was proposed. Basic concepts of receiving discrete and analogue data from railway automation elements were given. Some examples, termination points of modules, sensors and check points of the diagnosed elements were presented. It was demonstrated that some modules of home manufacturers do not need additional transducer-controllers to measure the parameters of elements; the above-mentioned makes the cost of the future system much cheaper. Organizational structure of the system on the basis of the controllers in question was given. The most effective positions of the controllers at railway objects were presented.

The concept of diagnostic data exchange between wayside automation devices and the electrical signal box was demonstrated. Some characteristics of jam-proof communication channels normally involving polynomial codes were stated. The ways to the solution of power supply arrangement for the modules of programmable logic controllers and sensors were listed. Basically, those are ready solutions of the existing traffic control system. Approximate costs on implementation of the system based on programmable logic controllers and the influence of implementable systems on qualitative characteristics of railway performance were given.

Technical diagnosis of automation facilities, continuous monitoring, programmable logic controllers for transport, polynomial codes in monitoring systems

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-309-331

References

1. *Theeg G. & Vlasenko S. (2020) Railway Signalling & Interlocking. 3ed Edition. Germany, Leverkusen PMC Media House GmbH Publ., 2020, 552 p.*
2. *Schmidt St. (2019) APS – Advanced Protection System; the low-cost introduction of ETCS Level 2/3. DVV Media Group GmbH: Signal + Draht, 2019, vol. 111, iss. 10, pp. 22–31.*

3. Langschwert C. & Achleitner H. (2019) End position detector systems – safety on the right track. *DVV Media Group GmbH: Signal + Draht*, 2019, vol. 111, iss. 9, pp. 50–58.
4. Kazimov G. A., Aleshin V. N., Derevyanko A. E., Zolotareva S. V., Lekuta G. F. et al (2008) Mikroprotsessornaya tsentralizatsiya strelok i signalov EBILock 950 [Computer-based interlocking and signalling EBILock 950]. Ed. by G. D. Kazieva. Moscow, TRANSIZDAT, 2008, 368 p. (In Russian)
5. (1987) Nadezhnost i effektivnost v tekhnike. Spravochnik. N17. In 10 vol. Under general editorship of V. V. Kluev, P. P. Parkhomenko. *Tekhnicheskaya diagnostika [Technical diagnostics]*. Moscow, Mashinostroeniye [Mechanical engineering] Publ., 1987, vol. 9, 352 p. (In Russian)
6. Efanov D. V. (2016) Funktsionalniy control i monitoring ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Concurrent error detection and monitoring of railway automation and remote control facilities]. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University] Publ., 2016, 171 p. (In Russian)
7. Wernet M., Brunokowski M., Witt Ph. & Meiwald T. (2019) Digital tools for relay interlocking diagnostics and condition assessment. *DVV Media Group GmbH: Signal + Draht*, 2019, vol. 111, iss. 11, pp. 39–45.
8. TD 3.7 – *Railway Integrated Measuring and Monitoring System (RIMMS) Demonstrator*. URL: https://projects.shift2rail.org/s2r_ip_TD_r.aspx?ip=3&td=615ae1da-7add-453e-8b390b7b0ce89921 (accessed: 11.02.2020)
9. *Rail Automation*. URL: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rail/automation.html>. (accessed: 11.02.2020)
10. Karevs V. (2013) Railway Automation and Telematics Systems' Monitoring and Diagnostic Methods' Research and Development. PhD Thesis. Riga, [RTU] Publ., 2013, 172 p.
11. Breido A. I. & Ovsyannikov V. A. (1983) Organizatsiya obsluzhivaniya zheleznodorozhnykh ustroystv avtomatiki i svyazy [Maintenance management of railway automation and telecommunication facilities]. Moscow, Transport Publ., 1983, 209 p. (In Russian)
12. Hamadache M., Dutta S., Olaby O., Ambur R., Stewart E. & Dixon R. (2019) On the fault detection and diagnosis of railway switch and crossing systems. An overview. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no 23, 5129, pp. 2–32. DOI: 10.3390/app9235129
13. Molodtsov V. P. & Ivanov A. A. (2010) Sistemy dispetcherskogo kontrolya i monitoring ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: uchebnoye posobiye [Dispatch control and monitoring systems of railway automation and remote control facilities: tutorial]. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University] Publ., 2010, 140 p. (In Russian)
14. Gorbunov B. L. (2000) Apparadniye sredstva dispetcherskogo kompleksa APK-DK [Hardware and software monitoring complex APK-DK]. *Avtomatika, svyaz, informatika [Automation, telecommunication, information technology]*, 2000, no. 9, pp. 19–21. (In Russian)
15. Fedorchuk A. E., Sepety A. A. & Ivanchenko V. N. (2013) Avtomatizatsiya tekhnicheskogo diagnostirovaniya i monitoring ustroystv ZHAT (sistema ADK-STsB) [Technical diagnosis and monitoring automation of RAT facilities (ADC-SCB system)]. Moscow, UMTs ZhDT [Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Training and Methodology Centre for Railway Transport] Publ., 2013, 400 p. (In Russian)
16. Beat F. & Sedat S. (2018) A cutting-edge PLC-based interlocking system which has been certified in accordance with CENELEC SIL4. *DVV Media Group GmbH: Signal + Draht*, 2018, vol. 110, iss. 9, pp. 56–60.
17. Guo J., Wang X., Zhang Y. & Yang Y. (2014) Future prospects on the intelligent monitoring technologies for railway signaling systems in China. *6th IET Conference on Railway Condition Monitoring (RCM 2014)*. Birmingham, 2014, pp. 1–5.

18. Efanov D. V. (2017) Integratsiya system nepreryvnogo monitoringa i upravleniya dvizheniyem na zheleznodorozhnom transporte [Integration of continuous monitoring and traffic control systems for railway transport]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation], 2017, no. 4, pp. 62–65. (In Russian)
19. Sepety A. A. & Fedorchuk A. E. (2013) Tekhnologiya diagnostirovaniya i monitoringa ustroystv ZhAT na urovne distantsiy atomatiki i telemekhaniki [The diagnosis and monitoring technology of RAT facilities at the level of divisions of automation and remote control]. *Informatizatsiya i svyaz* [Informatization and telecommunication], 2013, no. 2, pp. 71–76. (In Russian)
20. Michel G. (1986) Programmiruemye kontrollery: arkhitektura i primeneniye [Programmable controllers: architecture and application]. Moscow, Mashinostroeniye [Mechanical engineering] Publ., 1986, 176 p. (In Russian)
21. Anisimov I. I. & Keyan A. E. (2019) Intellectualniy transport: Epokha PLK [Smart Transport: The PLC Era]. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, telecommunication, information science], 2019, no. 3, pp. 43. (In Russian)
22. Efanov D. V. & Abdullaev R. B. (2019) Sistema nepreryvnogo monitoringa ustroystv zheleznoy avtomatiki na osnove programmiruemykh logicheskikh kontrollerov [Continuous monitoring system for railway automation facilities based on Programmable Logic Controllers]. *Nauchniye Trudy respublikanskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s uchastiyem zarubezhnykh uchenykh “Resursosberegayushchiye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte”* [Academic papers of the Republican Science and Technology Conference involving foreign scholars “Resource-saving Technologies for Railway Transport”] (December 20th–21st, 2019). Ed. by A. I. Adilkhodzhaev. Tashkent, TashIIT [Tashkent Railway Engineering Institute] Publ., 2019, 371 p. (In Russian)
23. Bannikov E. V. (2019) Ispolzovaniye PLK v promyshlennosti [PLC application in industry]. *International scientific review*, 2019, no. 3, pp. 25–28. (In Russian)
24. Medvedev A. V. (2014) Otechestvenniye kontrollery Fastwel I / O dlya otvetstvennykh primeneniy [Fastwel I / O home controllers for demanding applications]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in industry], 2014, no. 8, pp. 38–42. (In Russian)
25. Landrin G. (2009) Integralniye urovny bezopasnosti v sootvetstvii so standartamy MEK 61508 i 61511 i analiz ikh svyazy s tekhnicheskim obsluzhivaniyem [IEEC 61508 and 61511-based integral safety levels and their relation to maintenance operation]. *Sovremenniye tekhnologii avtomatizatsii* [Modern automation technologies], 2009, no. 1, pp. 72–78. (In Russian)
26. Nair V. & Nikhil C. (2016). EC001 “Automation of Railway Signaling Using PLC and Scada”. Co-imbatore, Dr. N. G. P. Institute of Technology, 2016, pp. 350–357.
27. Dhanashree A., Khushabu T., Samrudhi S. & Geeta S. (2017) “PLC Based Fully Automated Railway System”. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 2017, vol. 4, iss. 6, pp. 487–494.
28. Saykowski R., Schultz E. & Bleidiessel J. (2011) Alister 2.0 – Programmable Logic Controllers in Railway Interlocking Systems for Regional Lines of the DB Netze AG. *17th GI / ITG Conference on Communication in Distributed Systems (KiVS’11)*. Ed. by N. Luttenberger, H. Peters. 2011, pp. 205–207.
29. Langmann R. (2019). The PLC as a Smart Service in Industry 4.0 Production Systems. *Applied Sciences*, 2019, no. 9, 3815, pp. 1–20. DOI: 10.3390/app9183815
30. Crispin. A. J. (1990) Programmable logic controllers and their engineering applications. London, McGraw-Hill Publ., 1990, 164 p.
31. SM1820M v sistemakh avtomatizatsii atomnykh stantsiy [SM1820M in automation systems of atomic power stations]. URL: <https://www.controlengrussia.com/programmnye->

- sredstva/sm1820m-v-sistemakh-avtomatizacii-atomnykh-stancii (accessed: 03.03.2020) (In Russian)
32. *Konstantinov A. V.* (2012) Modulniy PLK Fastwel I/O – ot zamysla do realizatsii [Modular PLC Fastwel I / O – from idea to implementation]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in industry], 2012, no. 8, pp. 38–42. (In Russian)
 33. *Petry J.* (2011) IEC 61131–3 mit CoDeSys V3. Ein Praxisbuch für SPS-Programmierer. Kempten, 3S-Smart Software-Solutions Publ., 2011, 839 p.
 34. *Lokotkov A.* (2007) Fastwel I / O iznutry [Fastwel I / O on the inside]. *Sovremenniyе tekhnologii avtomatizatsii* [Modern automation technologies], 2007, no. 1, pp. 58–64. (In Russian)
 35. *Portnoy G. Y.* (2011) Datchiky izmereniya toka i napryazheniya dlya system avtomatizatsii [Measuring transducers of current and voltage for automation systems]. *Informatizatsiya i sistemy upravleniya v promyshlennosti* [Informatization and monitoring systems in industry], 2011, no. 5, pp. 3–12. (In Russian)
 36. *Sharikov V. A. & Ebel I. I.* (1969) Chastotniy dispetcherskiy control [Frequency supervisory control]. Moscow, Transport Publ., 1969, 184 p. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Д. С. Марковым
Поступила в редакцию 16.04.2020, принята к публикации 12.05.2020*

АБДУЛЛАЕВ Руслан Борисович – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I
e-mail: ruslan_0507@mail.ru

© Абдуллаев Р. Б., 2020

УДК 004.021+625.25

Д. Х. Баратов, д-р техн. наук

*Кафедра «Автоматика, телемеханика и телекоммуникационные технологии на железнодорожном транспорте»,
Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта, Ташкент*

СИНТЕЗ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ С УЧЕТОМ ЕГО ВНУТРЕННИХ СОСТОЯНИЙ

В статье исследованы особенности электронного документооборота технической документации железнодорожной автоматики и телемеханики. Рассмотрены задачи синтеза математических моделей электронного документооборота технической документации железнодорожной автоматики и телемеханики. С этой целью изучены реальные процессы создания, проверки и использования технической документации на примере процесса учета и контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики, что позволило выявить структурную схему формализованной модели технической документации. Построена модель электронного документооборота технической документации, созданная с применением математического аппарата конечных автоматов. Разработана структурная схема автоматной модели технической документации. Предлагаемая схема формализованной модели технической документации состоит из матриц внешних микроопераций, внутренних микроопераций, создания кода для следующих микрокомпонентов. Количество внутренних состояний микропрограммного автомата полностью определяется количеством элементов логических схем алгоритмов. Размер матриц зависит от количества операторов и условий в логических схемах алгоритмов. Упрощение схемы микропрограммного автомата достигается за счет одновременного выполнения внешних и внутренних микроопераций. Количество микрокоманд определяется числом групп одновременно выполняемых микроопераций. Сформированы микрокоманды по логическим схемам алгоритмов технической документации. Применение предложенной методики построения модели технической документации позволяет разработать достоверное прикладное программное обеспечение для решения задач оперативного документооборота железнодорожной автоматики и телемеханики.

Электронный документооборот технической документации, формальное представление технической документации, логические схемы алгоритмов, структурная схема автоматной модели технической документации, микрокоманды

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-332-355

Введение

Традиционный способ автоматизации электронного документооборота технической документации (ЭДТД) заключается в том, что разработка программного

обеспечения постепенно вынужденно переходит в фоновый режим, поскольку даже незначительные изменения в схеме транспорта и технологического процесса означают необходимость перепрограммирования приложения и большего расхода времени и денег. В результате не хватает времени на обновление обращений исходя из меняющихся условий и требований железнодорожного транспорта [1–3]. Активно развивающиеся системы, связанные с автоматизацией предприятий, в силу высокой трудоемкости требуют обученного персонала. А количество квалифицированных специалистов в области автоматизации растет недостаточно быстро [4]. Задача состоит в том, чтобы создать простой в использовании, надежный инструмент автоматизации, с помощью которого можно не только описывать бизнес-процесс, но и выполнять. Это важно, поскольку чисто описательный инструмент интересен лишь с точки зрения анализа технологических процессов и может использоваться только как часть технического задания при реализации конкретной модели рабочего процесса [5, 6]. Моделирование ЭДТД представлено в работах российских [7–12] и зарубежных авторов [13–18].

На основе разработанных [19–21] логических схем алгоритмов (ЛСА) процесса учета и контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (УКЖАТ) в статье представлена структурная схема автоматной модели технической документации (ТД), сформированы микрокоманды по логическим схемам алгоритмов ТД, рассмотрены задачи упрощения структуры автомата процесса УКЖАТ.

Цель работы – описание и определение автоматной модели документооборота. В качестве объекта моделирования рассматривается электронный документооборот технической документации. Для реализации модели будет использован апробированный аппарат теории автоматов, который адаптирован к современным технологиям программирования. Задача создания и внедрения ЭДТД весьма актуальна. Предприятия и организации железной дороги затрачивают значительные финансовые и временные ресурсы на решение этой задачи.

1. Синтез модели электронного документооборота технической документации на основе абстрактного конечного автомата

Наиболее эффективное решение задач автоматизации процесса УКЖАТ может быть достигнуто путем формализации и применения математических методов оптимизации координации взаимодействия.

Известны методы выявления алгоритмов функционирования сложных систем: метод упрощения работ [22]; составление структурных информационно-временных схем [23], блок-схем и органограмм [24]. Сущность их заключается в пооперационной записи и анализе исследуемого процесса. Общими недостатками с точки зрения исследования УКЖАТ можно считать ограниченное множество условных обозначений операций, сложность, а для ряда методов

[25] и невозможность отображения параллельности процессов УКЖАТ, трудоемкость заполнения бланков обследования.

Существуют языки непосредственного описания дискретных процессов, к которым относятся сети Петри [26], логические схемы алгоритмов (ЛСА) [27], логические схемы требований [28], параллельные логические схемы алгоритмов (ПЛСА) [29].

Устройство железнодорожной автоматики и телемеханики с учетом параллельности процессов может рассматриваться как стационарная динамическая система с дискретным временем. Согласно [24], такая система представляет собой автомат. Значит, для моделирования работы процесса УКЖАТ целесообразно использовать методы теории автоматов.

Автоматный подход [19] заключается в том, чтобы отобразить процесс как систему взаимной автоматизации (один автомат помещается в одно или несколько состояний другого) с возможностью вызова (один автомат вызывается определенным событием из выходного состояния, образованного во время прохождения другого автомата) посредством обмена сообщениями (один автомат принимает сообщение от другого) и по состояниям (один проверяет состояние другого). Внутренняя организация процесса может быть описана последовательностью событий [20]. Количество автоматов, установленных во внутренних состояниях, не ограничено глубиной позиционирования. Это представление позволяет более компактно описывать жизненный цикл программы, модуля и в нашем случае ТД или процесс УКЖАТ. В свою очередь, компактная презентация улучшает внешний вид.

В качестве объекта исследования выбран ЭДТД. Введенная в [20, 21] формулировка используется в качестве основы для автоматной модели.

Формально процесс электронного документооборота технической документации представлен в виде трех ограниченных множеств и взаимосвязей элементов этого множества [6]. Математическое представление процесса приведено в следующем виде:

$$D_T = \{U, P, F\},$$

где D_T – формальное представление ЭДТД; U – множество участников; P – множество процессов; F – состояние технической документации с диапазоном фактических значений.

Установлено ограниченное множество реальных участников рабочего процесса, P в пересмотренной системе рабочего процесса определяется как ограниченное множество процессов, выполняемых участниками. F – ограниченные состояния, которые могут быть приняты ТД после выполнения процедур от P участниками указанного множества U .

Применив теорию автоматов [31–33], определим автомат, который реализует модель ЭДТД.

S (множество состояний) – это множество всех состояний, которые могут быть приняты документом в рамках имитируемого рабочего процесса. Если использовать формулированную запись из [6], это определение будет выглядеть следующим образом: $\{S\} \equiv \{F\}$.

Начальные состояния относятся к множеству состояний в целом, s_0 является исходным множеством состояний S . Поэтому в рамках предлагаемой модели $\{S\} \equiv \{F\}$ можно считать s_0 подмножеством $\{F\}$.

Определим взаимосвязь множества процессов P из определений ЭДТД и множества функций переходных F_p . При построении автоматной модели используются соответствующие элементы множества P : $\{F_p\} \equiv \{P\}$ для определения множества F .

В описанной модели устанавливается идентификация между алфавитом автомата ЭДТД и множеством участников: $\{A\} \equiv \{U\}$.

После синтеза модели $\{U, P, F\}$ получаем автоматную модель ЭДТД:

$$M = (A, S, Z, s_0, F_p, E), \quad (1)$$

где A – входной алфавит; S – внутренний алфавит; Z – выходной алфавит; s_0 – исходный статус; H – функция перехода, определяемая таблицей перехода и обозначающая два множества $A \times S \rightarrow S$; E – функция выхода, определяемая таблицей выходов и обозначающая два множества: $A \times S \rightarrow Z$.

Для данного примера: $A = \{a, b\}$; $S = \{1, 2, 3\}$; $Z = \{0, 1\}$; $s_0 = 1$; $F_p = \{1, 1, 1\}$; $E = \{2, 2, 2\}$.

Применение представленной модели позволяет объединить подходы при разработке и использовании систем электронного документооборота. Внедрение системы ЭДТД позволит сделать процесс хранения техдокументации более предсказуемым, а также снизить влияние исполнительного персонала на конечный результат.

2. Разработка структурной схемы автоматной модели технической документации

На основе микропрограммного автомата (МА) разработана структурная схема формализованной модели ТД.

Схема Wilks-Stinger используется, когда нет строгих требований к скорости управления автоматом при синтезе микропрограмм с наименьшим управлением [34].

Предлагаемая структурная схема формализованной модели ТД состоит из матриц внешних микроопераций М1, внутренних микроопераций М2, создания кода для следующих микрокомпонентов М3. Представленная модель стала новой системной парадигмой представления ТД [35, 36].

Каждая внешняя микрооперация $Z_{V_{gg}}$ является управляющим оператором, а внутренняя $Z_{\alpha_{gg}}$ – управляющим логическим условием, проверяющим усло-

вие α_{qg} , значениями которого будут выполнение ($\alpha_{qg} = 1$, отмечено знаком +) или невыполнение условия ($\alpha_{qg} = 0$, отмечено знаком -). Кругом обозначена схема, которая служит для запроса от $Z_{\alpha_{qg}}$ значения проверяемого им условия (рис. 1).

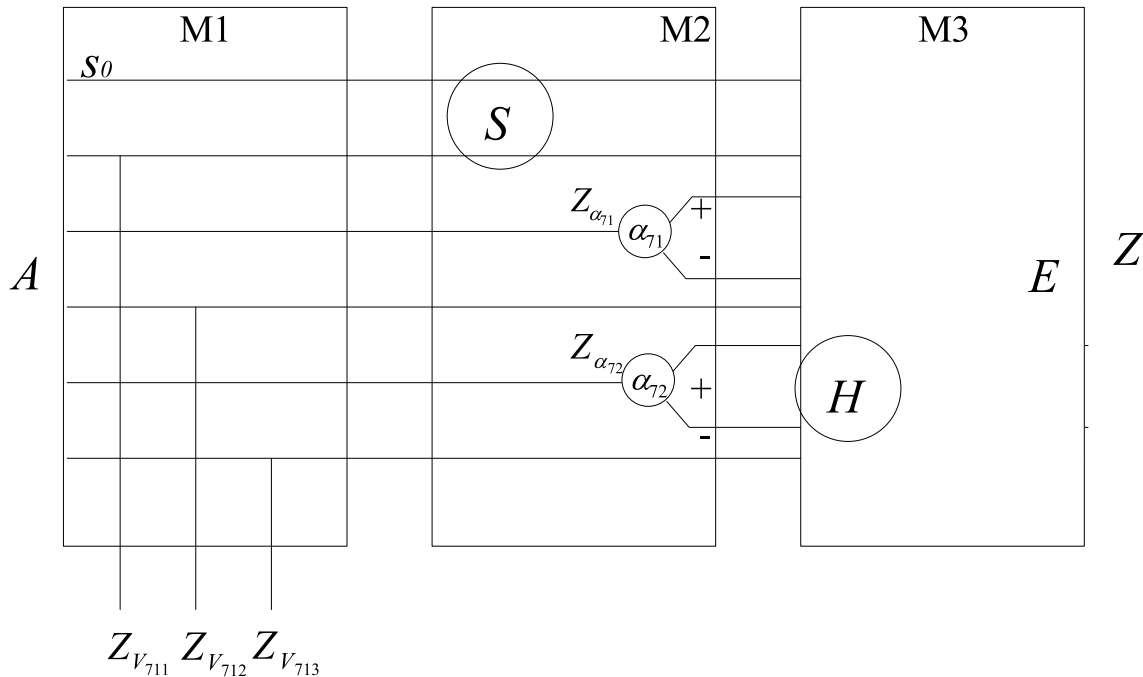


Рис. 1. Структурная схема формализованной модели ТД

Микропрограмму, т. е. последовательность выполнения микроопераций, удобно описать на языке ЛСА, причем с оператором V сопоставляется внешняя микрооперация Z_V , а с логическим условием α_{qg} — внутренняя микрооперация $Z_{\alpha_{qg}}$.

При выполнении этой операции каждая микрокоманда включает только одну микрооперацию (внешнюю или внутреннюю) и только одного оператора или логическое условие во время каждого микротакта. Количество внутренних состояний МА полностью определяется количеством элементов ЛСА. Размер матриц $M1$ и $M2$ зависит от количества операторов и логических условий в ЛСА. В конкретном случае, когда только операторы входят в ЛСА, матрица $M2$ отсутствует. В этом случае в матрице $M3$ каждый раз генерируются последовательные микрокоманды.

При наличии в ЛСА логических условий необходима матрица $M2$, в которой формируются $Z_{\alpha_{qg}}$. При ложном значении проверяемого в $Z_{\alpha_{qg}}$ логического условия (если оно входит в ЛСА без инверсии) порядок выполнения элементов ЛСА нарушается. Затем в $M3$ должно быть сформировано необходимое количество микрокоманд, чтобы правильно выполнить ЛСА.

Если сопоставлять отдельную микрокоманду с каждым элементом ЛСА, для реализации даже очень простого алгоритма потребуется большое число внутренних состояний МА. В то же время нет необходимости выделять внутреннее положение для каждого элемента ЛСА. Некоторые внешние микрооперации могут выполняться не последовательно, а одновременно в одном микротакте. Это происходит, когда операторы, соответствующие этим микрооперациям, работают параллельно. С каждым внутренним состоянием МА сопоставляется группа одновременно выполняемых операторов ЛСА. Это позволяет минимизировать число внутренних состояний МА. Сочетание отдельных микроопераций с течением времени приводит к увеличению скорости, поскольку количество микротактов, необходимых для выполнения алгоритма, уменьшается.

Упрощение схемы МА может быть получено одновременным выполнением внешних и внутренних микроопераций. Тогда число микрокоманд МА будет определяться количеством не элементов ЛСА, а групп одновременно выполняемых микроопераций. Рассмотрим ЛСА технологического процесса учета и контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики A_T , куда входят планирование и ремонт оборудования, контроль приема и хранения, а также передвижение приборов в ремонтно-эксплуатационном отделе:

$$\begin{aligned}
 A_T = & V_0 V_{711} V_{712} V_{713} V_{714} \downarrow^{717} V_{715} V_{716} V_{717} \downarrow^{715} \\
 & V_{718} \alpha_{711} \uparrow^{711} V_{7110} V_{7111} \overline{\alpha_{712}} \uparrow^{712} \downarrow^{711} V_{719} \omega \uparrow^{715} \\
 & \times \downarrow^{712} \downarrow^{714} V_{7115} \alpha_{713} \uparrow^{713} V_{7116} \alpha_{714} \uparrow^{714} V_{7117} \omega \uparrow^{716} \\
 & \downarrow^{713} V_{7118} \omega \uparrow^{717} \downarrow^{712} V_{7112} V_{7113} V_{7114} V_k
 \end{aligned}$$

Процесс УКЖАТ представляется на языке ЛСА [37]. Основными элементами считаются операторы $V_{qg}, q = \overline{1, Q}, g = \overline{1, G}$, соответствующие элементарным действиям процесса; логические условия $\alpha_k, k = \overline{1, K}$ – вероятность их выполнения зависит от текущего состояния процесса УКЖАТ; представленные стрелками $\alpha_k \uparrow^p, p = \overline{1, P}$, где p – индекс стрелки.

Здесь можно выделить шесть групп одновременно выполняемых микроопераций:

- 1) $A_T = V_0 V_{711} V_{712} V_{713} V_{714} \downarrow^{717} V_{715} V_{716} V_{717} \downarrow^{715} V_{718} \alpha_{711} \uparrow^{711}$
 - 2) $V_{7110} V_{7111} \overline{\alpha_{712}} \uparrow^{712} \downarrow^{711} V_{719} \omega \uparrow^{715}$
 - 3) $\times \downarrow^{712} \downarrow^{714} V_{7115} \alpha_{713} \uparrow^{713} V_{7116} \alpha_{714} \uparrow^{714}$
 - 4) $V_{7117} \omega \uparrow^{716}$
 - 5) $\downarrow^{713} V_{7118} \omega \uparrow^{717}$
 - 6) $\downarrow^{712} V_{7112} V_{7113} V_{7114} V_k$
- (1)

Из (1) следует, что МА будет иметь шесть внутренних состояний. Матрица МЗ (рис. 2) построена при сопоставлении с микрокомандами 1, 2, 3, 4, 5, 6 кодовых комбинаций 001, 010, 011, 100, 101, 110 соответственно.

Мы рассмотрели способ поэтапного масштабирования микрокоманд, и в результате перешли от микрокоманды, которая включает в себя только одну внешнюю или внутреннюю микрооперацию, к микрокоманде, которая включает в себя всю группу внешних и внутренних микроопераций. Чтобы сформировать такие микрокоманды, должен быть реализован микропрограммный автомат в дополнение к ЛСА, предоставляющий информацию о возможности одновременной работы различных операторов и распределении смещений для каждого оператора. Очевидно, что в одну микрокоманду не могут входить оператор V_{qg} и логическое условие α_{qg} , если значение может быть изменено оператором V_{qg} . Задача формирования наименьшего возможного числа микрокоманд ЛСА является сложной.

Считается, что при рассмотрении различных возможных способов построения схемы МА реализуется только один алгоритм. Однако программный способ управления используют именно тогда, когда в автомате необходимо реализовать несколько различных алгоритмов.

Структура графа перехода МА будет во многом зависеть от выбора микрокоманд при сравнении внутренних состояний с микрокомандами.

Особого внимания заслуживают методы кодирования и минимизации числа состояний автомата.

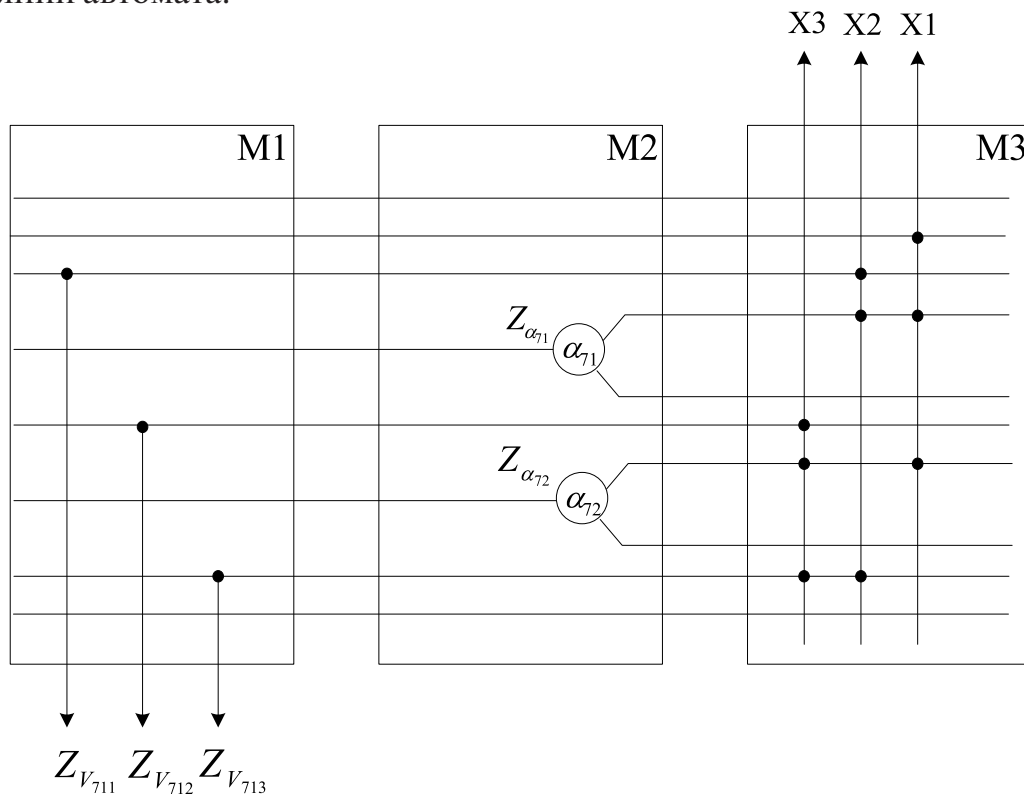


Рис. 2. Структура матрицы МЗ

3. Формирование микрокоманд по логическим схемам алгоритмов технической документации

При использовании схемы алгоритмов для построения МА каждая микрокоманда сопоставляется с внутренним состоянием автомата. В этом контексте задача выбора количества микрокоманд имеет решающее значение, поскольку сложность МА зависит от его решения. Предположим, что производительность МА будет определяться одним ЛСА, при этом значения всех его логических условий (ЛУ) будут изменены только этими операторами ЛСА или останутся неизменными, пока ЛСА не закончится.

Прежде чем объяснять способ образования микрокоманд, необходимо ввести несколько понятий.

Определение 1. Два элемента ЛСА Y_i и Y_j будут противоречивыми, если:

- 1) их нельзя выполнить одновременно;
- 2) Y_i является логическим условием, а Y_j – оператором, причем логическое условие входит в распределение сдвигов оператора Y_j .

Определение 2. Элемент ЛСА МА Y_j , который может быть выполнен непосредственно перед элементом Y_i , назовем предшественником Y_j . Тогда Y_j – последователь Y_i .

Очевидно, у любого элемента ЛСА может быть несколько предшественников. У оператора всегда только один последователь, а у логического условия (двузначного) – два, за счет чего при выполнении ЛСА образуются разветвления.

Элемент ЛСА, который является оператором, всегда имеет только одного последователя, а при логическом условии «двузначное» имеет двух последователей, в результате чего приводит к ветвлению.

Определение 3. Группа элементов ЛСА образует ветвь, если каждый $(i+1)$ элемент этой ветви является последователем i -го элемента (рис. 3).

Один и тот же элемент ЛСА может входить в несколько различных ветвей. Группу элементов ЛСА называют совместимой, если в каждой ветви, образуемой элементами этой группы, не содержатся противоречивые элементы.

Если какой-либо другой элемент ЛСА не соответствует группе, то группа элементов ЛСА, которая соответствует ему, называется максимальной.

Из приведенных выше определений следует, что каждая максимально соответствующая группа элементов ЛСА может интерпретироваться как отдельная микрокоманда. Такая микрокоманда состоит из множества внутренних и внешних микроопераций, но одновременно с определенным множеством значений логических условий выполняются микрооперации, включенные только в одну ветвь микрокоманды.

С каждым внутренним состоянием программного обеспечения связана одна совместимая группа элементов ЛСА. Если первым элементом группы M_j является последователь одного из элементов группы M_i , то МА переходит из одного внутреннего состояния в другое. В этом случае МА выполняет заданный ЛСА.

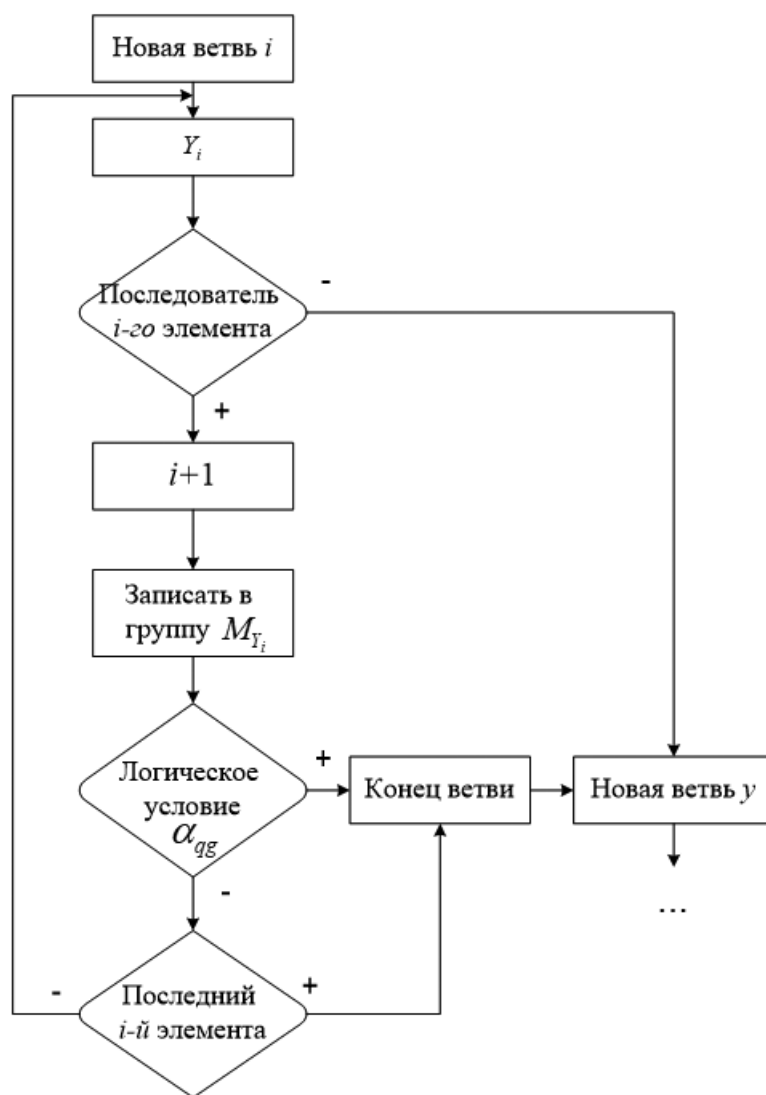


Рис. 3. Последовательность формирования группы M_{Y_i}

Чтобы получить соответствующую группу M_{Y_i} (т. е. ту, что является первым элементом), записывается элемент Y_i ЛСА. Если у Y_i есть один последователь (т. е. Y_i – оператор), он переносится вправо. При наличии двух последователей образуется разветвление и каждый из них выписывается справа от Y_i на отдельной ветви. Этот процесс повторяется для вновь назначенных групповых элементов в каждой ветви.

Если группа M_{Y_i} включает в себя последний оператор ЛСА или требуется ввести элемент ЛСА, который не соответствует по крайней мере одному элементу этой ветви (либо если необходимо записать Y_j , вводя его в другую ветвь группы M_{Y_i}), то направление группы Y_i будет отключено. Во втором случае нужно поставить стрелку Y_j к Y_i . Формирование группы заканчивается после распада всех ее ветвей.

Если первая группа включает не все элементы ЛСА, то вторая будет сформирована начиная с наименьшего по порядку элемента ЛСА, не вошедшего в предыдущую группу. Процесс повторяется, пока каждый элемент ЛСА не будет включен, по крайней мере, в одну группу (рис. 3).

Описанные шаги формирования микрокоманд иллюстрируют предложенный подход, а сам метод универсален для использования в области электронного документооборота [38].

Рассмотрим способ формирования микрокоманд ЛСА A_T :

$$\begin{aligned}
 A_T = & V_0 V_{711} V_{712} V_{713} V_{714} \downarrow^{717} V_{715} V_{716} V_{717} \downarrow^{715} V_{718} \alpha_{711} \uparrow^{711} V_{7110} V_{7111} \downarrow^{716} \\
 & \overline{\alpha_{712}} \uparrow^{712} \downarrow^{711} V_{719} \omega \uparrow^{715} \times \downarrow^{714} V_{7115} \alpha_{713} \uparrow^{713} V_{7116} \alpha_{714} \uparrow^{714} V_{7117} \omega \uparrow^{716} \\
 & \downarrow^{713} V_{7118} \omega \uparrow^{717} \downarrow^{712} V_{7112} V_{7113} V_{7114} V_k.
 \end{aligned} \quad (2)$$

Информация о возможности одновременного выполнения операторов задана в таблице 1. В клетке таблицы на пересечении столбца V_p и строки V_q вставляется знак \vee , если операторы V_p и V_q могут выполняться одновременно в любом из возможных значений ЛСА. В противном случае ставится знак \times .

Зададим следующее распределение сдвигов:

$$V_0 - \{ \alpha_{711} \}.$$

Утверждение 1. В совместной группе ЛСА объединяются непосредственные последовательные элементы.

Образуем максимальные совместимые группы элементов ЛСА A_T . Берем оператор V_0 и приписываем справа его последователя:

$$V_0 \rightarrow [\alpha_{711}]. \quad (3)$$

Так как α_{711} входит в распределение сдвигов оператора V_0 , то ветвь обрывается на предыдущем элементе (т.е. V_0), а α_{711} указывается в квадратных скобках:

$$M_{V_0} = \{ V_0 \rightarrow [\alpha_{711}] \}. \quad (4)$$

Утверждение 2. Элементы, указанные в квадратных скобках в составе совместной группы, не входят в данную группу, а являются начальными элементами других групп.

Создаем наиболее подходящие группы. В этом случае после α_{qg} стрелка верхняя $\overrightarrow{\quad}$ будет означать, что $\alpha_{qg} = 1$, а $\overleftarrow{\quad}$ нижняя — $\alpha_{qg} = 0$.

Таблица 1. Одновременное выполнение операторов ЛСА A_T

V_1	X																		
V_2	X	X																	
V_3	X	X	X																
V_4	X	X	X	X															
V_5	X	X	X	X	X														
V_6	X	X	X	X	X	X													
V_7	X	X	X	X	X	X	X												
V_8	X	X	X	X	X	X	X	X											
V_9	X	V	V	V	V	V	V	V	V										
V_{10}	X	V	V	V	V	V	V	V	V	V									
V_{11}	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X								
V_{12}	X	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V							
V_{13}	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X						
V_{14}	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					
V_{15}	X	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V				
V_{16}	X	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V			
V_{17}	X	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V		
V_{18}	X	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	
V_k	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
	V_0	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}	V_{11}	V_{12}	V_{13}	V_{14}	V_{15}	V_{16}	V_{17}	V_{18}

$$M_{V_0} = \{ V_0 \rightarrow V_{711} \rightarrow V_{712} \rightarrow V_{713} \rightarrow V_{714} \rightarrow V_{715} \rightarrow V_{716} \rightarrow V_{717} \rightarrow V_{718} \rightarrow [\alpha_{711}] \}$$

$$M_{\alpha_{711}} = \left\{ \begin{array}{l} \alpha_{711} \\ \rightarrow [V_{719}] \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \rightarrow V_{7110} \rightarrow V_{7111} \rightarrow \alpha_{712} - \\ \rightarrow [V_{719}] \\ \rightarrow V_{7112} \rightarrow V_{7113} \rightarrow V_{7114} \rightarrow V_k \end{array} \right\}$$

$$\begin{aligned}
 M_{V_{719}} &= \{V_{719} \rightarrow \omega^{715} \rightarrow V_{718} \rightarrow [\alpha_{711}]\} \\
 M_{\alpha_{713}} &= \left\{ \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} \rightarrow V_{7116} \rightarrow [\alpha_{714}] \\ V_{7115} \rightarrow \alpha_{713} \end{array} \right| \\ \rightarrow [V_{7118}] \end{array} \right\} \\
 M_{\alpha_{714}} &= \left\{ \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} \rightarrow V_{7117} \rightarrow \omega^{716} \rightarrow \alpha_{712} \left. \begin{array}{l} \rightarrow [V_{719}] \\ \rightarrow V_{7112} \rightarrow V_{7113} \rightarrow V_{7114} \rightarrow V_k \end{array} \right\} \\ \alpha_{714} \end{array} \right| \\ \rightarrow V_{7115} \rightarrow [\alpha_{713}] \end{array} \right\} \\
 M_{V_{718}} &= \{V_{7118} \rightarrow \omega^{717} \rightarrow V_{715} \rightarrow V_{716} \rightarrow V_{717} \rightarrow V_{718} \rightarrow [\alpha_{711}]\} \quad (5)
 \end{aligned}$$

Получено шесть соответствующих групп элементов ЛСА. Сравним каждую из шести совместимых групп с максимальной микрокомандой, т. е. внутренним состоянием МА. В этом случае получаем структурную диаграмму МА, представленную на рисунке 4. Из структурной схемы МА видно, что имеются пересекающиеся микрокоманды, поскольку один и тот же элемент ЛСА находится в различных микрокомандах. Это связано с тем, что полученная система микрокоманд значительно превышает количество операторов и логических условий, которые происходят в исходных ЛСА. В то же время ясно, что микрокомандная система, вызывающая схему МА, может быть точно определена. Таким образом, количество данных элементов ЛСА не может служить признаком сложности схемы МА. Сложность определяется другой ЛСА, которая называется расширенной и обозначается как $U^{A_{qg}}$.

Утверждение 3. *Расширенная ЛСА составлена в соответствии с существующими микрокомандными системами, и количество элементов в точности равно числу операторов и логических условий микрокомандной системы.*

Если в исходной ЛСА A_{qg} нет повторяющихся элементов, то в расширенной ЛСА $U^{A_{qg}}$ одни и те же элементы могут неоднократно повторяться.

Для получения системы микрокоманд (5) расширенная ЛСА будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 U^{A_{qg}} &= V_0 V_{711} V_{712} V_{713} V_{714} V_{715} V_{716} V_{717} V_{718} \downarrow^{715} \\
 &\downarrow^{717} \alpha_{711} \uparrow^{711} V_{7110} V_{7111} \downarrow^{716} \overline{\alpha_{712}} \uparrow^{712} \downarrow^{711} V_{719} V_{718} \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \omega \uparrow^{715} V_{7115} \downarrow^{714} \alpha_{713} \uparrow^{713} V_{7116} \alpha_{714} \uparrow^{714} \\ & V_{7117} \omega \uparrow^{716} \downarrow^{714} V_{7115} \omega \uparrow^{714} \downarrow^{713} \\ & V_{7118} V_{715} V_{716} V_{717} V_{718} \omega \uparrow^{717} \downarrow^{712} V_{7112} V_{7113} V_{7114} V_k. \end{aligned}$$

Указанная выше расширенная ЛСА содержит 24 элемента вместо 18 в исходной ЛСА (2).

Утверждение 4. В зависимости от заданных условий совместимости элементов ЛСА и выбранного способа формирования микрокоманд по одной и той же ЛСА могут быть получены различные системы микрокоманд и, следовательно, различные расширенные ЛСА.

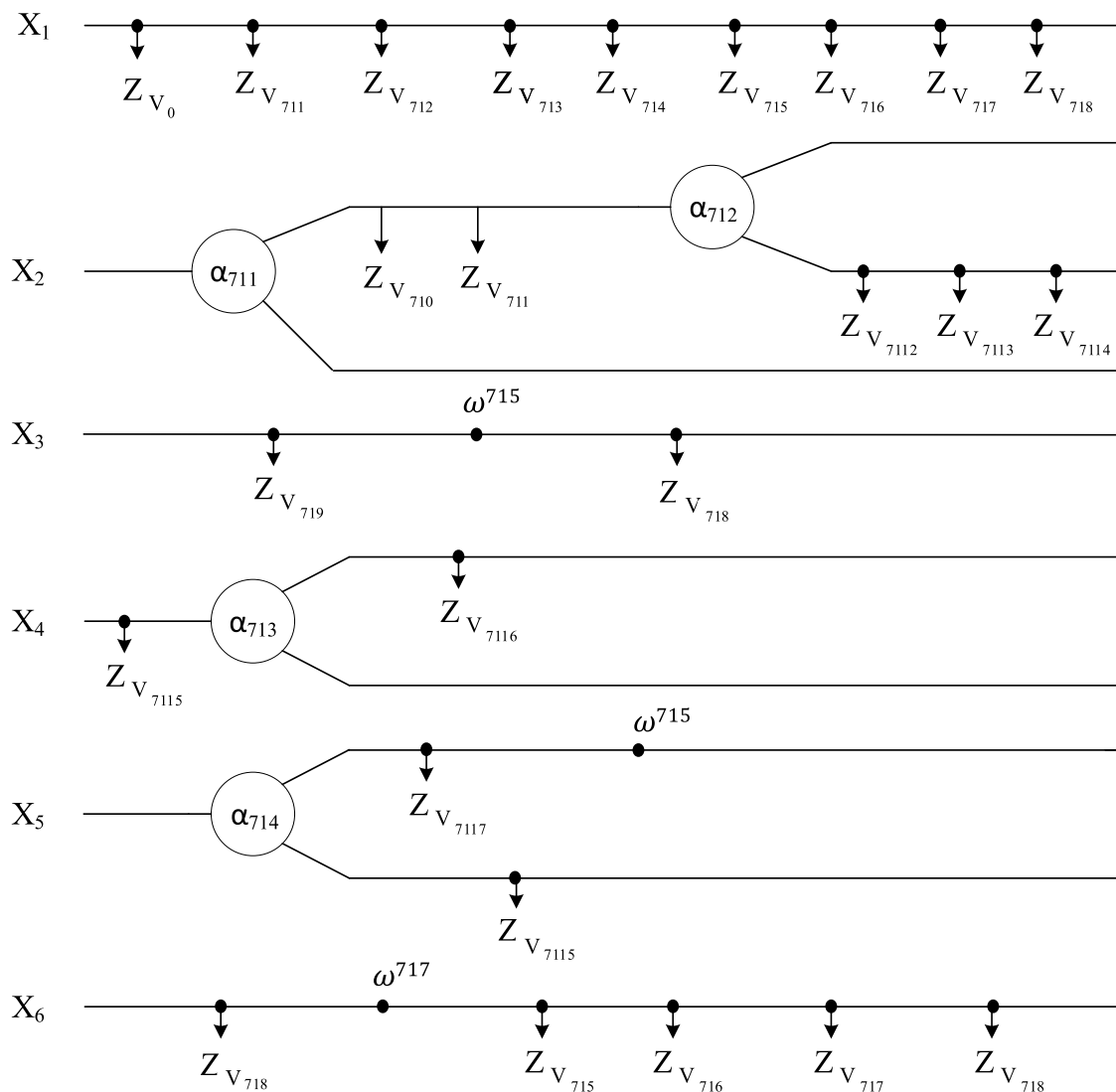


Рис. 4. Структурная схема МА ЛСА A_T

Утверждение 5. Схема МА строится по системе микрокоманд. Каждой схеме МА соответствует своя ЛСА $U^{A_{qs}}$, одна и та же ЛСА U будет соответствовать целому множеству схем МА.

Следовательно, для оценки сложности схемы МА целесообразно использовать расширенную ЛСА.

Обращаемся к системе микрокоманд, получаемой (6), и делаем некоторые изменения, определяя и повторяя общие части некоторых из них. В результате можем получить систему микрокоманд:

$$M_{V_0} = \{V_0 \rightarrow V_{711} \rightarrow V_{712} \rightarrow V_{713} \rightarrow V_{714} \rightarrow \downarrow^3 V_{715} \rightarrow V_{716} \rightarrow V_{717} \rightarrow \downarrow^1 V_{718} \rightarrow [\alpha_{711}]\}$$

$$M_{\alpha_{711}} = \left\{ \alpha_{711} \left| \begin{array}{l} \rightarrow V_{7110} \rightarrow V_{7111} \rightarrow [\alpha_{712}] \\ \rightarrow [V_{719}] \end{array} \right. \right\}$$

$$M_{\alpha_{712}} = \left\{ \alpha_{712} \left| \begin{array}{l} \rightarrow [V_{719}] \\ \rightarrow V_{7112} \rightarrow V_{7113} \rightarrow V_{7114} \rightarrow V_k \end{array} \right. \right\}$$

$$M_{V_{719}} = \{V_{719} \rightarrow 1\}$$

$$M_{\alpha_{713}} = \left\{ \downarrow^2 V_{7115} \rightarrow \alpha_{713} \left| \begin{array}{l} \rightarrow V_{7116} \rightarrow [\alpha_{714}] \\ \rightarrow [V_{7118}] \end{array} \right. \right\}$$

$$M_{\alpha_{714}} = \left\{ \alpha_{714} \left| \begin{array}{l} \rightarrow V_{7117} \rightarrow [\alpha_{712}] \\ \rightarrow 2 \end{array} \right. \right\}$$

$$M_{V_{7118}} = \{V_{7118} \rightarrow 3\}. \quad (7)$$

Для перехода к одинаковым частям микрокоманд применены пронумерованные стрелки, как в ЛСА. На рисунке 5 приведена схема МА, построенная по этой системе микрокоманд.

Рассмотрим преобразование микрокоманд в упрощенную схему МА. В отличие от схемы на рисунке 5, в схеме МА появились дополнительные элементы ИЛИ, соответствующие неоднократному обращению к одному и тому же элементу ЛСА. Кроме того, такая же микрооперация должна быть выполнена для различных внутренних состояний МА, которые могут вызвать определенные трудности при кодировании внутреннего состояния автомата.

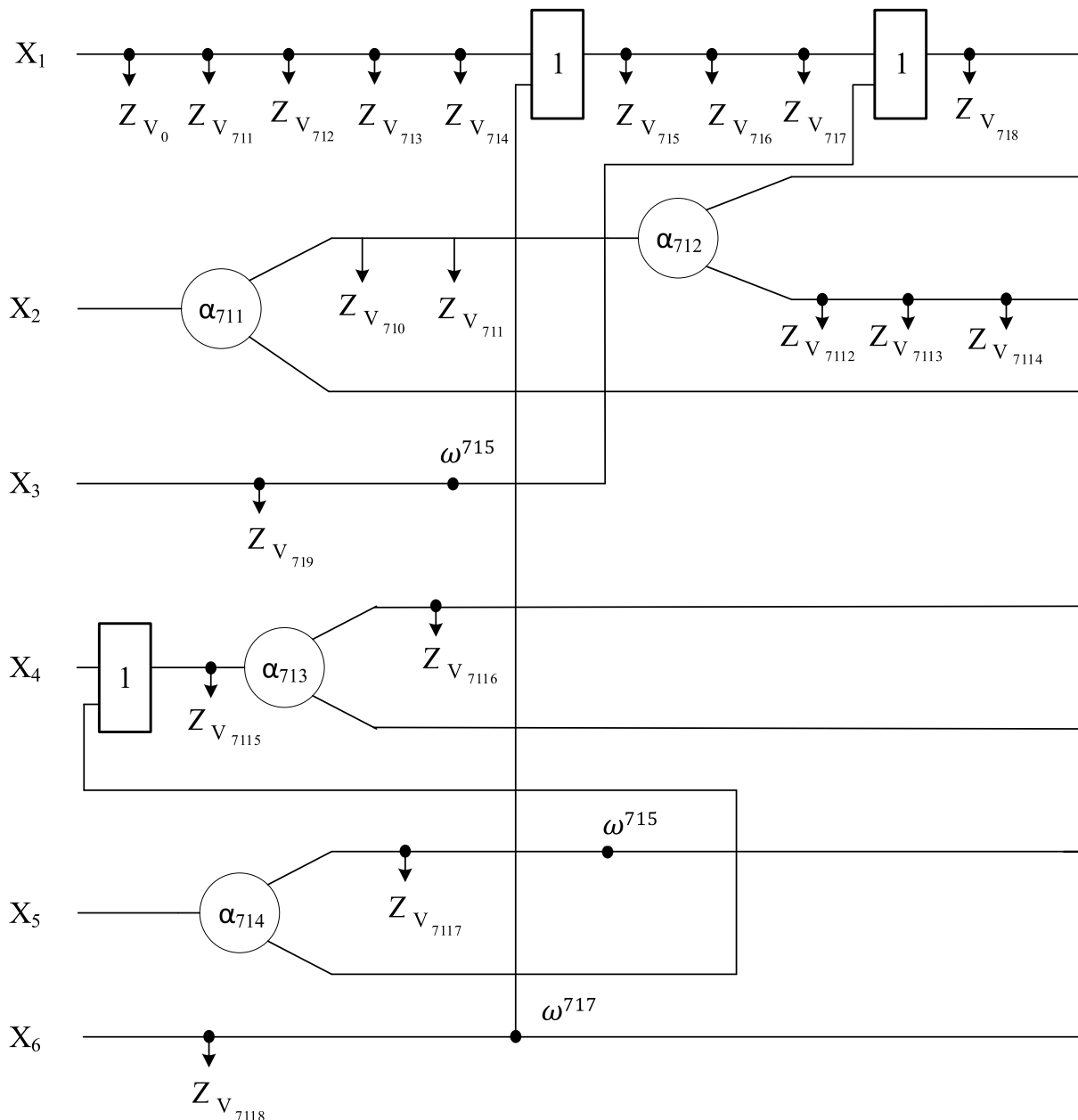


Рис. 5. Схема МА с одинаковыми частями микрокоманд ЛСА A_r

Внутреннее состояние этого автомата позволяет осуществлять кодирование следующим образом:

$$x_1 = 000, x_2 = 001, x_3 = 010, x_4 = 011, x_5 = 101, x_6 = 110.$$

Если микрооперация $z_{V_{718}}$ выполнена, то автомат может быть в первом, третьем или шестом внутреннем состоянии, т. к. эта операция является частью трех микрокоманд.

Повторное обращение к одной и той же внешней микрооперации не упрощает схему матрицы $M1$, а делает ее многоступенчатой, поскольку общее количество выполнения любой микрооперации не уменьшается.

Микрокоманда сравнивалась с максимальной группой соответствующих ЛСА элементов. При этом достигаются максимальные действия, т. е. выполняется минимальное количество циклов ЛСА МА, а МА имеет внутренние состояния, которые минимальны или близки к нему. Однако комбинационная часть автомата при этом может быть не минимальной. Использование в качестве микрокоманд не максимальных групп совместимых элементов ЛСА может привести к упрощению матриц $M1$ и $M2$ схемы МА.

В (7), выделив в отдельную микрокоманду общие части максимальных совместимых групп, получим следующую систему микрокоманд:

$$M_{V_0} = \{ V_0 \rightarrow V_{711} \rightarrow V_{712} \rightarrow V_{713} \rightarrow V_{714} \rightarrow V_{715} \rightarrow V_{716} \rightarrow V_{717} \rightarrow V_{718} \rightarrow [\alpha_{711}] \}$$

$$M_{\alpha_{711}} = \left\{ \alpha_{711} \left| \begin{array}{l} \rightarrow V_{7110} \rightarrow V_{7111} \rightarrow [\alpha_{712}] \\ \rightarrow [V_{719}] \end{array} \right. \right\}$$

$$M_{\alpha_{712}} = \left\{ \alpha_{712} \left| \begin{array}{l} \rightarrow [V_{719}] \\ \rightarrow V_{7112} \rightarrow V_{7113} \rightarrow V_{7114} \rightarrow V_k \end{array} \right. \right\}$$

$$M_{V_{719}} = \{ V_{719} \rightarrow [V_{718}] \}$$

$$M_{\alpha_{713}} = \left\{ V_{7115} \rightarrow \alpha_{713} \left| \begin{array}{l} \rightarrow V_{7116} \rightarrow [\alpha_{714}] \\ \rightarrow [V_{7118}] \end{array} \right. \right\}$$

$$\begin{aligned}
 M_{\alpha_{714}} &= \left\{ \alpha_{714} \left[\begin{array}{l} \rightarrow V_{7117} \rightarrow [\alpha_{712}] \\ \rightarrow V_{7115} \rightarrow [\alpha_{713}] \end{array} \right] \right\} \\
 M_{V_{7118}} &= \{ V_{7118} \rightarrow [V_{715}] \} \\
 M_{V_{715}} &= \{ V_{715} \rightarrow V_{716} \rightarrow V_{717} \rightarrow V_{718} \rightarrow \} \\
 M_{V_{718}} &= \{ V_{718} \rightarrow [\alpha_{711}] \}. \tag{8}
 \end{aligned}$$

Использование этой системы микрокоманд упрощает комбинированную часть МА. Ситуация похожа на событие, которое возникает при синтезе автомата классического типа: увеличение внутреннего состояния автомата приводит к упрощению его комбинированной схемы.

Однако в настоящее время нет алгоритма, который позволяет получить минимальную схему МА от заданного ЛСА.

Заключение

В статье предложен способ построения структурной схемы формализованной модели ТД образования микросхем, эффективного для решения задач электронного документооборота [39].

Представленную модель можно использовать при автоматизации не только процессов УКЖАТ, но и электронного документооборота в целом. Применение предложенной методики построения модели ТД позволяет разработать достоверное прикладное программное обеспечение для решения задач оперативного документооборота.

Предлагаемая структурная схема формализованной модели ТД учитывает матрицы внешних и внутренних микроопераций, а также матрицы формирования кода следующей микрокоманды. Упрощение схемы МА достигается за счет одновременного выполнения внешних и внутренних микроопераций. Число микрокоманд МА определяется не числом элементов ЛСА, а количеством групп одновременно выполняемых микроопераций.

Разработан метод упрощения схемы МА, позволяющий одновременно осуществлять минимизацию и кодирование автомата с учетом различных требований, связанных с документооборотом хозяйств автоматики и телемеханики. При сопоставлении микрокоманд достигается максимальное быстроедействие, т. е. ЛСА выполняется за минимальное число тактов работы МА, а сам МА имеет минимальное или близкое к нему число внутренних состояний.

Использование в качестве микрокоманд не максимальных групп совместимых элементов ЛСА привело к упрощению матриц схемы МА. Применение системы микрокоманд упрощает комбинационную часть МА.

Изложенные в статье методы формирования модели ТД представляются перспективными для решения задач электронного документооборота.

Библиографический список

1. *Baratov D. Kh.* Functional Support of the Automated Accounting System and Control of Devices in Railway Automation Telemechanics / D. Kh. Baratov, A. Kh. Boltaev, E. T. Astanaliyev // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. – 2019. – Vol. 6, Iss. 3. – P. 8572–8580.
2. *Шаманов В. И.* Обобщенная математическая модель процесса эксплуатации систем автоматики и телемеханики / В. И. Шаманов // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2, № 2. – С. 163–179.
3. *Aripov N. M.* Questions intellectualization of management of transportation processes for railways / N. M. Aripov, D. X. Baratov // Міжнародний науковий журнал. – 2016. – № 9. – С. 53–55.
4. *Булавский П. Е.* Иерархическая многоматричная формализация имитационной модели электронного документооборота технической документации / П. Е. Булавский, Д. С. Марков; под ред. Вл. В. Сапожникова // Актуальные вопросы развития систем железнодорожной автоматики телемеханики: сб. науч. трудов. – СПб.: ПГУПС, 2013. – С. 52–59.
5. *Василенко М. Н.* Мониторинг и управление проектированием и строительством систем СЦБ / М. Н. Василенко, П. Е. Булавский, Б. П. Денисов // Автоматика, связь и информатика. – 2009. – № 12. – С. 5–7.
6. *Булавский П. Е.* Концептуальная модель электронного документооборота технической документации / П. Е. Булавский // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2011. – № 1 (32). – С. 60–63.
7. *Мамиконов А. Г.* Методы разработки автоматизированных систем управления / А. Г. Мамиконов. – М.: Энергия, 1973. – 336 с.
8. *Арипов Н. М.* Формализация электронного документооборота железнодорожной автоматики и телемеханики на основе имитационного моделирования / Н. М. Арипов, Д. Х. Баратов, Э. К. Аметова // Вестник ТашИИТ. – 2017. – № 2–3. – С. 90–97.
9. *Седых Д. В.* Отраслевой формат технической документации на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Седых, Д. В. Зуев, М. А. Гордон // Автоматика на транспорте. – 2017. – № 2. – С. 270–279.
10. *Марков Д. С.* Концепция и инструментальные средства динамического порционного моделирования сложных систем массового обслуживания / Д. С. Марков, А. А. Лыков, Соколов В. Б., Константинова Т. Ю. // Сборник: Транспортные интеллектуальные системы. – 2017. – С. 49–58.
11. *Василенко М. Н.* Решение задачи контроля проектных работ / М. Н. Василенко, Д. В. Зуев, Д. В. Седых, А. Ю. Яворская // Автоматика, связь, информатика. – 2017. – № 2. – С. 8–11.
12. *Степанов М. Ф.* Математическое моделирование интеллектуальных самоорганизующихся систем: реализация механизма планирования действий / М. Ф. Степанов,

- A. M. Степанов // Информационные технологии и нанотехнологии. – 2018. – С. 1681–1688.
13. *Guo F.* Electronic Document Management Systems for the Transportation Construction Industry / F. Guo, C. T. Jähren, Y. Turkan // International Journal of Construction Education and Research. – 2019. – P. 1–16.
 14. *Sun M. T.* The architecture and models for document security reasoning in an electronic document management system / M. T. Sun, J. L. Hou // Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers. – 2003. – Т. 20, N 4. – P. 305–316.
 15. *Sokolov S. S.* Methods and models of designing the secure system of electronic document management in transport logistic cluster / S. S. Sokolov, A. S. Karpina, V. D. Gaskarov // Vestnik of Astrakhan State Technical University. – 2016. – № 3. – P. 40–52. – (Management, Computer Sciences and Informatics)
 16. *Afonso C. M.* The moderator role of Gender in the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT): A study on users of Electronic Document Management Systems / C. M. Afonso, J. L. Roldán Salgueiro, M. J. Sánchez Franco, M. d. l. O. y González // En 7th International Conference on Partial Least Squares and Related Methods. – 2012. – P. 1–8.
 17. *Yatin S. F. M.* Electronic Document Management System: Malaysian Experience / S. F. M. Yatin, A. A. M. Ramli, H. Shuhaimi, H. Hashim, W. Ab K. W. Dollah, M. K. Zaini, M. R. A. Kadir // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. – 2015. – Т. 9, N 3. – P. 82–89.
 18. *Aurelia P.* A document management system modeling / P. Aurelia, T. Ana // ANALELE UNIVERSITĂȚII DIN ORADEA. – 2008. – P. 1479.
 19. *Арипов Н. М.* Методика построения математической модели электронного документооборота технической документации железнодорожной автоматики / Н. М. Арипов, Д. Х. Баратов // Автоматика на транспорте. – 2017. – Т. 3, № 1. – С. 98–111.
 20. *Baratov D. K.* Formalization of electronic technical document management of railway automatics and telemechanics / D. K. Baratov, N. M. Aripov // Europäische Fachhochschule. – 2016. – N 8. – P. 33–35.
 21. *Baratov D. K.* Formalized Methods of Analysis and Synthesis of Electronic Document Management of Technical Documentation / D. K. Baratov, N. M. Aripov, D. K. Ruziev // 2019 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). – 2019. – P. 1–9.
 22. *Вернебург Р.* Реализация математических моделей на ЭВМ / Р. Вернебург. – М.: Прогресс, 1969. – 189 с.
 23. *Мамиконов А. Г.* Методы разработки автоматизированных систем управления / А. Г. Мамиконов. – М.: Энергия, 1973. – 336 с.
 24. *Мамиконов А. Г., Авен О. И, Кульба В. В.* Формализованное представление результатов анализа и проектирование автоматизированных систем управления / А. Г. Мамиконов, О. И. Авен, В. В. Кульба. – М.: Институт проблем управления, 1970. – 57 с.
 25. *Шеннон Р.* Имитационное моделирование систем – искусство и науки / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 418 с.
 26. *Таль А. А.* Иерархия и параллелизм в сетях Петри / А. А. Таль // Автоматика и телемеханика. – 1982. – № 7. – С. 113–122.
 27. *Лазарев В. Г., Пийль Е. И.* Синтез управляющих автоматов / В. Г. Лазарев, Е. И. Пийль. – М.: Энергия, 1978. – 408 с.
 28. *Рогинский В. Н.* Основы дискретной автоматики / В. Н. Рогинский. – М.: Связь, 1975. – 432 с.
 29. *Янов Ю. И.* О логических схемах алгоритмов / Ю. И. Янов // Проблемы кибернетики. – 1958. – Вып. 2. – С. 75–127.

30. *Калман Р. Э.* Очерки по математической теории систем / Р. Э. Калман, П. Л. Фалб, М. А. Арбиб. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 400 с.
31. *Долинский М.* Технология разработки алгоритмически сложных цифровых схем с помощью автоматического синтеза микропрограммных автоматов / М. Долинский, И. Коршунов, А. Толкачев, И. Ермолаев, В. Литвинов // Компоненты и технологии. – 2003. – № 8. – С. 124–128.
32. *Клебан В. О.* Применение конечных автоматов в документообороте / В. О. Клебан, Ф. А. Новиков // Научно-техническом вестнике СПбГУ ИТМО. – 2008. – Вып. 53. – С. 286–295.
33. *Сапожников В. В.* Самопроверяемые дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – СПб: Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
34. *Wilkes M. V.* Micro-programming and the design of the control circuits in an electronic digital computer / M. V. Wilkes, J. B. Stringer // Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. – UK.: Cambridge University Press, 1953. – Vol. 49, N 2. – P. 230–238.
35. *Furth S.* Semantification of large corpora of technical documentation / S. Furth, J. Baumeister // Enterprise Big Data Engineering, Analytics, and Management. – 2016. – P. 171–200.
36. *Aguilar A.* A hamming distance and fuzzy logic-based algorithm for P2P content distribution in enterprise networks / A. Aguilar, C. Lozoya, L. M. Orona // Peer-to-Peer Networking and Applications. – 2019. – Vol. 12, N 5. – P. 1323–1335.
37. *Baratov D. X.* The issues of creating a formalized model of the technical documentation / D. X. Baratov // Міжнародний науковий журнал Інтернаука. – 2017. – № 4 (1). – С. 22–23.
38. *Сапожников В. В.* Основы теории надежности и технической диагностики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. – М.: Лань, 2019. – 588 с.
39. *Mendoza A. R.* Electronic document management system implementing internet of things (IOT) / A. R. Mendoza, C. Alvarez, H. M. Castillo, M. Manongsong, A. Santiago // International Journal of Advanced Research in Computer Science. – 2019. – Vol. 10, N 2. – С. 10–15.

D. Kh. Baratov

*The department of "Automation, Remote Control and Telecommunications in Railway Transport",
Tashkent Railway Engineering Institute, Tashkent*

SYNTHESIS OF MODELS OF TECHNICAL DOCUMENTATION ELECTRONIC MANAGEMENT WITH REGARD TO ITS INTERNAL STATE

The paper examines the specific features of technical documentation electronic management for railway automation and remote control. The problems of synthesis of mathematical models of technical documentation electronic management for railway automation and remote control are discussed. For this purpose, the real processes of creation, verification and use of technical documentation were studied using the example of the process of monitoring and management of railway automation and remote control devices, which made it possible to outline the structure of a formalized model of technical documentation. A model of technical documentation electronic management has been built

using the mathematical apparatus of finite automata. A structural diagram of an automaton model of technical documentation has been developed. The proposed scheme of a formalized model of technical documentation consists of matrices of external micro-operations, internal micro-operations, and code generation for the subsequent micro-components. The number of internal states of the microprogram automaton is fully determined by the number of elements in logic circuits of algorithms. The size of the matrices depends on the number of operators and conditions in logic circuits of algorithms. The microprogram automaton scheme is simplified through the simultaneous execution of external and internal micro-operations. The number of micro-commands is determined by the number of groups of simultaneously executed micro-operations. Micro-commands have been formed according to the logic circuits of technical documentation algorithms. The use of the proposed methodology for building a technical documentation model enables the development of reliable applied software for solving the problems of operational document management for railway automation and remote control.

Technical documentation electronic management, formal presentation of technical documentation, logic circuits of algorithms, structural diagram of an automaton model of technical documentation, micro-commands

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-332-355

References

1. Baratov D. Kh., Boltaev A. Kh. & Astanaliev E. T. (2019) Functional Support of the Automated Accounting System and Control of Devices in Railway Automation Telemechanics. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 2019, vol. 6, iss. 3, pp. 8572–8580.
2. Shamanov V.I. (2016) Obobshchennaya matematicheskaya model' protsessa ekspluatatsii sistem avtomatiki i telemekhaniki [Generalized mathematical model of the operation process of automation and remote control systems]. *Avtomatika na transporte [Automatic Equipment in Transport]*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 163–179. (In Russian)
3. Aripov N. M. & Baratov D. X. (2016) Questions intellectualization of management of transportation processes for railways. *Mizhnarodniy nauchiy zhurnal [International scientific journal]*, 2016, no. 9, pp. 53–55.
4. Bulavskiy P. E. & Markov D. S. (2013) Iyerarkhicheskaya mnogomatrixnaya formalizatsiya imitatsionnoy modeli elektronnoy dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentatsii [Hierarchical multi-matrix formalization of the simulation model of technical documentation electronic management]. *Aktual'nyye voprosy razvitiya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki. Sb. nauch. trudov [Actual problems of railway automation and remote control systems development. Scientific proceedings]*. Ed. by V.I. V. Sapozhnikov. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2013, pp. 52–59. (In Russian)
5. Vasilenko M. N., Bulavskiy P. E. & Denisov B. P. (2009) Monitoring i upravleniye proyektirovaniyem i stroitel'stvom sistem STsB [Monitoring and management of design and construction of signals and interlocking systems]. *Avtomatika, svyaz' i informatika [Automation, communication and computer science]*, 2009, no. 12, pp. 5–7. (In Russian)
6. Bulavskiy P. E. (2011) Kontseptual'naya model' elektronnoy dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentatsii [Conceptual model of technical documentation electronic management]. *Transport Rossiyskoy Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike [Transport of the Russian Federation. A magazine of science, economy and practice]*, no. 1, pp. 60–63. (In Russian)

7. Mamikonov A. G. (1973) Metody razrabotki avtomatizirovannykh sistem upravleniya [Methods for the development of automated control systems]. Moscow, Energiya Publ., 1973, 336 p. (In Russian)
8. Aripov N. M., Baratov D. Kh. & Ametova E. K. (2017) Formalizatsiya elektronnoy dokumentatsii zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki na osnove imitatsionnogo modelirovaniya [Formalization of electronic document management for railway automation and remote control based on simulation]. *Bulletin of TashREI [Tashkent Railway Engineering Institute]*, 2017, no. 2–3, pp. 90–97. (In Russian)
9. Sedykh D. V., Zuyev D. V. & Gordon M. A. (2017) Otrasleyoy format tekhnicheskoy dokumentatsii na ustroystva zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Sectoral format of technical documentation for railway automation and remote control devices]. *Avtomatika na transporte [Automatic Equipment in Transport]*, 2017, no. 2, pp. 270–279. (In Russian)
10. Markov D. S., Lykov A. A., Sokolov V. B. & Konstantinova T. Yu. (2017) Kontseptsiya i instrumental'nyye sredstva dinamicheskogo portsiionnogo modelirovaniya slozhnykh sistem massovogo obsluzhivaniya [Concept and tools of dynamic portion modeling of complex mass service systems]. *Collected papers: Transportnyye intellektual'nyye sistemy [Intelligent transport systems]*, 2017, pp. 49–58. (In Russian)
11. Vasilenko M. N., Zuyev D. V., Sedykh D. V. & Yavorskaya A. Yu. (2017) Resheniye zadachi kontrolya proyektnykh rabot [Solving the problem of design work control]. *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, communication, computer science]*, 2017, no. 2, pp. 8–11. (In Russian)
12. Stepanov M. F. & Stepanov A. M. (2018) Matematicheskoye modelirovaniye intellektual'nykh samoorganizuyushchikhsya sistem: realizatsiya mekhanizma planirovaniya deystviy [Mathematical modeling of intelligent self-organizing systems: Action planning mechanism implementation]. *Information Technology and Nanotechnology*, 2018, pp. 1681–1688. (In Russian)
13. Guo F., Jahren C. T. & Turkan Y. (2019) Electronic Document Management Systems for the Transportation Construction Industry. *International Journal of Construction Education and Research*, 2019, pp. 1–16.
14. Sun M. T. & Hou J. L. (2003) The architecture and models for document security reasoning in an electronic document management system. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 2003, vol. 20, no. 4, pp. 305–316.
15. Sokolov S. S., Karpina A. S. & Gaskarov V. D. (2016) Methods and models of designing the secure system of electronic document management in transport logistic cluster. *Vestnik of Astrakhan State Technical University*, 2016, no. 3, pp. 40–52. – (Management, Computer Sciences and Informatics).
16. Afonso C. M. et al. (2012) The moderator role of Gender in the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT). A study on users of Electronic Document Management Systems. *En 7th International Conference on Partial Least Squares and Related Methods*, 2012, pp. 1–8.
17. Yatin S. F. M. et al. (2015) Electronic Document Management System: Malaysian Experience. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2015, vol. 9, no. 3, pp. 82–89.
18. Aurelia P. & Ana T. A document management system modeling. *ANALELE UNIVERSITĂȚII DIN ORADEA*, 2008, pp. 1479.
19. Aripov N. M. & Baratov D. Kh. (2017) Metodika postroyeniya matematicheskoy modeli elektronnoy dokumentatsii tekhnicheskoy dokumentatsii zheleznodorozhnoy avtomatiki [Methods for building a mathematical model of technical documentation electronic]

- management for railway automation]. *Avtomatika na transporte [Automatic Equipment in Transport]*, 2017, vol. 3, no. 1, pp. 98–111. (In Russian)
20. Baratov D. K. & Aripov N. M. (2016) Formalization of electronic technical document management of railway automatics and telemechanics. *Europaische Fachhochschule*, 2016, no. 8, pp. 33–35.
 21. Baratov D. K., Aripov N. M. & Ruziev D. K. (2019) Formalized Methods of Analysis and Synthesis of Electronic Document Management of Technical Documentation. *IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*, 2019, pp. 1–9.
 22. Verneburg R. (1969) Realizatsiya matematicheskikh modeley na EVM [Implementation of mathematical models on a computer]. Moscow, Progress Publ., 1969, 189 p. (In Russian)
 23. Mamikonov A. G. (1973) Metody razrabotki avtomatizirovannykh sistem upravleniya [Methods for the development of automated control systems]. Moscow, Energiya Publ., 1973, 336 p. (In Russian)
 24. Mamikonov A. G., Aven O. I. & Kul'ba V. V. (1970) Formalizovannoye predstavleniye rezul'tatov analiza i proyektirovaniye avtomatizirovannykh sistem upravleniya [Formalized presentation of analysis results and design of automated control systems]. Moscow, Institute of Management Problems Publ., 1970, 57 p. (In Russian)
 25. Shannon R. E. (1978) Imitatsionnoye modelirovaniye sistem – iskusstvo i nauki [Systems Simulation: The Art and Science]. Moscow, Mir Publ., 1978, 418 p. (In Russian)
 26. Tal' A. A. (1982) Iyerarkhiya i parallelizm v setyakh Petri [Hierarchy and parallelism in Petri nets]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and Remote Control]*, 1982, no. 7, pp. 113–122. (In Russian)
 27. Lazarev V. G. & Piy'l' E. I. (1978) Sintez upravlyayushchikh avtomatov [Synthesis of control automata]. Moscow, Energiya Publ., 1978, 408 p. (In Russian)
 28. Roginskiy V. N. (1975) Osnovy diskretnoy avtomatiki [Foundations of discrete automation]. Moscow, Svyaz' Publ., 1975, 432 p. (In Russian)
 29. Yanov Yu. I. (1958) O logicheskikh skhemakh algoritmov [On logic circuits of algorithms]. *Problemy kibernetiki [Problems of Cybernetics]*, 1958, iss. 2, pp. 75–127. (In Russian)
 30. Kalman R. E., Falb P. L. & Arbib M. A. (2004) Ocherki po matematicheskoy teorii sistem [Topics in Mathematical System Theory]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2004, 400 p. (In Russian)
 31. Dolinskiy M., Korshunov I., Tolkachev A., Ermolayev I. & Litvinov V. (2003) Tekhnologiya razrabotki algoritmicheski slozhnykh tsifrovyykh skhem s pomoshch'yu avtomaticheskogo sinteza mikroprogrammnykh avtomatov [Technology for the development of algorithmically complex digital circuits using automatic synthesis of micro-program automata]. *Komponenty i tekhnologii [Components & Technologies]*, 2003, no. 8, pp. 124–128. (In Russian)
 32. Kleban V. O. & Novikov F. A. (2008) Primeneniye konechnyykh avtomatov v dokumentooborote [The use of finite-state automata in document management]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics published by ITMO University*, 2008, iss. 53, pp. 286–295. (In Russian)
 33. Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov V. B. (1992) Samoproveryayemye diskretnyye ustroystva [Self-checking discrete devices]. Saint Petersburg, Energoatomizdat, 1992, 224 p. (In Russian)
 34. Wilkes M. V. & Stringer J. B. (1953) Micro-programming and the design of the control circuits in an electronic digital computer. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. UK, Cambridge University Press, 1953, vol. 49, no. 2, pp. 230–238.
 35. Furth S. & Baumeister J. (2016) Semantification of large corpora of technical documentation. *Enterprise Big Data Engineering, Analytics, and Management*, 2016, pp. 171–200.

36. Aguilar A., Lozoya C. & Orona L. M. (2019) A hamming distance and fuzzy logic-based algorithm for P2P content distribution in enterprise networks. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 2019, vol. 12, no. 5, pp. 1323–1335.
37. Baratov D. X. (2017) The issues of creating a formalized model of the technical documentation. *Mizhnarodniy nauchiy zhurnal Internauka [International scientific journal Internauka]*, 2017, no. 4, pp. 22–23.
38. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. & Efanov D. V. (2019) Osnovy teorii nadezhnosti i tekhnicheskoy diagnostiki [Reliability and technical diagnostics theory fundamentals]. Moscow, Lan' Publ., 2019, 588 p. (In Russian)
39. Mendoza A. R. et al. (2019) Electronic document management system implementing internet of things (IOT). *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 10–15.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Д. С. Марковым
Поступила в редакцию 28.03.2020, принята к публикации 12.04.2020*

БАРАТОВ Дилшод Хамидуллаевич – доктор технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте» Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта

e-mail: baratovdx@yandex.ru

© Баратов Д. Х., 2020

УДК 656.25:004.942

**П. Е. Булавский, д-р техн. наук,
О. К. Ваисов**

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ПОИСКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ В СИСТЕМАХ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ Поездов НА БАЗЕ ИЕРАРХИЧЕСКИХ ЦВЕТНЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Проведен анализ статистических данных об отказах систем интервального регулирования движения поездов. Выполнены исследования по оценке времени поиска и устранения отказов с учетом требований формализации технологических процессов поиска и устранения отказов сигнальной точки системы числовой кодовой автоблокировки с помощью аппарата иерархических цветных временных сетей Петри. Разработана имитационная модель для оценки времени восстановления системы по результатам поиска отказов сигнальной точки путем анализа состояния технических средств, статистической и нормативной документации. Используются методы теории сетей Петри, которые базируются на дискретно-событийной парадигме имитационного моделирования, а также информационный метод поиска и устранения неисправностей технических средств в системах железнодорожной автоматики и телемеханики. Разработанная имитационная модель позволяет оценить среднее время восстановления системы после возникновения неисправности в сигнальной точке числовой кодовой автоблокировки. Модель позволяет осуществлять настройки временных параметров технологического процесса поиска отказов (время оповещения, время прибытия к месту, время поиска отказов и время устранения неисправности). Для корректной оценки вышеуказанных параметров с учетом местных особенностей дистанции СЦБ и квалификации обслуживающего персонала в имитационной модели существует возможность задания как детерминированного, так и вероятностного срабатывания переходов сетей Петри.

Автоблокировка, отказ, неисправность, иерархические цветные временные сети Петри, метки, позиции, переходы, ингибиторные дуги, события, условия

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-356-376

Введение

Одно из важнейших средств управления движением поездов на перегонах — автоматическая блокировка (АБ). По мере увеличения интенсивности движения требования к надежности работы автоматической блокировки постоянно возрастают. В некоторых случаях неисправность устройств интервального регулирования приводит к снижению не только пропускной способности железнодорожных участков, но и безопасности движения поездов [1].

В соответствии с [2] на сети отечественных железных дорог в эксплуатации находится 41 502 рельсовые цепи (58,7% от общего числа рельсовых цепей), включенные в систему числовой кодовой автоблокировки (ЧКАБ). Удельный

показатель количества отказов на 100 рельсовых цепей составляет 14,68. В целом 80 % (зона Парето) отказов приходится на аппаратуру сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), монтаж и рельсовые линии (см. рис. 1).

Анализ (см. рис. 2) показывает, что большая часть отказов в автоблокировке с децентрализованным размещением аппаратуры приходится на ЧКАБ – 2838 случаев (86 %), а в элементах 1283 случаев (39 %) – отказы аппаратуры СЦБ, 739 случаев (23 %) – монтаж устройств СЦБ (см. рис. 3).

По остальным элементам наблюдаются следующие отказы (см. рис. 3): рельсовая линия – 306 случаев (9 %), кабель – 272 (8 %), аппаратура защиты – 210 (6 %), светофоры – 131 (4 %), устройства электропитания – 83 (3 %) и т. д. Из диаграммы (рис. 3) видно, что более всего подвержена отказам аппаратура СЦБ (39 %) и монтаж устройств (23 %).

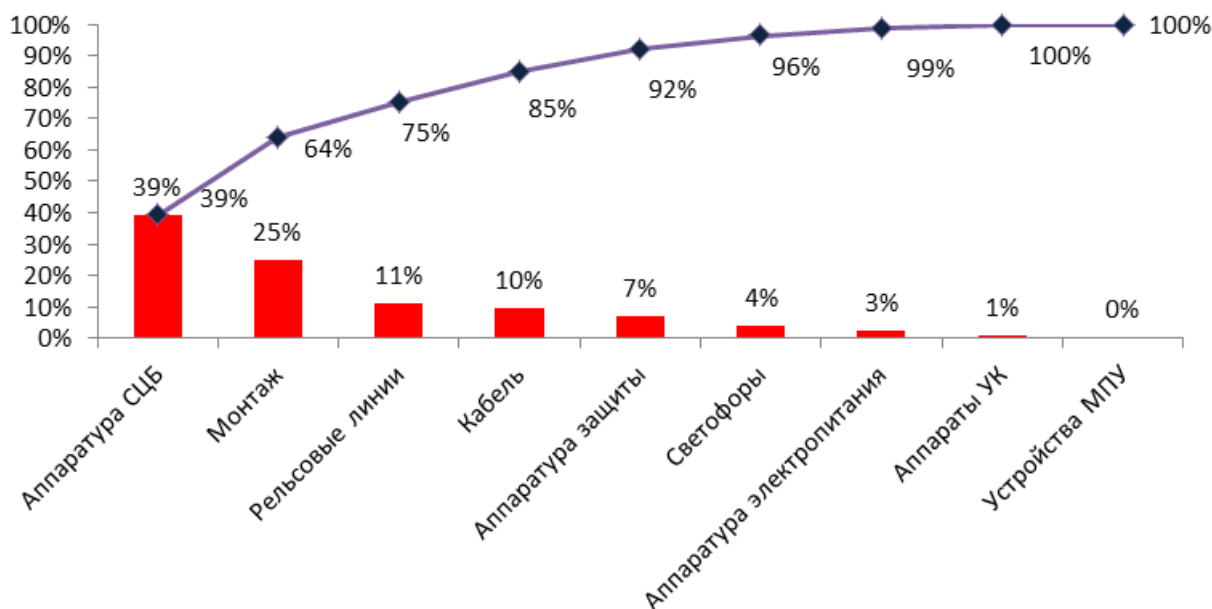


Рис. 1. Диаграмма распределения отказов автоблокировки в хозяйстве Ш по элементам

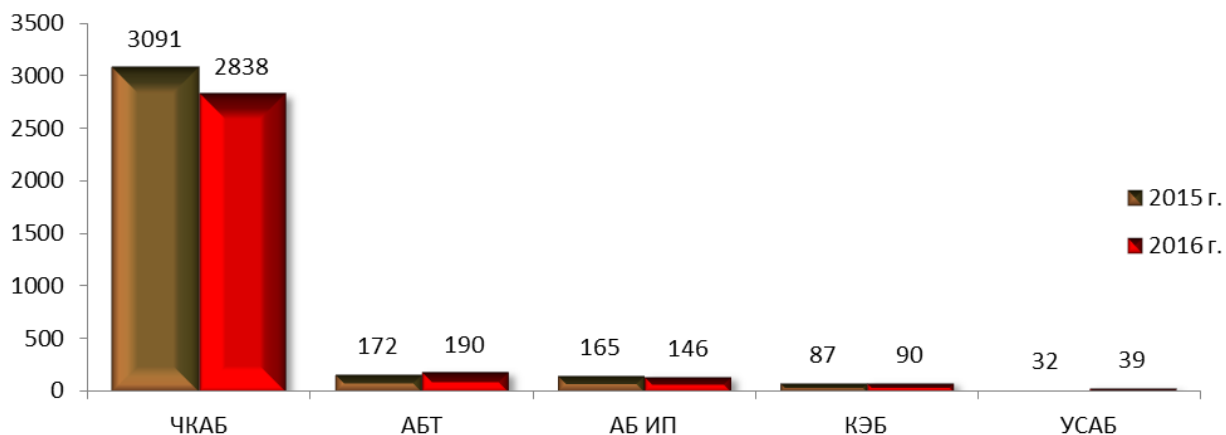


Рис. 2. Распределение отказов систем АБ с децентрализованным размещением аппаратуры по хозяйству Ш



Рис. 3. Диаграмма распределения отказов систем АБ с децентрализованным размещением аппаратуры по хозяйству Ш по элементам

В соответствии с методами сокращения времени на поиск причины отказа после возникновения неисправностей сформулированы требования к методам и моделям оценки времени восстановления устройств систем железнодорожной автоматики и телемеханики для моделирования их при помощи аппарата СП.

1. Формализация технологического процесса поиска неисправностей технических средств с учетом их территориального распределения.

2. Вложенность, т. е. возможность замещать одним переходом СП несколько сетей, характеризующих технологические операции процесса поиска отказов в связи с громоздкостью алгоритма поиска неисправностей.

3. Возможность задания детерминированного или вероятностного характера времени выполнения технологических операций по поиску неисправностей СЖАТ (возникновения, поиска, устранения неисправностей и восстановления системы) и влияния квалификации обслуживающего персонала.

4. Возможность анализировать параллельные технологические процессы поиска неисправностей и их визуальная оценка.

5. Возможность наглядного представления процессов поиска отказа.

6. Наличие инструментальных средств диагностирования и отладки имитационных моделей на базе методологии СП.

7. Относительная простота алгоритмизации и программной реализации технологических процессов поиска неисправностей СЖАТ.

8. Возможность настройки ИМ на определенные виды неисправностей устройств СЖАТ.

В статье рассматривается построение имитационных моделей (ИМ) оценки времени восстановления при поиске отказов релейных систем интервального регулирования движения поездов с использованием аппарата иерархических

цветных временных сетей Петри и возможностей среды моделирования *CPN Tools*.

1. Актуальность оценки времени восстановления системы после отказа

Существует целый ряд мероприятий по повышению надежности систем железнодорожной автоматики и телемеханики: планово-профилактические работы, организация новых методов обслуживания, обучения обслуживающего персонала правилам и методам устранения отказов. Практика эксплуатации показывает, что время поиска и устранения отказов остается относительно большим. Кроме того, расходы на устранение отказов устройств СЦБ прямо пропорциональны времени восстановления. Экономические потери от задержек поездов при возникновении неисправностей устройств СЦБ, в особенности, на грузонапряженных участках железных дорог, увеличиваются значительно быстрее, чем время восстановления системы [3].

Согласно [4], расчет времени, необходимого для устранения нарушения нормальной работы устройств инфраструктуры, должен производиться для каждого вида технических средств индивидуально, в зависимости от их расположения (станция, перегон), наличия постоянного дежурства и места жительства эксплуатационного персонала, а также факторов, влияющих на время доставки персонала и запасного оборудования. Время устранения отказов технических средств с момента получения сообщения о появлении нарушения нормальной работы устройств от системы диспетчерской централизации (ДЦ), диспетчерского контроля (ДК), системы передачи данных линейного пункта (СПЛ-ЛП), автоматизированной системы для централизованного контроля технического состояния подвижного состава (АСК-ПС), дежурного по станции (ДСП), поездного диспетчера (ДНЦ), машиниста поезда, дежурного по переезду, работников хозяйств автоматики и телемеханики, пути, электроснабжения и т. д. определяется как:

$$T_{\text{уст}} = \sum_{i=1}^n t_i, \quad (1)$$

где t_i – время, необходимое для:

- уведомления и доставки работников соответствующих служб (хозяйств) к месту неисправности технических средств;
- доставки при необходимости из страхового (аварийно-восстановительного) запаса требуемого оборудования, аппаратуры и материалов;
- оформления необходимых действий для устранения неисправности технических средств, приведших к нарушению нормальной работы устройств СЦБ;
- проведения и оформления инструктажа по охране труда;
- поиска и определения причины отказа;

- формирования и передачи сообщения о порядке пользования устройствами и организации движения поездов на период устранения нарушений;
- устранения неисправности технических средств, приведших к нарушению нормальной работы устройств инфраструктуры (определяется по каждому виду устройств);
- проверки действия устройств инфраструктуры после устранения неисправности технических средств;
- передачи и оформления сообщения об устранении неисправности технических средств, приведших к нарушению нормальной работы устройств инфраструктуры.

В соответствии с [5], среднее время собственно восстановления неисправности технических средств является наиболее обобщающим критерием ремонтно-пригодности устройств. Оно складывается из времени оповещения причастных работников об отказах t_o , времени следования к объекту отказа $t_{пр}$, времени поиска места отказа t_n , времени устранения t_y . Таким образом:

$$T_v = t_o + t_{пр} + t_n + t_y. \quad (2)$$

Эксплуатация систем АБ демонстрирует (см. рис. 2), что в наибольшей степени подвержена отказам система интервального регулирования – ЧКАБ. На рисунке 4 показана диаграмма со статистическими данными распределения отказов устройств числовой кодовой автоблокировки. Из диаграммы видно, что основными причинами отказов блоков являются полупроводниковые приборы (38%), конденсаторы (14%) и другие составляющие. Реле: вспомогательное, повторитель транзиттерного, реле – счетчик импульсов и интервалов.

Время восстановления системы после возникновения отказа – важный показатель. Практика эксплуатации вышеуказанных систем демонстрирует, что восстановление системы часто зависит от времени, затрачиваемого непосред-

Причины отказов блоков дешифратора (ДА)

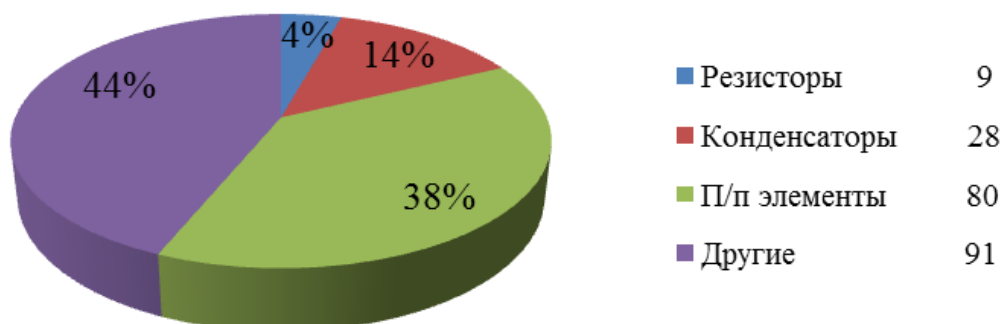


Рис. 4. Диаграмма распределения причин отказов элементов системы ЧКАБ

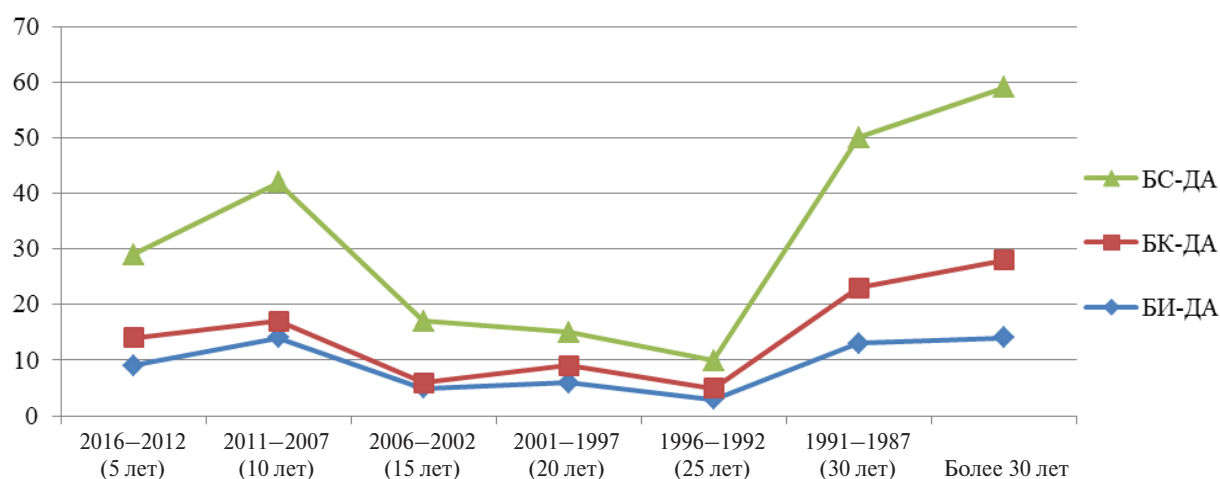


Рис. 5. График распределения отказов блоков дешифратора ЧКАБ в зависимости от продолжительности эксплуатации

ственно на поиск и локализацию отказа, а не на его устранение, поэтому оценка временных параметров технологических процессов, реализуемых при восстановлении системы СЖАТ, становится актуальной задачей. Наиболее эффективный метод решения поставленной задачи – имитационное моделирование. Разработка ИМ позволяет оценивать время восстановления системы по заранее определенным алгоритмам, что исключает влияние предыдущего опыта поиска неисправностей и прочих внешних факторов.

Из рисунка 5 следует, что распределение отказов блоков дешифратора ЧКАБ в зависимости от продолжительности эксплуатации растет, а самым уязвимым блоком ДА будет блок БС-ДА. Данная система эксплуатируется на участках железных дорог России более 30 лет, поэтому количество отказов будет расти, что приведет к увеличению задержек поездов и экономических потерь.

2. Формализация процесса поиска отказов с помощью иерархических цветных сетей Петри

Сети Петри применяются как математический аппарат для формализации, анализа и моделирования дискретно-событийных систем [6–7]. Из-за слабосвязанной многоуровневой структуры сети можно использовать для эффективного моделирования различных технологических процессов [8–9].

Один из перспективных методов формализации описания и анализа сложных технологических процессов поиска неисправностей в технических системах – методология сетей Петри, которые являются распространенным графическим средством исследования систем. Популярность их вызвана удобным представлением различных типов объектов, присутствующих во многих моделируемых системах, и событийным подходом к моделированию. Сети Петри обладают

наилучшими возможностями для описания взаимосвязей и взаимодействий параллельно работающих процессов [10–12].

Формализацию поиска отказов целесообразно производить на базе иерархических цветных сетей Петри в связи с громоздкостью самого алгоритма поиска отказов сигнальной точки числовой кодовой автоблокировки. Согласно [13], иерархические цветные сети Петри задаются следующим набором:

$$HCPN = (S, SN, SA, PN, PT, PA, FS, FT, PP), \quad (3)$$

где S – конечный набор страниц ($s \in S$), представляющий собой неиерархическую цветную сеть Петри: $CPN = (P, T, A, \Sigma, N, C, G, E, I)$; $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ – конечное множество позиций, т. е. условий, при которых выполняется технологическая операция поиска неисправностей; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ – конечное множество переходов; $P \cup T = \emptyset$ и $P \cap T = \emptyset$; $A = \{a_1, a_2, \dots, a_l\}$ – конечное множество направленных дуг; Σ – конечное множество непустых наборов цветов; N – функция узла, определенная из A в P , $P \times T \cup T \times P$; $C: P \rightarrow \Sigma$ – функция набора цветов, которая назначает цвет для каждого места; $G: T \rightarrow EXPR$ – защитная функция, которая назначает защиту для каждого перехода t следующим образом:

$$[Type(G(t)) = Bool \wedge Type(Var(G(t))) \subseteq \Sigma];$$

$E: A \rightarrow EXPR$ – функция выражения дуги, которая присваивает дуговое выражение каждой дуге a :

$$\forall a \in A: [Type(E(a)) = C(p(a))_{MS} \wedge Type(Var(E(a))) \subseteq \Sigma];$$

$I: P \rightarrow EXPR$ – функция инициализации, которая присваивает выражение инициализации каждому месту p :

$$\forall p \in P: [Type(I(p)) = C(p)_{MS} \wedge Type(Var(I(p))) \subseteq \emptyset];$$

тип (v) обозначает тип переменной v , $Var(expr)$ – набор переменных в выражении $expr$;

наборы элементов сети попарно не пересекаются:

$$\forall s_1, s_2 \in S: [s_1 \neq s_2 \Rightarrow (P_1 \cup T_1 \cup A_1) \cap (P_2 \cup T_2 \cup A_2) = \emptyset];$$

$SN \subseteq T$ – набор узлов замещения; SA – функция назначения страницы; $PN \subseteq P$ – определение набора узлов порта; PT – функция типа порта, определяется из PN в $(in, out, i/o, general)$; PA – функция назначения порта; $FS \subseteq P$ – конечный набор множеств слияния; FT – тип слияния функций; $PP \in SM$ – множество простых страниц.

3. Моделирование поиска неисправностей устройств железнодорожной автоматики на иерархических цветных временных сетях Петри

Сформулируем задачу моделирования как оценку времени восстановления системы при возникновении неисправности в целом и выполнении технологических операций по поиску отказавшего элемента. Присутствие фишек на определенных позициях будет означать существование соответствующего задания или запроса на выполнение проверок, необходимых для устранения неисправностей устройств СЦБ.

Имитационная модель, построенная посредством аппарата иерархических цветных временных сетей Петри (ИВЦСП), позволяет провести анализ последовательности проверок элементов системы. Формализм сетей Петри дает возможность применять аналитические методы как для анализа исполнения, так и для верификации логических свойств исследуемых процессов, а также требует точных определений, исключающих неопределенности и противоречия.

В [14] представлена информационная диаграмма поиска отказов, которая определяет общий порядок действий при ложном горении красного огня ЧКАБ. В соответствии с [15] преобразуем информационную диаграмму в сеть Петри для построения имитационной модели на базе иерархических цветных СП с временными ограничениями (рис. 6). Атрибуты позиции в соответствии с [16–17] и синтаксисом языка *CPN ML* представлены в виде выражения $I1$, которое задает начальную маркировку позиций, состоящую из одной фишки (метки) со значением 1.

Разработанная имитационная модель построена на основе метода информационных диаграмм [18] с использованием особенностей ИЦВСП и программного комплекса *CPN Tools* [19].

С учетом особенностей поиска отказов в устройствах СЦБ фишки имеют временной характер и для задания их свойств использовано следующее обозначение:

$$\textit{closet chkab} = \textit{int timed},$$

где *closet* – системное слово языка *CPN ML* для определения типа данных; *timed* – системное слово языка *CPN ML*, означающее, что фишки данного типа имеют временные метки; *chkab* – обозначение нового типа данных; *int* – название типа данных (*integer*).

Атрибутом дуг ИЦВСП служит переменная *t*, необходимая для переноса соответствующих фишек между позициями и переходами. Переменная *t* объявлена следующим образом: *var t : chkab*. Возможности среды моделирования *CPN Tools* позволяют задавать временные задержки срабатывания переходов и перемещения фишек через дуги путем задания случайной величины, распределенной по некоторому закону [20]. В качестве примера рассмотрим задание задержек

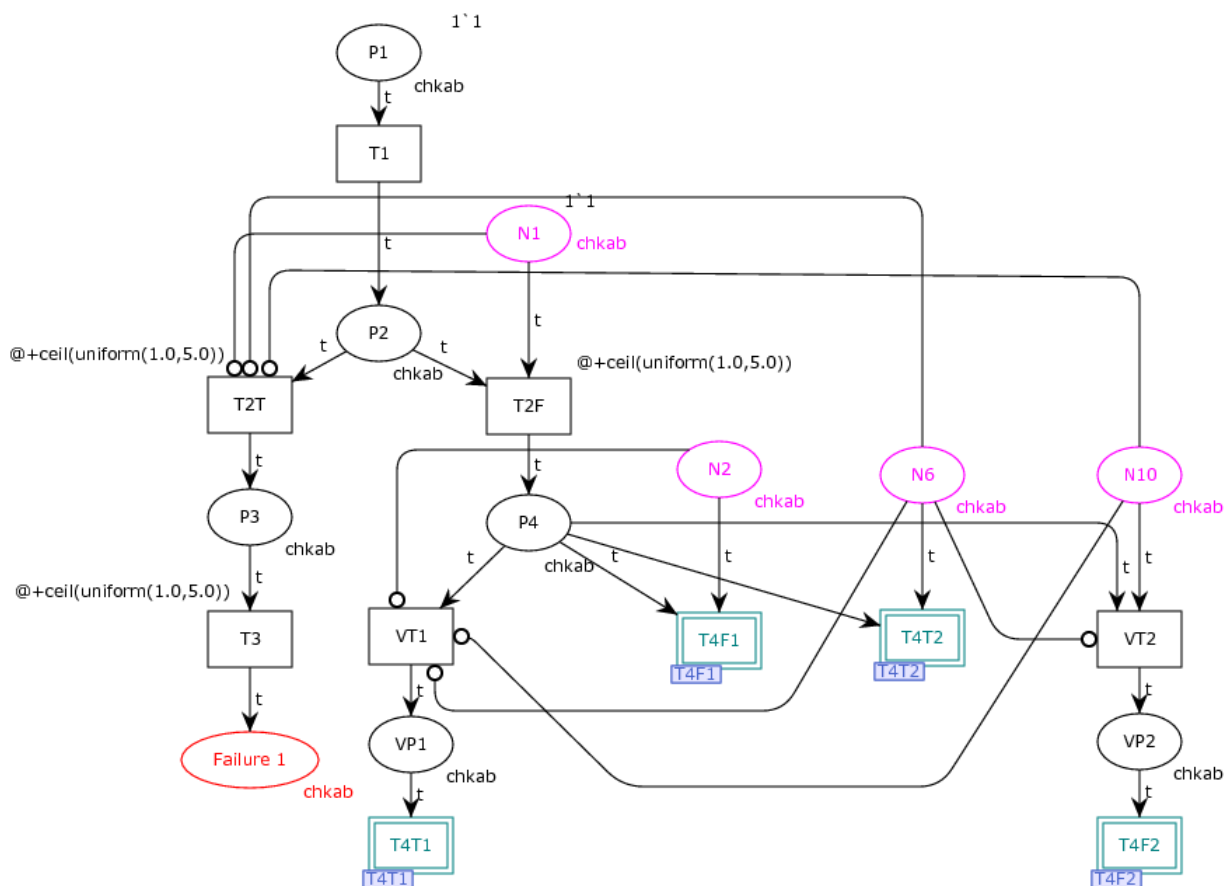


Рис. 6. Имитационная модель оценки времени поиска отказов сигнальной точки ЧКАБ на базе ИЦВСП

по срабатыванию для переходов $T2T$, $T2F$, $T3$, в которых используется функция равномерного (*uniform*) закона распределения случайных величин. Параметры выбраны путем экспертной оценки времени, необходимого для осуществления соответствующих операций при поиске отказов:

$$I^1 @+ceil (uniform (1.0,5.0)).$$

В имитационной модели 24 основных и 25 вспомогательных позиций, необходимых для настройки исследования определенных неисправностей, плюс 23 основных и 2 вспомогательных перехода (см. табл. 1 и табл. 2).

Таким образом, характерным проявлением повреждений сигнальной точки ЧКАБ является горение красного огня на проходном сигнале при свободном блок-участке. Причиной такого повреждения может быть отказ аппаратуры питающего или релейного конца, отказ в рельсовой цепи. Поиск отказа, как правило, следует начинать с релейного конца по месту нахождения сигнала с ложным запрещающим показанием. На основе информационной диаграммы поиска отказов и с учетом особенностей ИМ составлена таблица основных видов

Таблица 1. Значение множества переходов

Обозначение переходов	Описание переходов
T1	Горение красного огня при свободном блок-участке удаления
T2F	Реле Ж временно встает под ток или без тока
T2T	Реле Ж под током
T3	Обрыв цепи повторителя реле Ж
T4T1	Реле И находится под током (отсутствует импульсная работа)
T4F1	Реле И без тока
T4T2	Реле И работает нормально, характеристика кода соответствует требованиям
T4F2	Реле И работает нормально, характеристика кода не соответствует требованиям (искаженный код)
T5	Подпитка РЦ посторонним источником переменного тока или отказ в аппаратуре питающего конца (Т, КППТ)
T6T	Импульсное напряжение на путевом реле в норме
T6F	Импульсное напряжение на путевом реле отсутствует или ниже нормы
T7	Неисправно путевое реле или нарушен контакт в штепсельной розетке
T8F	Неисправен фильтр ЗБФ
T8T	Исправен фильтр ЗБФ
T9	Заменить фильтр ЗБФ
T10T	Монтаж от ЗБФ до путевого реле исправен
T10F	Неисправность в монтаже от ЗБФ до путевого реле
T11	Заменить реле и отправить его на проверку в РТУ
T12	Устранить неисправность в монтаже от ЗБФ до путевого реле
T13T	Напряжение на входе 1–81 блока БС-ДА (СХ–МСХ) менее 15 вольт
T13F	Напряжение на входе 1–81 блока БС-ДА (СХ–МСХ) – 15–17 вольт
T14T	Напряжение на ПХ-ОХ 220 ниже 198 вольт
T14F	Напряжение на ПХ-ОХ 220 – 198–242 вольт
T15	Выяснение причины низкого напряжения на ПХ-ОХ 220
T16	Неисправен трансформатор СОБС или повреждение в монтаже шкафа
T17F	Напряжение П-М на выходе блока БС-ДА ниже 12 вольт
T17T	Напряжение П-М на выходе блока БС-ДА ниже 13–15 вольт
T18	Отказ выпрямителя
T19	Заменить блок БС-ДА
T20	Потеря емкости конденсаторов
T21	Заменить блок БК-ДА
T22	Замыкание изолирующих стыков у сигнальной установки
T23	Неисправность на питающем конце, необходимо проверить тип и исправность КППШ

Таблица 2. Значение множества позиций

Обозначение позиции	Описание позиции
P1	Периодическое или постоянное горение красного огня при свободном блок-участке удаления
P2	Проверка состояния реле Ж
P3	Проверка цепи повторителя (Ж1) реле Ж
P4	Проверка характера работы реле И
P5	Реле И находится под током непрерывно
P6	Измерение напряжения на путевом реле
P7	Импульсное напряжение на путевом реле не менее 5 вольт
P8	Проверка исправности фильтра ЗБФ сравнением напряжения на его входе (8–15 В) и выходе (6–7 В)
P9	Несоответствие входных и выходных параметров фильтра ЗБФ
P10	Проверка монтажа от ЗБФ до путевого реле И
P11	Неисправности реле И
P12	Неисправен монтаж от ЗБФ до реле И
P13	Проверка напряжения на входе 1–81 блока БС-ДА (СХ–МСХ)
P14	Проверка напряжения на ПХ 220
P15	Менее 198 вольт на ПХ 220
P16	Напряжение 198–242 на ПХ 220
P17	Проверить напряжение П-М на выходе блоков
P18	Ниже 12 вольт на выходах П-М блоков
P19	Выпрямитель в блоке БС-ДА неисправен
P20	Напряжение на П-М выходе блоков БС-ДА и БК-ДА не соответствует требованиям
P21	Емкость конденсаторов не соответствует требованиям
P22	Проверить качество импульсного напряжения на путевом реле с учетом отключения кабельных жил питающего конца смежной РЦ
P23	Восстановления работы реле Ж
P24	Изменение длительности импульсов

неисправностей, которые могли привести к ложному показанию в сигнальной точке ЧКАБ.

На модели неисправности обозначены через позиции соответственно *Failure 1*, *Failure 2*, ..., *Failure 12*. В соответствии с этой таблицей ИМ (см. рис. 5) настраивается на один из 12 видов неисправностей путем установки «1» (наличия) или «0» (отсутствия) фишки на позициях, обозначенных как N1, N2, ..., N11.

В разработанной имитационной модели поиск отказов сигнальной точки осуществляется путем последовательного прохождения фишки (метки) через

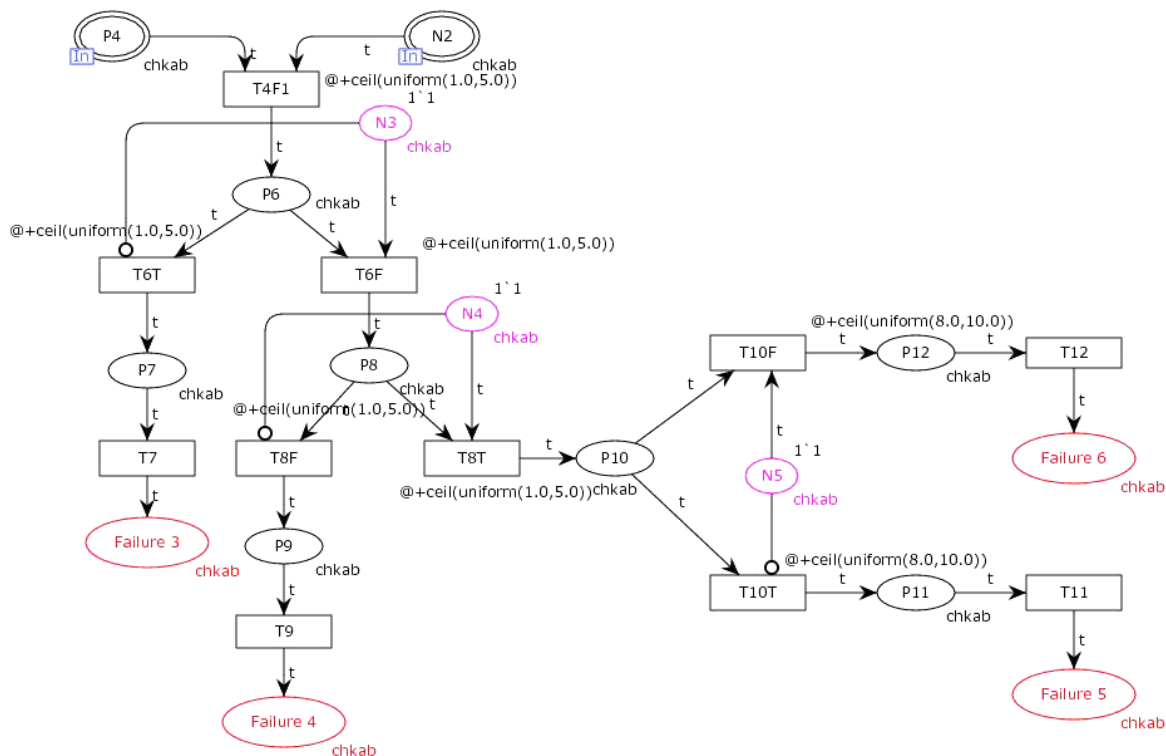


Рис. 7. Вложенная модель T4F1 оценки времени поиска отказов сигнальной точки ЧКАБ на базе ИЦВСП

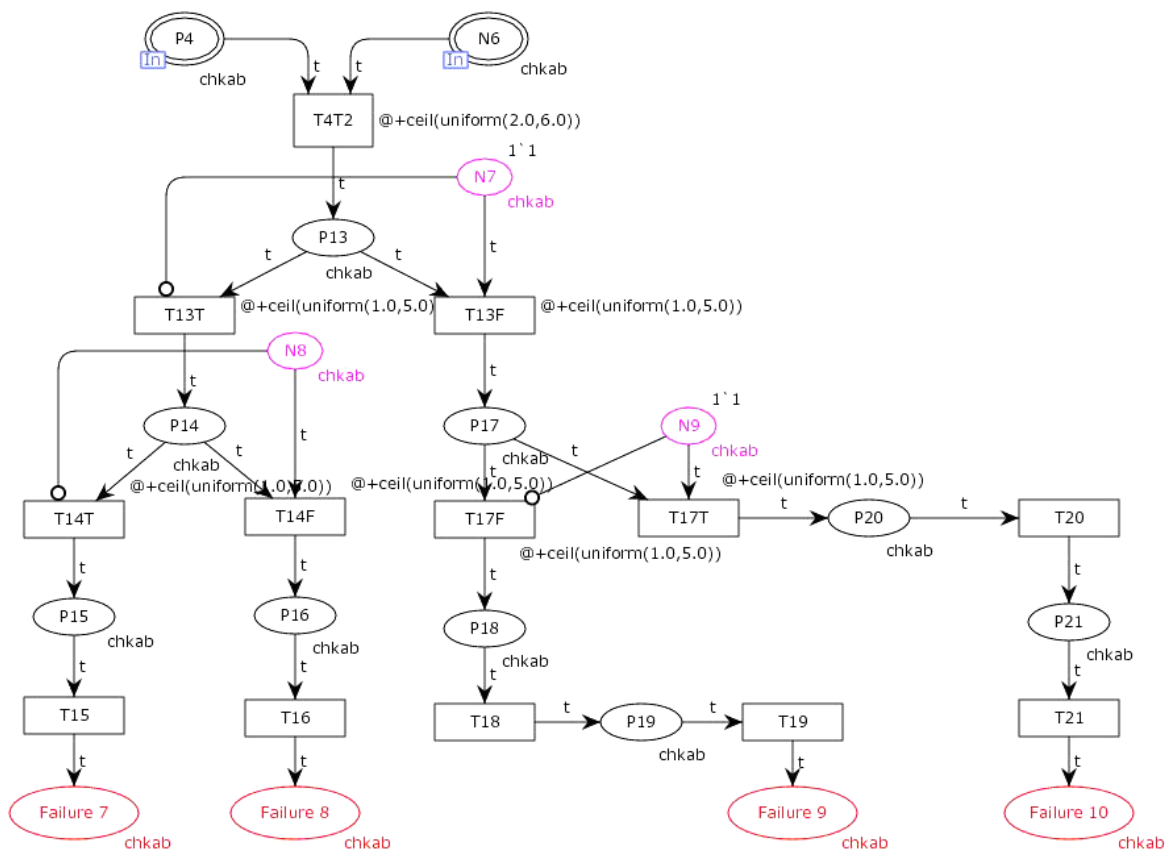


Рис. 8. Вложенная модель T4T2 оценки времени поиска отказов сигнальной точки ЧКАБ на базе ИЦВСП

Таблица 3. Задания для имитационной модели сигнальной точки ЧКАБ

Неисправности сигнальной точки ЧКАБ	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11
1. Обрыв повторителя реле Ж	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2. Подпитка РЦ посторонним ИП переменного тока или от- каз Т, КПТ	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3. Неисправно реле И или на- рушен контакт в штепсельной розетке	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4. Заменить ЗБФ	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5. Заменить реле И	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
6. Устранить неисправность монтажа ЗБФ	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
7. Выяснить причину пониже- ния напряжения ПХ 220	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
8. Неисправность трансфор- матора СОБС или поврежде- ние в монтаже	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
9. Отказ выпрямителя, заме- нить БС-ДА	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
10. Потеря емкости конденса- торов, заменить блок БК-ДА	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
11. Замыкание ИС у сигналь- ной точки	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
12. Неисправность на ПК, проверить исправность и тип КПТШ	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

позиции, дуги и переходы в соответствии с логикой аппарата СП. Для исключения ложных срабатываний переходов организована логическая связь через ингибиторные дуги. Функции программного комплекса CPN Tools позволяет осуществлять моделирование как в пошаговом, так и в автоматическом режиме. Одна единица модельного времени приравнивается к одной минуте реального времени. В соответствии с [21] значением времени оповещения и прибытия ($t_o + t_{np}$) на место непосредственного поиска причин принято среднее статическое время 31 минута. Соответственно, для устранения обнаруженного отказа 23 минуты значения t_{ii} имитационная модель автоматически формирует исходя из временных параметров, заложенных в значениях срабатывания переходов (см. табл. 4).

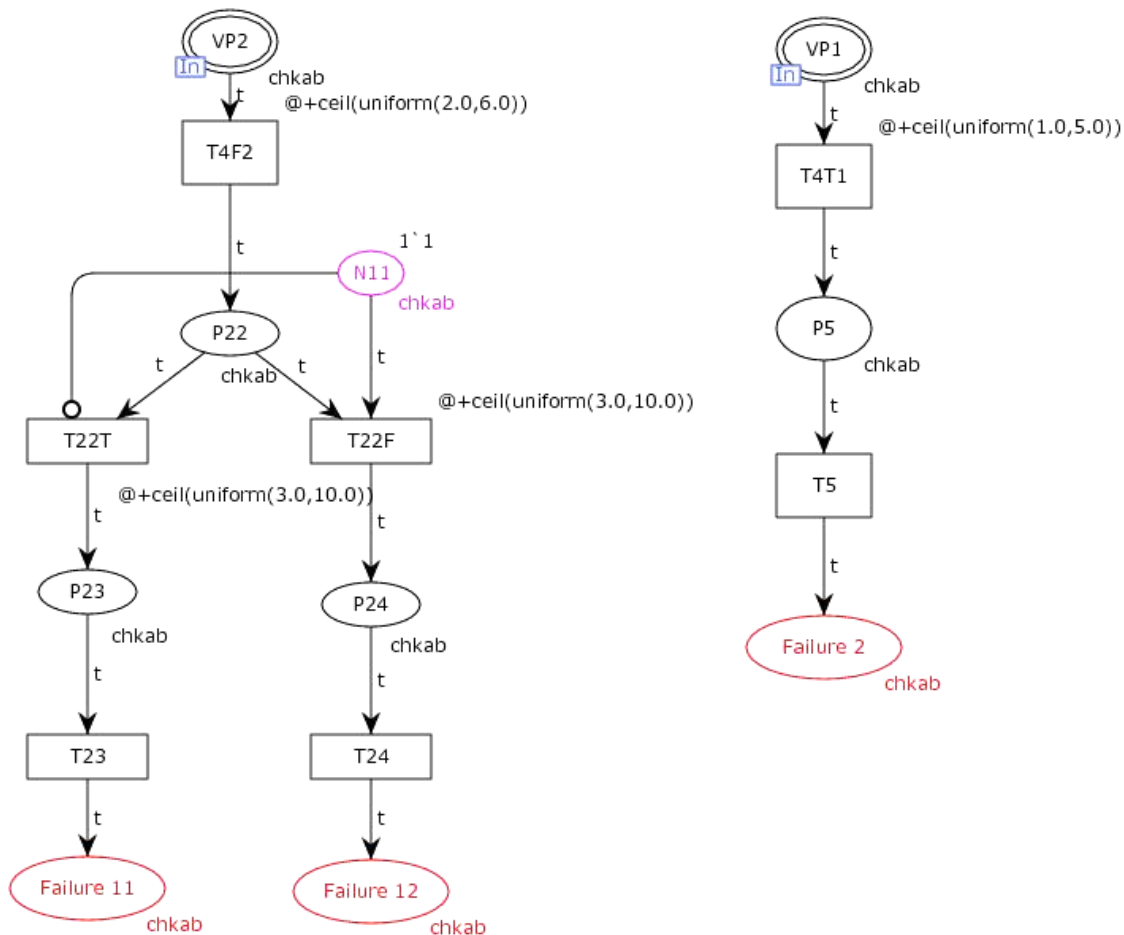


Рис. 9. Вложенная модель T4F2 и T4T2 оценки времени поиска отказов сигнальной точки ЧКАБ на базе ИЦВСП

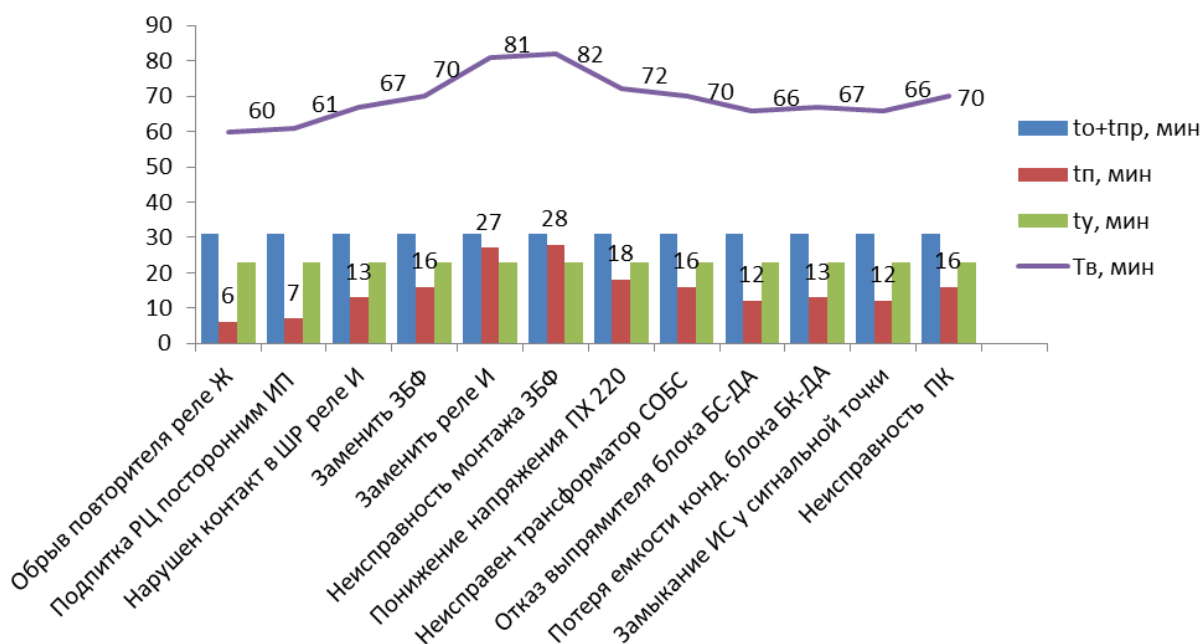


Рис. 10. Распределение времени восстановления системы по устройствам ЧКАБ при отказе сигнальной точки

Таблица 4. Временные параметры восстановления системы ЧКАБ

Неисправности сигнальной точки ЧКАБ	$t_o + t_{np}$, мин	t_n , мин	t_y , мин	T_v , мин
1. Обрыв повторителя реле Ж	31	6	23	60
2. Подпитка РЦ посторонним ИП переменного тока или отказ Т, КПТ	31	7	23	61
3. Неисправно реле И или нарушен контакт в штепсельной розетке	31	13	23	67
4. Заменить ЗБФ	31	16	23	70
5. Заменить реле И	31	26	23	80
6. Устранить неисправность монтажа ЗБФ	31	28	23	82
7. Выяснить причину понижения напряжения ПХ 220	31	18	23	72
8. Неисправность трансформатора СОБС или повреждение в монтаже	31	16	23	70
9. Отказ выпрямителя, заменить БС-ДА	31	12	23	66
10. Потеря емкости конденсаторов, заменить блок БК-ДА	31	17	23	67
11. Замыкание ИС у сигнальной точки	31	12	23	66
12. Неисправность на ПК, проверить исправность и тип КПТШ	31	16	23	70

Имитационная модель позволяет оценить время восстановления системы ЧКАБ при вышеуказанных неисправностях сигнальной точки (табл. 4) и показывает самые уязвимые для АБ отказы, которые приводят к наиболее длительному времени восстановления системы. Результаты исследования также представлены в виде графика на рисунке 10.

Заключение

В статье проведен анализ систем интервального регулирования движения поездов на перегоне с децентрализованным размещением аппаратуры. Статистические данные показывают, что система ЧКАБ – самая распространенная в соответствующей группе; она эксплуатируется на сети железных дорог России более 30 лет, вследствие чего особенно подвержена отказам по вышеупомянутым причинам. Для решения задачи формализации определения времени восстановления в целом и времени поиска отказов в частности и построения имитационной модели на базе ИЦВСП выбрана система ЧКАБ. Разработаны требования

к имитационным моделям поиска неисправностей устройств СЖАТ. Проведен анализ нормативной документации, регламентирующей технологические операции по поиску отказов. На основе формализованного описания процессов восстановления системы и возможностей среды имитационного моделирования *CPN Tools* разработана имитационная модель поиска и устранения отказов для восстановления системы ЧКАБ при неисправностях сигнальной установки.

Предложенная модель позволяет производить оценку среднего времени восстановления системы (см. табл. 4) с учетом соблюдения технических условий и регламентов, местных условий и особенностей расположения сигнальных точек применительно к каждой дистанции СЦБ.

Необходимо отметить, что в разработанной имитационной модели при расчете времени поиска и устранения отказов не учитывались такие события, как хищения, отказы по вине смежных служб и т. д.

Следующими этапами выполнения работ по исследованию имитационной модели поиска и устранения отказов в системах интервального регулирования движения поездов на базе ИЦВСП стали исследования в реальных условиях путем натурных наблюдений, анализ статистических данных методом экспертных оценок, планирование и проведение серий имитационных экспериментов по оценке среднего времени восстановления микропроцессорных систем железнодорожной автоматики.

Библиографический список

1. *Марюхненко В. С.* Модель количественной оценки безопасности интервального регулирования движения поездов / В. С. Марюхненко, Ю. Ф. Мухапад, Е. И. Антипин, А. А. Елгин // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* – 2012. – № 3. – С. 230–238.
2. Анализ эксплуатационной деятельности хозяйства автоматики и телемеханики по итогам 2016 года. ОАО «Российские железные дороги» Управление автоматики и телемеханики Центральной дирекции инфраструктуры. – М., 2017. – 85 с.
3. *Бочкарев С. В.* Автоматизация алгоритма поиска отказов в стрелочном электроприводе с двухпроводной схемой управления / С. В. Бочкарев, А. А. Лыков // *Известия Петербургского университета путей сообщения.* – 2013. – № 4. – С. 100–107.
4. Инструкция по техническому обслуживанию и ремонту устройств и систем сигнализации, централизации и блокировки. – Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 30.12.2015 г. № 3168 р. – М.: ОАО «РЖД», 2015. – 129 с.
5. Регламент устранения нарушений нормальной работы устройств и систем СЦБ. – Утв. распоряжением МПС РФ от 26.03.2002 г. № ЦШЦ-15/7.
6. *Ваисов О. К.* Формализация технологических процессов электронного документооборота технической документации с помощью аппарата сетей Петри / О. К. Ваисов, П. Е. Булавский // *Сборник трудов конференции «Перспективы будущего в образовательном процессе».* – СПб.: ПГУПС, 2018. – С. 43–44.

7. *Ваисов О. К.* Моделирование технологических цепочек электронного документооборота технической документации на основе цветных иерархических временных сетей Петри / О. К. Ваисов // Научные труды республиканской научно-технической конференции с участием зарубежных ученых «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте». – 2018. – С 233–236.
8. *Frumin D.* Branching processes of conservative nested Petri nets / D Frumin, I. A. Lomazova // VPT 2014. Second International Workshop on Verification and Program Transformation – 2014. – Vol. 28. – P. 19–35.
9. *Wang S.* A New Modified Reachability Tree Approach and Its Applications to Unbounded Petri Nets / S. Wang, M. C. Zhou, Z. Li, C. Wang // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. – 2013. – Vol. 43, N 4. – P. 932–940.
10. *Buchina N.* The tool for modeling of wireless sensor networks with nested Petri nets / N. Buchina, L. Dworzanski // Proceedings of the Spring/Summer Young Researchers' Colloquium on Software Engineering. – М.: Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences, 2013. – P. 15–18.
11. *Cabral F. G.* A Petri net diagnoser for discrete event systems modeled by finite state automata / F. G. Cabral, M. V. Moreira, O. Diene // Transaction on Automatic Control. – 2015. – Vol. 61, N. 1. – P. 59–71.
12. *Gang Niu.* Fault detection isolation and diagnosis of multi-axle speed sensors for high-speed trains / Gang Niu, Liuqing Xiong, Xiaoxiao Qin, Michael Pecht // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2019. – Vol. 131. – P. 183–198.
13. *Shen Q.* Intermittent fault's parameter framework and stochastic petri net based formalization model / Q. Shen, J. Qiu, G. Liu, K. Lv // Eksploatacja i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability. – 2016. – Vol. 18, N 2. – P. 210–217.
14. Сборник методик и алгоритмов поиска и устранения неисправностей в устройствах СЦБ. – Утв. распоряжением ЦДИ ОАО «РЖД» от 23.11.2015 г. – М.: ЦДИ ОАО «РЖД», 2015. – 315 с.
15. *Ходаковский В. А.* Моделирование технических задач сетями Петри в среде HPSi m / В. А. Ходаковский // Актуальные вопросы развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики: сб. науч. трудов. – СПб.: ПГУПС, 2013. – С. 41–51.
16. *Ермакова В. О.* Трансляция вложенных сетей Петри для верификации разверток / В. О. Ермакова, И. А. Ломазова // Труды ИСП РАН. – 2016 – Т. 28, № 4 – С. 115–136.
17. *Булавский П. Е.* Моделирование процессов электронного документооборота технической документации с помощью сетей Петри / П. Е. Булавский, О. К. Ваисов // Автоматика на транспорте. – 2018. – Т. 4, № 4. – С. 687–705.
18. *Saren K. S.* State space properties of Flexible Manufacturing Cell based on Hierarchical Timed Colored Petri Nets / K. S. Saren, F. Blaga, T. Vtsselenyi // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 137, N 01012. – P. 1–6.
19. *Перникис Б. Д.* Предупреждение и устранение неисправностей в устройствах СЦБ / Б. Д. Перникис, Р. Ш. Ягудин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1994. – 254 с.
20. *Jensen K.* Formal Definition of Timed Coloured Petri Nets / K. Jensen, L. M. Kristensen // In Coloured Petri Nets. – 2009. – P. 257–271.

21. Сапожников В. В. Надежность систем железнодорожной автоматики и телемеханики и связи / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, В. И. Шаманов. – М.: Маршрут, 2003. – 263 с.

P. E. Bulavsky

O. K. Vaisov

*Department of "Railway Automation and Remote Control on Railways"
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg*

MODELING AND ESTIMATION OF FAILURE DETECTION PERIOD IN SYSTEMS OF RAILWAY TRAFFIC INTERVAL CONTROL BASED ON HIERARCHY COLORED PETRI NETS

Statistical data analysis of failures in railway traffic interval control systems was carried out. Investigations on estimation of failure detection and elimination time were fulfilled taking into account the requirements to formalization of failure detection and elimination engineering processes in the signaling point of the numeric coded circuit blocking system by means of hierarchic colored temporary Petri nets. A simulation model of the system recovery time estimation according to the results of failure detection in the signaling point was elaborated by means of the analysis on the condition of facilities, as well as statistic and regulatory documents. The methods of Petri net theory based on the discrete-event paradigm of simulation modeling were applied. Moreover, the information method of failure detection and elimination in the facilities of railway automation and remote control systems was used. The elaborated simulation model makes it possible to estimate the average time for system recovery after failure occurrence in the signaling point of the numeric coded circuit blocking system. The settings of timing parameters for failure detection technological process (notice time, arrival time, failure detection and fault elimination time) can be carried out by means of the model in question. In order to provide a proper estimation of the above-mentioned parameters, taking into account the specificities of the local division and operating staff qualifications, there is a function to assign both deterministic and probabilistic firing of Petri net transitions.

Automatic block system, failure, fault, hierarchic colored temporary Petri nets, labels, points, transitions, inhibitory bows, events, conditions

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-356-376

References

1. Maryukhnenko V. S., Mukhapad Yu. F., Antipin E. I. & Elgin A. A. (2012) Model kolichestvennoy otsenky bezopasnosti intervalnogo regulirovaniya dvizheniya poezdov [The quantitative estimate model of railway traffic interval control security]. *Sovremenniyе tekhnologii. Sistemny analiz. Modelirovaniye* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2012, no. 3, pp. 230–238. (In Russian)
2. *Analiz ekspluatatsionnoy deyatelnosti khozyaistva avtomatiki i telemekhaniky po itogam 2016 goda* [The analysis of operational activity of automation and remote control facilities in 2016]. OAO "Rossiyskiye zhelezniye dorogi" Upravleniye avtomatiki i

- telemekhaniky Tsentralnoy direktsii infrastruktury [OAO “Russian Railways” the Department of “Railway Automation and Remote Control” Central Directorate of Railway Infrastructure. Moscow, 2017, 85 p. (In Russian)]
3. *Bochkarev S. V. & Lykov A. A. (2013) Atomatizatsiya algoritma poiska otkazov v strelochnom elektroprivode s dvukhprovodnoy skhemoy upravleniya [Automation of failure search algorithm in the electric switch mechanism with double-wire control circuit]. Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University], 2013, no. 4, pp. 100–107. (In Russian)*
 4. *Instruktsiya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu ustroystv i sistem signalizatsii, tsentralizatsii i blokirovki [Maintenance instruction on automatic train signaling facilities and systems]. Utverzhdena rasporyazheniyem OAO “RZhD” ot 30.12.2015 g., N 3168 p. [Approved by OAO “Russian Railways” regulation dated December 30th, 2015, N 3168 p.]. Moscow, OAO “RZhD” Publ., 2015, 129 p. (In Russian)*
 5. *Reglament ustraneniya narusheniy normalnoy raboty ustroystv i sistem STsB [Order on elimination of failures in proper operation of signaling facilities and systems]. Utverzhdena rasporyazheniyem MPS RF ot 26.03.2002 g., N TsShTs-15/7 [Approved by the regulation of the RF Ministry of Railways dated March, 26th 2002, N TsShTs-15/7. (In Russian)*
 6. *Vaisov O. K. & Bulavsky P. E. (2018) Formalizatsiya tekhnologicheskikh protsessov elektronnoy dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentatsii s pomoshchyu apparata setey Petry [Formalization of operating procedures for electronic circulation of technical documents based on Petri net model]. Sbornik trudov konferentsii “Perspektivy budushchego v obrazovatelnom protsesse” [Collected papers of the Conference “Future prospects in educational process”]. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University] Publ., 2018, pp. 43–44. (In Russian)*
 7. *Vaisov O. K. (2018) Modelirovaniye tekhnologicheskikh tsepohek elektronnoy dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentatsii na osnove tsvetnykh ierarkhicheskikh vremennykh setey Petry [Modeling of process flows for electronic circulation of technical documents based on colored hierarchy temporary Petri nets]. Nauchniye Trudy respublikanskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s uchastiem zarubezhnykh uchenykh “Resursosberegayushchiye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte” [Research papers of the Republican Research and Technical Conference involving foreign scholars “Resource-saving technologies for railway transport”], 2018, pp. 233–236. (In Russian)*
 8. *Frumin D. & Lomazova I. A. (2014) Branching processes of conservative nested Petri nets. VPT 2014. Second International Workshop on Verification and Program Transformation, 2014, vol. 28, pp. 19–35.*
 9. *Wang S., Zhou M. C., Li Z. & Wang C. (2013) A New Modified Reachability Tree Approach and Its Applications to Unbounded Petri Nets. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics: systems, 2013, vol. 43, no. 4, pp. 932–940.*
 10. *Buchina N. & Dworzanski L. (2013) The tool for modeling of wireless sensor networks with nested Petri nets. Proceedings of the Spring/Summer Young Researchers’ Colloquium on Software Engineering. Moscow, Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences Publ., 2013, pp. 15–18.*

11. Cabral F. G., Moreira M. V. & Diene O. (2015) A Petri net diagnoser for discrete event systems modeled by finite state automata. *Transaction on Automatic Control*, 2015, vol. 61, no. 1, pp. 59–71.
12. Niu G., Xiong L., Qin X. & Pecht M. (2019) Fault detection isolation and diagnosis of multi-axle speed sensors for high-speed trains. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, vol. 131, pp. 183–198.
13. Shen Q., Qiu J., Liu G. & Lv K. (2016) Intermittent fault's parameter framework and stochastic petri net based formalization model. *Eksploatacja i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability*, 2016, vol. 18, no. 2, pp. 210–217.
14. *Sbornik metodik i algoritmov poiska i ustraneniya neispravnostey v ustroistvakh STsB [Collection of methods and algorithms for detection and repair of failures in signaling devices]*. Utverzhdena rasporyazheniyem TsDI OAO "RZhD" [Approved by the regulation of TsDI (Central Directorate of Railway Infrastructure) OAO "Russian Railways"] dated November 23rd, 2015. Moscow, TsDI OAO "RZhD" Publ., 2015, 315 p. (In Russian)
15. Khodakovskiy V. A. (2013) Modelirovaniye tekhnicheskikh zadach setyamy Petry v srede HPSim [HPSim-based modeling of engineering tasks by means of Petri nets]. *Aktualniye voprosy razvitiya system zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Topical issues of railway automation and remote control systems development]*: collection of research papers. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University] Publ., 2013, pp. 41–51. (In Russian)
16. Ermakov V. O. & Lomazova I. A. (2016) Translyatsiya vlozhennykh setey Petry dlya verifikatsii razvertok [Translation of nested Petri nets for verification of branching bits]. *Trudy ISP RAN [Proceedings of Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences]*, 2016, vol. 28, no. 4, pp. 115–136. (In Russian)
17. Bulavskiy P. E. & Vaisov O. K. (2018) Modelirovaniye protsessov elektronnoy dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentatsii s pomoshchyu setey Petry [Modeling of electronic circulation processes of technical documents via Petri nets]. *Avtomatika na transporte [Transport automation]*, 2018, vol. 4, no. 4, pp. 687–705. (In Russian)
18. Saren K. S., Blaga F. & Vtsselenyi T. (2017) State space properties of Flexible Manufacturing Cell based on Hierarchical Timed Colored Petri Nets. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 137, no. 01012, pp. 1–6.
19. Pernikis B. D. & Yagudin R. Sh. (1994) Preduprezhdeniye i ustraneniye neispravnostey v ustroistvakh STsB [Prevention and elimination of failures in signaling devices]. 2nd edition revised and enlarged. Moscow, Transport Publ., 1994, 254 p. (In Russian)
20. Jensen K. & Kristensen L. M. (2009) Formal Definition of Timed Coloured Petri Nets. *In Coloured Petri Nets*, 2009, pp. 257–271.
21. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. Vl. & Shamanov V. I. (2003) Nadezhnost system zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki i svyazy [Security of railway automation, remote control and telecommunication systems]. Moscow, Marshrut [Route] Publ., 2003, 263 p. (In Russian)

Статья представлена к публикации членом редколлегии В. А. Ходаковским
Поступила в редакцию 27.11.2019, принята к публикации 04.03.2020

БУЛАВСКИЙ Петр Евгеньевич – профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

e-mail: pbulavsky@gmail.com

ВАЙСОВ Олег Кахрамонович – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

e-mail: olegvaisov@gmail.com

© Булавский П. Е., Ваисов О. К., 2020

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 004.052.32+681.518.5

В. В. Сапожников, д-р техн. наук
Вл. В. Сапожников, д-р техн. наук

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

Д. В. Ефанов, д-р техн. наук

*ООО «ВЕГА ИНЖИНИРИНГ», Высшая школа транспорта
Институт машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского
Политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург*

ОТКАЗОУСТОЙЧИВАЯ СТРУКТУРА НА ОСНОВЕ ЛОГИЧЕСКОГО ДОПОЛНЕНИЯ С КОНТРОЛЕМ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПО ПАРИТЕТУ

Рассмотрены типовые отказоустойчивые структуры на основе многократного резервирования исходных дискретных устройств с последующим сравнением сигналов и маскировкой ошибок. Описаны основные достоинства и недостатки типовых отказоустойчивых структур. Предложена отказоустойчивая структура с уменьшенной сложностью технической реализации по сравнению с уже известными. Уменьшение сложности достигается за счет отказа от резервирования с целой кратностью и использования более простых устройств в схеме коррекции. В основе метода синтеза схемы коррекции лежит логическое дополнение сигналов. Приводится описание новой структуры, отмечены ее достоинства и недостатки. Предложен способ получения функций логического дополнения и коррекции сигналов. Дан пример синтеза отказоустойчивой структуры для комбинационного устройства автоматики. Обсуждаются результаты экспериментов с системой контрольных комбинационных устройств автоматики MCNC Benchmarks по синтезу отказоустойчивых структур различными методами.

Отказоустойчивые дискретные устройства; схемы коррекции ошибок, дискретные системы с обнаружением неисправностей, контроль по коду паритета, контроль по коду с суммированием, дублирование, троирование, мажоритарный принцип контроля, метод логического дополнения

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-377-403

Введение

При разработке систем управления ответственными технологическими процессами особое внимание уделяется обеспечению надежности и безопасности их функционирования. Ключевой метод достижения высокой надежности

и безопасности — использование резервирования на аппаратном и программном уровнях архитектур. Самым важным становится наделение разрабатываемых устройств свойствами обнаружения неисправностей и ошибок в вычислениях, а также коррекции ошибочных данных [1–5]. В этой связи широкого распространения достигли методы теории информации и кодирования. Следует отметить, что методы избыточного кодирования напрямую используются и при синтезе устройств с обнаружением неисправностей или с коррекцией неверных сигналов [6].

Для наделения устройства свойством обнаружения неисправностей достаточно учесть возможность фиксации неверно вычисленных значений. Это реализуется несколькими путями. Например, внесением избыточности в структуру исходного устройства, вывода данных из специально выбранных контрольных точек либо контроля корректности вычислений по выходным функциям. Последнюю особенность использует в полной мере структура системы с обнаружением неисправностей, основанная на принципе дублирования [7]. При дублировании применяются свойства кодов с повторением, а именно возможность обнаружения ими любых видов искажений в информационных разрядах кодовых слов [8]. Структурная схема системы дублирования включает в себя блоки основной и контрольной логики, а также самопроверяемый компаратор. Блок контрольной логики, как правило, является копией блока основной логики или устройством, синтезированным по иным принципам, но реализующим те же функции. Компаратор — это устройство сравнения значений на одноименных выходах блоков основной и контрольной логики. В практической реализации структурная избыточность системы дублирования оценивается величиной более чем 300–400 % от сложности реализации блока основной логики [5, 9].

Устройства со схемами коррекции гораздо сложнее с точки зрения технической реализации, чем устройства, снабженные только схемами обнаружения неисправностей. При их синтезе также используют методы теории кодирования. Например, для обнаружения однократных неисправностей применяют тройную избыточность и строят схемы, функционирующие с применением устройств выбора сигналов (мажоритарных органов), — так называемые *TMR*-системы (triple modular redundancy systems) [10–13]. При синтезе таких систем применяют три копии исходного объекта и снабжают их мажоритарной схемой коррекции сигналов [5]. Для идентификации неверно функционирующих блоков требуется дополнять их самопроверяемыми схемами встроенного контроля [9]. Широкое распространение получили также системы, основанные на принципе четырехкратной избыточности: один комплект, реализованный по принципу дублирования, находится под нагрузкой, а второй подключается при зафиксированном отказе первого [5]. Известны и иные модификации структур дублирования и троирования.

Исследования показывают, что для построения систем с обнаружением и коррекцией ошибок могут быть использованы более простые структуры. В этом

случае эффект достигается за счет применения метода логического дополнения [14–16] и синтеза встроенных схем вычисления функций коррекции сигналов по какому-либо признаку, например, с контролем корректности вычислений по заранее выбранному коду [17–19]. Такой подход позволяет синтезировать схемы коррекции, имеющие меньшую сложность реализации по сравнению с системой и дублирования, и троирования.

1. Отказоустойчивые структуры устройств автоматики

На практике широкого распространения достигли отказоустойчивые структуры, основанные на применении многократного резервирования (дублирования, троирования, четырехкратного резервирования и т. д.) аппаратных средств, что необходимо для выявления ошибочных результатов вычислений и их коррекции [2, 10, 20–25].

На рисунке 1 изображена структурная схема классической отказоустойчивой структуры системы с коррекцией данных по мажоритарному принципу (*TMR*-системы, или *majority correction system*). Чтобы достичь свойства отказоустойчивости относительно неисправностей, в данной структуре используются три идентичных устройства $F(x)$, вычисляющих одни и те же данные на одинаковых входных воздействиях. На одноименных выходах различных устройств имеются модули сравнения, функционирующие по принципу большинства «2 из 3» (элементы « ≥ 2 »). Часто их называют мажоритарными элементами. Они позволяют маскировать ошибки, поскольку нечувствительны к однократным искажениям на входах и внутри их структуры (до выходного логического элемента). Широко известны и способы синтеза полностью самопроверяемых структур мажоритарных элементов. Тройная избыточность структуры, изображенной на рисунке 1, необходима для наделения ее свойством нечувствительности к проявлениям неисправностей на выходах основного устройства. На практике это приводит к существенному усложнению технической реализации конечного устройства. Кроме того, приведенная структура не может идентифицировать неверно функционирующее устройство. Проблема решается за счет дооснащения каждого блока полностью самопроверяемой схемой встроенного контроля, что, однако, влечет за собой еще большее усложнение конечного отказоустойчивого устройства.

Отметим, что в качестве дополнительных средств повышения отказоустойчивости и возможности фиксации широкого класса неисправностей используется диверсификация оборудования (компоненты, выполняющие идентичные функции, реализуются по различным принципам или меняются режимы и алгоритмы функционирования системы, вводятся резервы времени выполнения операций и т. п.) [2, 5].

Для построения отказоустойчивой структуры может быть применена структурная схема, включающая в себя вместо трех копий исходного объекта только

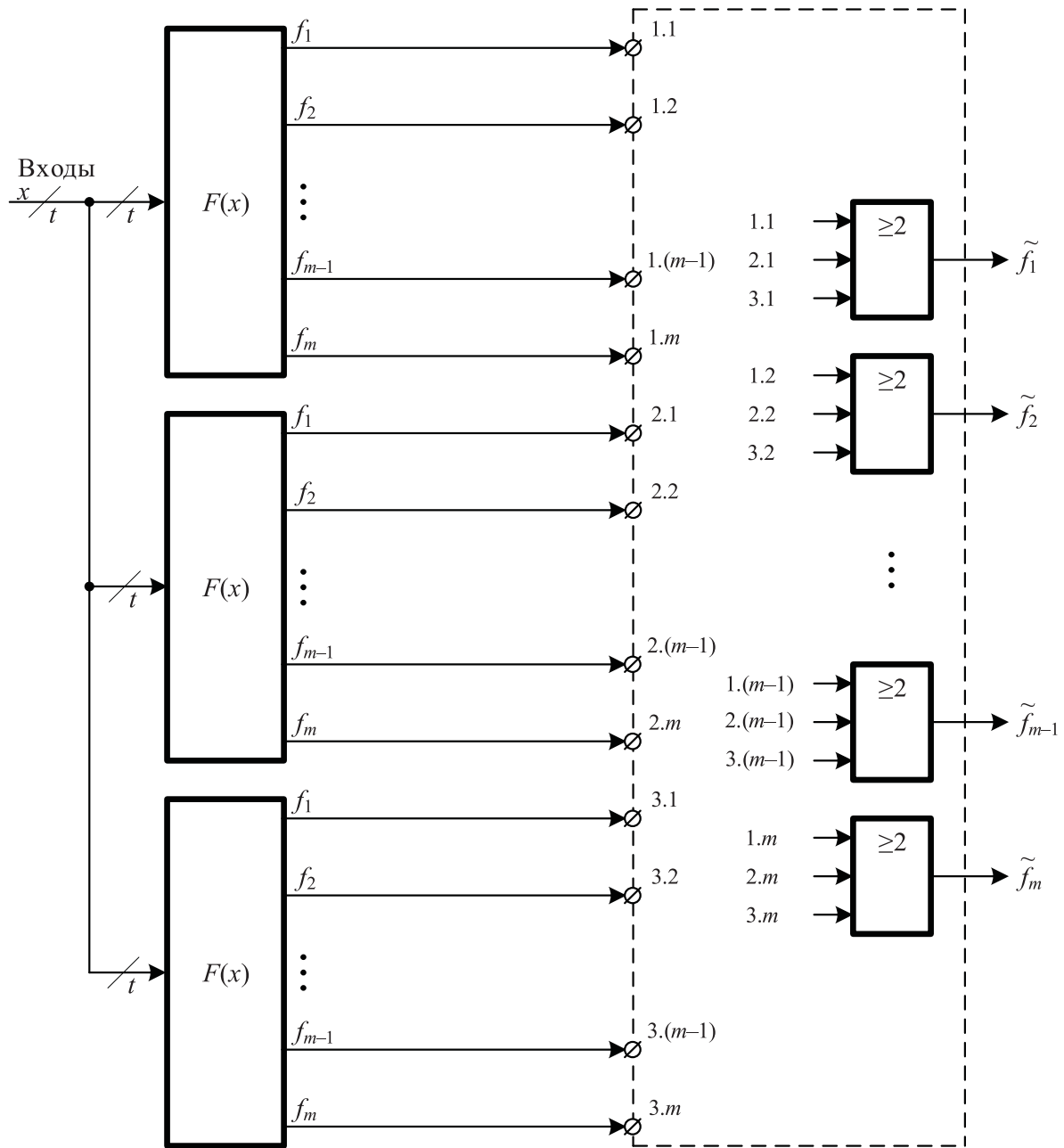


Рис. 1. Отказоустойчивая структура с мажоритарной коррекцией сигналов

две. При этом одна копия (или же оба комплекта устройств $F(x)$) снабжается схемой контроля по какому-либо признаку и непосредственно схемой коррекции сигналов. Известны варианты реализации подобных схем, когда оба комплекта находятся под нагрузкой и когда один комплект под нагрузкой, а второй — в горячем резерве [5]. Для случая отказоустойчивых комбинационных схем целесообразно использовать вариант с постоянно нагруженными комплектами $F(x)$ с контролем вычислений одного из них. Так, на рисунке 2 приведена структура системы дублирования с коррекцией и контролем вычислений по паритету

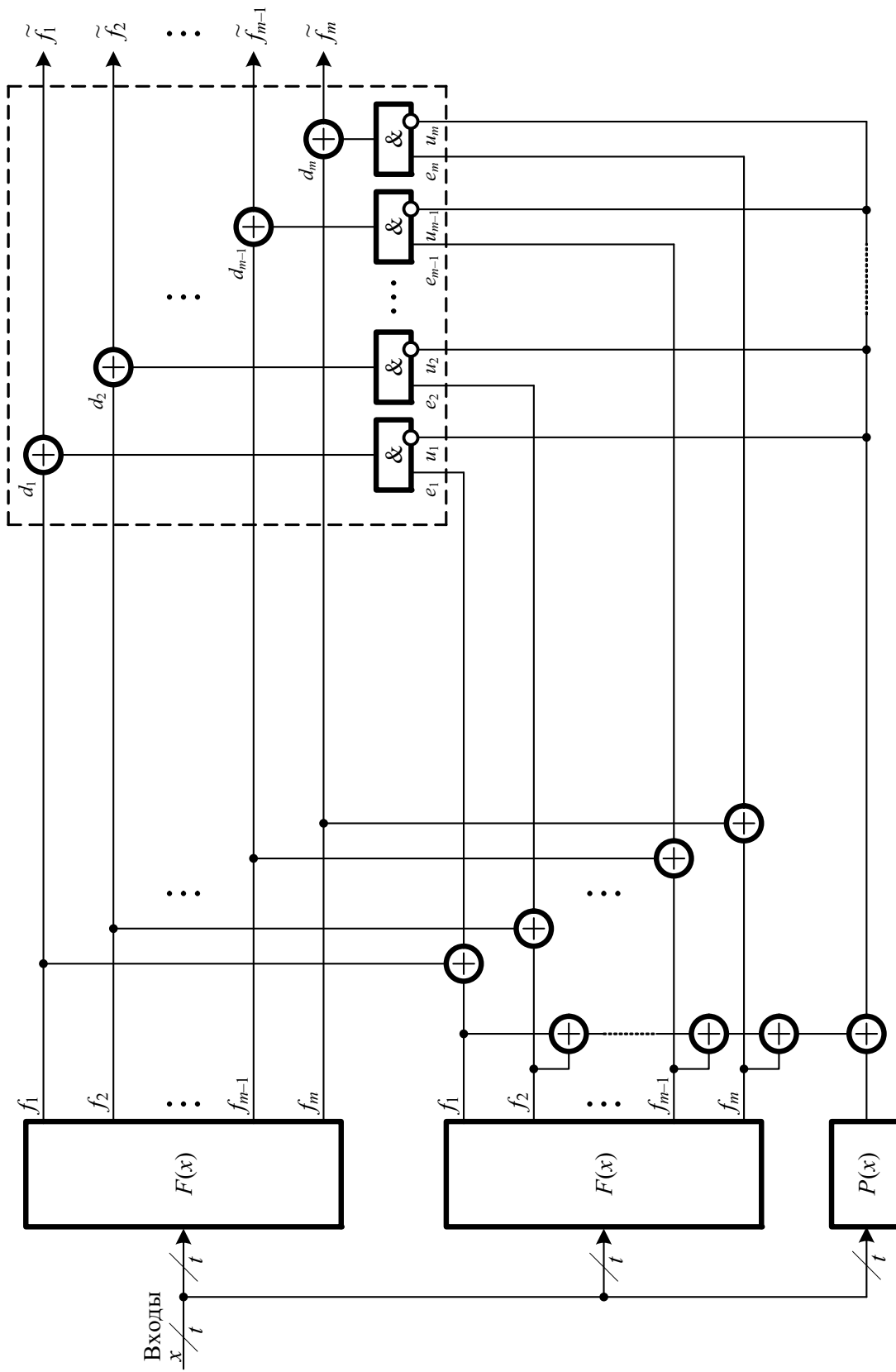


Рис. 2. Отказоустойчивая структура «дублирование с коррекцией»

(duplication correction system with parity checking). Далее будем называть ее системой «дублирование с коррекцией».

В структурной схеме системы «дублирование с коррекцией» имеется два идентичных устройства $F(x)$, вычисляющих в любой момент времени одинаковые значения выходных функций. Одно из устройств снабжается схемой контроля, например по классическому коду паритета. Значение функции паритета, вычисляемое схемой контроля по значениям выходных функций блока $F(x)$, сравнивается со значением функции паритета, вычисляемой по входным воздействиям блоком $P(x)$, с помощью элемента сложения по модулю два (элемента XOR). Значение, полученное на выходе элемента сравнения, является функцией активации одного из двух входов каждого элемента умножения (элемента AND) в схеме коррекции сигналов. Вторые входы каждого из данных элементов активируются при фиксации неверно вычисленных значений каскадом двухвходовых элементов XOR , на входы каждого из которых подключены одноименные выходы от двух различных копий устройств $F(x)$. Такая схема коррекции во многих случаях позволяет синтезировать более простые отказоустойчивые дискретные устройства, чем по структурной схеме с мажоритарной коррекцией.

При построении структуры «дублирование с коррекцией» возможно упрощение конечного устройства за счет оптимизации второго устройства $F(x)$.

Чтобы построить отказоустойчивую структуру с большим количеством одновременно возникающих неисправностей в различных компонентах, в т. ч. разных блоках $F(x)$, используются те же принципы, однако нужна куда большая избыточность аппаратных средств.

Покажем, что возможно построение отказоустойчивой структуры, которая содержит только одно исходное устройство $F(x)$ и схемы контроля и коррекции сигналов. Она синтезируется на основе метода логического дополнения [14–16].

2. Отказоустойчивая структура на основе логического дополнения с коррекцией по паритету

Для построения новой отказоустойчивой структуры берется известный метод логического дополнения. Назовем новую структуру «логическим дополнением с коррекцией по паритету» (parity correction system based on Boolean complement).

В структуре на рисунке 3 блок $F(x)$, вычисляющий систему булевых функций $f_1, f_2, \dots, f_{m-1}, f_m$ от t входных переменных, — исходное комбинационное устройство автоматики. Именно для него строится отказоустойчивая структура. $G(x)$ — блок дополнения, $R(x)$ — коррекции. Также используется блок вычисления функции паритета $P(x)$ как схема контроля вычислений [26]. В качестве данного блока может выступать и многовыходной блок контроля по другому признаку, например по кодам с суммированием [27]. Использование другого кода вместо кода

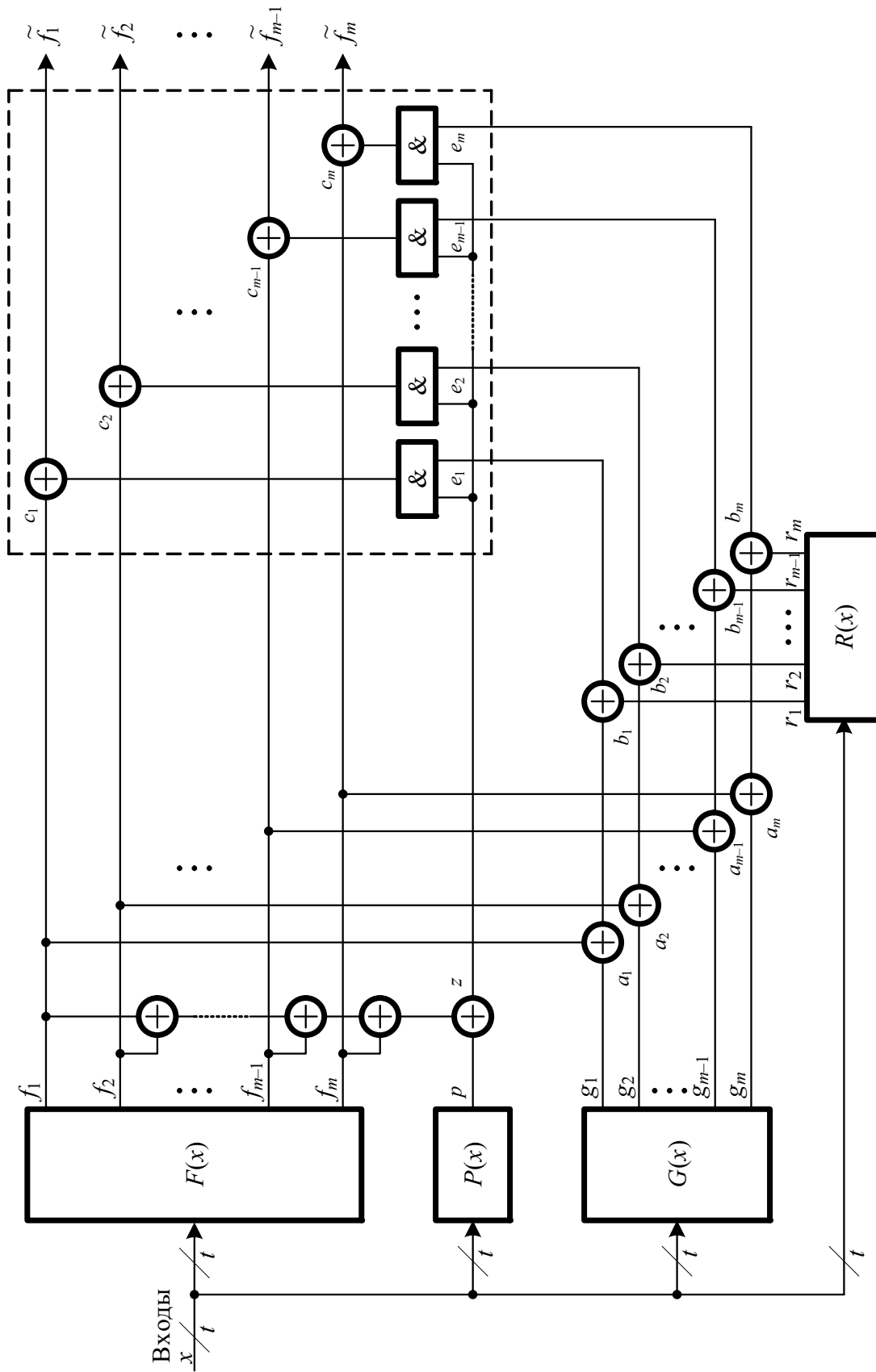


Рис. 3. Отказоустойчивая структура на основе контроля вычислений по паритету и последующей коррекции по методу дополнения

паритета, естественно, увеличивает сложность соответствующего блока, однако и повышает обнаруживающую способность.

Логическое дополнение используется в предложенной структуре на уровне подсхемы вычисления ошибки на выходах блока $F(x)$ и подсхемы коррекции. Фактически подсхема фиксации ошибок идентична схеме функционального контроля по паритету с использованием функции дополнения, описанной в [26]. Остальные каскады сумматоров по модулю два в структуре, приведенной на рисунке 3, предназначены для идентификации неверно вычисленных значений функций $f_1, f_2, \dots, f_{m-1}, f_m$ и их исправления.

Неисправности, возникающие в блоке $F(x)$, искажают значения рабочих функций $f_1, f_2, \dots, f_{m-1}, f_m$ на определенных входных наборах. Это приводит к искажению значения функции паритета на том же входном наборе, если ошибка в выходном векторе $\langle f_m f_{m-1} \dots f_2 f_1 \rangle$ не является ошибкой четной кратностью (в данном конкретном случае, т. к. использован контроль вычислений по паритету, при котором любая ошибка четной кратностью не будет обнаружена [28]). Значения функций $g_1, g_2, \dots, g_{m-1}, g_m$, вычисляемых блоком $G(x)$, и функций $r_1, r_2, \dots, r_{m-1}, r_m$, вычисляемых блоком $R(x)$, подбираются на этапе проектирования структуры таким образом, чтобы при штатной работе (в отсутствие неисправностей) значения функций активации коррекции $e_1, e_2, \dots, e_{m-1}, e_m$ были равными 0. В этом случае на логических элементах AND блока принятия решений формируются сигналы 0 и сигналы на рабочих выходах схемы остаются равными $\tilde{f}_i = f_i \oplus (e_i = 0) = f_i$. Неисправности в блоке $F(x)$ искажают значения функции паритета, а также функций дополнения $a_1, a_2, \dots, a_{m-1}, a_m$. Это приводит к активации функций коррекции. Особенности синтеза блоков $G(x)$ и $R(x)$ будут рассмотрены далее.

Дополнение $G(x)$ обнаруживает все одиночные неисправности в схеме $F(x)$. Паритет обнаруживает неисправности в $F(x)$, которые проявились на нечетном числе входов. Известны [6, 9] методы синтеза устройств, контролепригодных для использования кодов паритета, а также методы организации контроля по группам выходов комбинационных устройств.

Ошибки, возникающие на выходах схемы $F(x)$ из-за ее внутренних неисправностей, корректируются, если дополнение и паритет одновременно обнаружили ошибку, т. е.:

$$\tilde{f}_i = \begin{cases} f_i \oplus 1, & \text{при } e_i = 1 \& z = 1; \\ f_i, & \text{в другом случае.} \end{cases} \quad (2)$$

Корректирующая способность для данной структуры ограничивается возможностями обнаружения ошибок с помощью паритета. Однако это только в том случае, если при синтезе отказоустойчивой системы существует ограничение, связанное с невозможностью анализа и изменения структуры самого объекта $F(x)$. Если же такая процедура возможна, то сам объект $F(x)$ может быть реали-

зован в виде пригодного к контролю по коду паритета устройства – устройства с независимыми выходами [6, 9]. Альтернативным вариантом может быть синтез отдельных подсхем контроля по коду паритета для групп независимых выходов устройства $F(x)$ [27].

Рассмотрим работу предложенной структуры при неисправностях в $G(x)$, $P(x)$ и XOR 's. Пусть неисправность возникает в блоке $P(x)$ или в одном из элементов каскада вычисления функции z . В этом случае сигнал $z = 1$, но сигнал e_i остается равным 0, и коррекции правильного выхода f_i не происходит. Если же неисправность возникает в блоке $G(x)$, то сигнал $e_i = 1$, но сигнал $z = 0$, и коррекции правильного выхода f_i также не происходит. При неисправности в блоках XOR 's a_i или b_i сигнал e_i может быть равен как 0, так и 1, но сигнал z все время равен 0, поэтому коррекции правильного выхода f_i опять же не происходит. Анализ показывает, что ложная коррекция в данной структуре возможна только из-за неисправностей на входах/выходах XOR 's c_i . Этот недостаток структуры устраняется путем использования высоконадежных элементов сложения по модулю два в выходном каскаде коррекции.

3. Способ синтеза блоков логического дополнения и коррекции сигналов

Рассмотрим один из способов синтеза блоков дополнения и коррекции для предложенной отказоустойчивой структуры. При этом в качестве функций коррекции $r_1, r_2, \dots, r_{m-1}, r_m$ выступают только переменные x_j , что позволяет не синтезировать блок $R(x)$ как таковой (это будет фактически коммутатор входных воздействий). Задача синтеза – получение функций логического дополнения $g_1, g_2, \dots, g_{m-1}, g_m$.

Правила синтеза блока дополнительной логики

1. Для каждой функции $f_i (i \in \{1, 2, \dots, m\})$ осуществляется поиск переменной x_j , которая позволяет получить наиболее простое с точки зрения технической реализации решение, и строится структура, приведенная на рисунке 4.

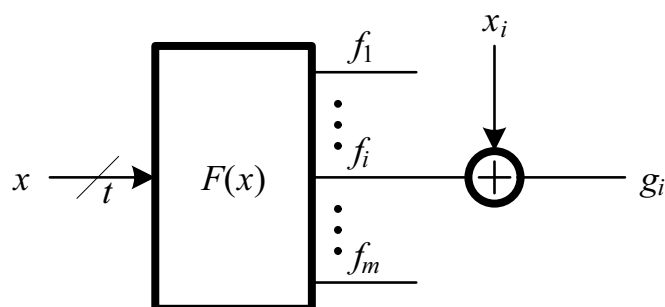


Рис. 4. Структурная схема получения функции дополнения

2. Полагаем $i = 1$.
3. Полагаем $j = 1$.
4. Выбираем функцию f_i и вычисляем для нее вариант функции дополнения g_i по переменной x_j на всех входных наборах $\langle x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n \rangle$.
5. Минимизируем полученную функцию g_i и записываем ее в память.
6. Полагаем $j := j + 1$.
7. Проверяем условие достижения конечной входной переменной $x_i: j > t$? Если нет, то возвращаемся к пункту 4 данного алгоритма. В противном случае переходим к пункту 8.
8. Полагаем $i := i + 1$.
9. Проверяем условие достижения конечной функции $f_m: i > m$? Если нет, то возвращаемся к пункту 3 данного алгоритма. В противном случае переходим к пункту 10.
10. Для каждой функции g_i определяется та переменная $(x_j^i)_{\min}$, дополнение по которой дает наименьшую сложность реализации в выбранном элементном базисе.
11. Собирается структура, приведенная на рисунке 5.
12. Структурная схема, полученная на предыдущем этапе, оптимизируется, что и дает конечную структурную схему блока $G(x)$.

Отметим, что при реализации блока $G(x)$ на этапе оптимизации его структуры может быть осуществлена совместная оптимизация сразу нескольких вариантов функций дополнения и выбор наилучшего варианта. Однако это увеличивает сложность самого процесса оптимизации и эффективно может использоваться на ограниченном числе входных переменных $x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_i$ (как правило, до 30–35 при мощности современных вычислительных систем).

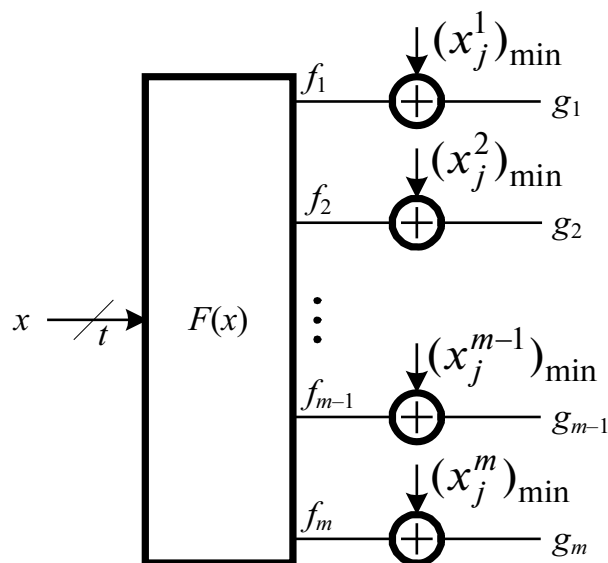


Рис. 5. Структурная схема получения блока $G(x)$

4. Пример синтеза отказоустойчивой структуры

Рассмотрим особенности построения предложенной отказоустойчивой структуры на следующем примере.

Пусть дано комбинационное устройство $F(x)$, имеющее четыре входа и пять выходов (рис. 6), описываемых следующей системой функций алгебры логики:

$$\begin{cases} f_1 = \overline{x_1} \overline{x_3} \overline{x_4} \vee \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_4} \vee \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_3} \vee \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_3} \vee \overline{x_1} \overline{x_3} \overline{x_4}; \\ f_2 = \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_3} \vee \overline{x_1} \overline{x_3} \overline{x_4} \vee \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_4} \vee \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_3} \vee \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_3} \vee \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_3} \overline{x_4}; \\ f_3 = \overline{x_3} \overline{x_4} \vee \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_4} \vee \overline{x_2} \overline{x_3} \overline{x_4} \vee \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_4}; \\ f_4 = \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_3} \vee \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_4} \vee \overline{x_2} \overline{x_3} \overline{x_4} \vee \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_3} \vee \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_4}; \\ f_5 = \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_4} \vee \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_3} \vee \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_4} \vee \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_3} \overline{x_4}. \end{cases}$$

Построим для заданного устройства $F(x)$ отказоустойчивую структуру в соответствии со структурой, изображенной на рисунке 3, и предложенным выше алгоритмом.

Схема, приведенная на рисунке 6, реализована как комбинационное устройство автоматики с независимыми выходами.

По этой причине на входах второго каскада схемы выходы предыдущего каскада используются только единожды. Это позволяет любой одиночной неисправности в схеме проявляться в виде одиночного искажения на выходах f_i и обнаруживаться в схеме контроля.

Воспользуемся непосредственно представленным выше алгоритмом получения значений функций логического дополнения и коррекции сигналов. Следуя его пунктам, построим таблицу 1, включающую описание каждой из функций дополнения, а также функции паритета.

Среди каждой группы функций $g_1^j = f_1 \oplus x_j$, $g_2^j = f_2 \oplus x_j$, $g_3^j = f_3 \oplus x_j$, $g_4^j = f_4 \oplus x_j$ и $g_5^j = f_5 \oplus x_j$ определяем наилучшие с точки зрения технической реализации варианты дополнения. Будем оценивать их по показателю L – числа внутренних входов логических элементов схемы без учета инверсий на входах [29]. Например, сложность блока $F(x)$, изображенного на рисунке 6, $L_{F(x)} = 97$.

Функция, реализуемая на выходе блока $P(x)$:

$$p = (\overline{x_1} \vee x_2 \vee x_3)(\overline{x_1} \vee \overline{x_2} \vee \overline{x_3} \vee \overline{x_4})(x_1 \vee x_2 \vee \overline{x_3} \vee x_4).$$

Сложность реализации такой функции (рис. 7) равна $L_{P(x)} = 14$.

Наиболее простые функции для реализации на выходе блока $G(x)$ имеют следующий вид:

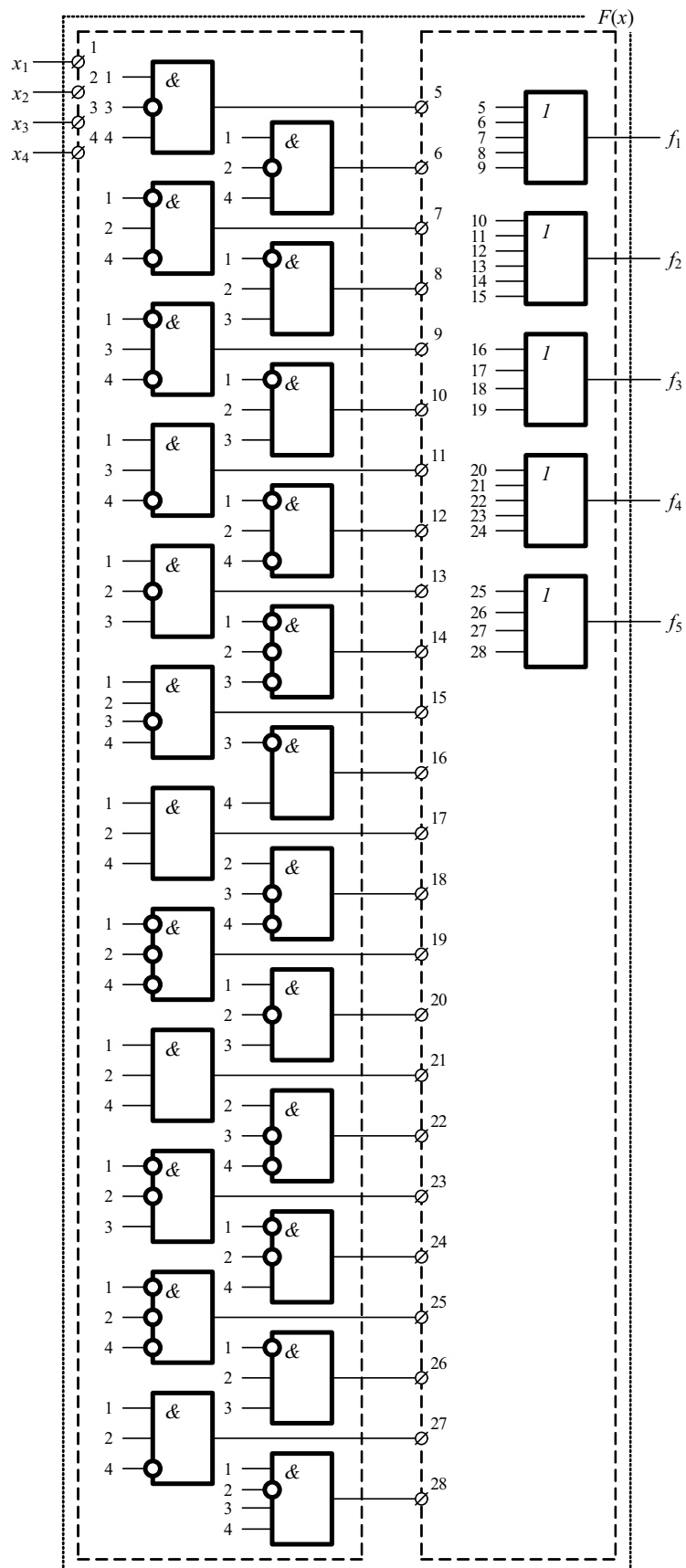
Рис. 6. Структурная схема блока $F(x)$

Таблица 1. Описание функций схемы коррекции

Входные комбинации	Выходы блока $F(x)$	Выход блока $P(x)$	Выходы блока $G(x)$ до оптимизации				
			$g_1^j = f_1 \oplus x_j$	$g_2^j = f_2 \oplus x_j$	$g_3^j = f_3 \oplus x_j$	$g_4^j = f_4 \oplus x_j$	$g_5^j = f_5 \oplus x_j$
x_1x_2 x_3x_4	$f_1f_2f_3$ f_4f_5	p	$g_1^1 g_1^2 g_1^3 g_1^4$	$g_2^1 g_2^2 g_2^3 g_2^4$	$g_3^1 g_3^2 g_3^3 g_3^4$	$g_4^1 g_4^2 g_4^3 g_4^4$	$g_5^1 g_5^2 g_5^3 g_5^4$
0000	01101	1	0000	1111	1111	0000	1111
0001	01110	1	0001	1110	1110	1110	0001
0010	10111	0	1101	0010	1101	1101	1101
0011	00010	1	0011	0011	0011	1100	0011
0100	10110	1	1011	0100	1011	1011	0100
0101	00100	1	0101	0101	1010	0101	0101
0110	11001	1	1001	1001	0110	0110	1001
0111	11001	1	1000	1000	0111	0111	1000
1000	11000	0	0111	0111	1000	1000	1000
1001	10100	0	0110	1001	0110	1001	1001
1010	11010	1	0101	0101	1010	1010	1010
1011	01011	1	1011	0100	1011	0100	0100
1100	00111	1	1100	1100	0011	0011	0011
1101	11111	1	0010	0010	0010	0010	0000
1110	01000	1	1110	0001	1110	1110	1100
1111	00110	0	1111	1111	0000	0000	1111

$$g_1^1 = x_2x_3 \vee \overline{x_2x_4} \vee \overline{x_1x_3x_4} = a \vee b \vee c\overline{x_4};$$

$$g_2^3 = \overline{x_1x_2} \vee \overline{x_1x_2x_4} \vee \overline{x_2x_3x_4} = \overline{x_1x_2} \vee \overline{x_1x_2x_4} \vee d\overline{x_4};$$

$$g_3^1 = \overline{x_1x_3} \vee \overline{x_2x_4} \vee \overline{x_1x_2x_3} \vee \overline{x_1x_3x_4} = \overline{x_1x_3} \vee b \vee x_1(e \vee \overline{x_3x_4});$$

$$g_4^2 = \overline{x_1x_4} \vee \overline{x_1x_3} \vee \overline{x_2x_3x_4} \vee \overline{x_2x_3x_4} = x_4(\overline{x_1} \vee e) \vee c \vee a\overline{x_4};$$

$$g_5^1 = x_2x_3 \vee \overline{x_2x_4} \vee \overline{x_1x_2x_3} = a \vee b \vee x_1d.$$

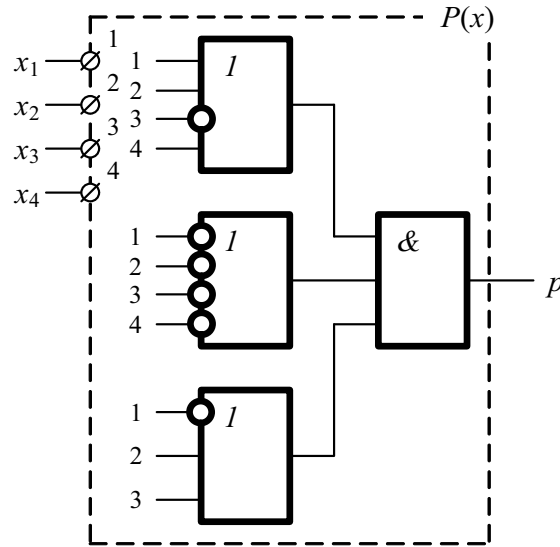


Рис. 7. Структурная схема блока $P(x)$

Использование полученных выше функций позволяет синтезировать блок дополнения в виде схемы, приведенной на рисунке 8. Ее сложность составляет $L_{G(x)} = 50$.

Таким образом, отказоустойчивая структура для заданного комбинационного устройства выглядит так, как это показано на рисунке 9. На нем также показана работа схемы коррекции при поступлении на входы системы кодового вектора $\langle x_4 x_3 x_2 x_1 \rangle = \langle 0000 \rangle$ и возникновении ошибки вида $0 \rightarrow 1$ на выходе f_1 .

Учитывая сложности реализации элементов коррекции и дополнения сигналов, $L_{XOR} = 6$ и $L_{AND} = 2$, получим значение сложности технической реализации отказоустойчивой структуры с коррекцией по коду паритета:

$$L_{PC} = L_{F(x)} + L_{G(x)} + L_{P(x)} + 20L_{XOR} + 5L_{AND} = 97 + 50 + 14 + 20 \cdot 6 + 5 \cdot 2 = 291.$$

Данная величина указывает на то, что сложность структурной схемы с коррекцией сигналов в 2,88 раза превышает сложность реализации самого блока $F(x)$. Сравним полученный результат со сложностью традиционной отказоустойчивой структуры «дублирование с коррекцией», приведенной на рисунке 2, и структурой на основе использования мажоритарного принципа «2 из 3», приведенной на рисунке 1.

Сложность системы «дублирование с коррекцией» определяется величиной:

$$L_D = 2L_{F(x)} + L_{P(x)} + 3 \cdot 5 \cdot L_{XOR} + 5L_{AND} = 2 \cdot 97 + 14 + 90 + 5 = 303.$$

Найдем отношение величин L_{PC} и L_D :

$$\delta = \frac{L_{PC}}{L_D} \cdot 100\% = \frac{291}{303} \cdot 100\% \approx 96,04\%.$$

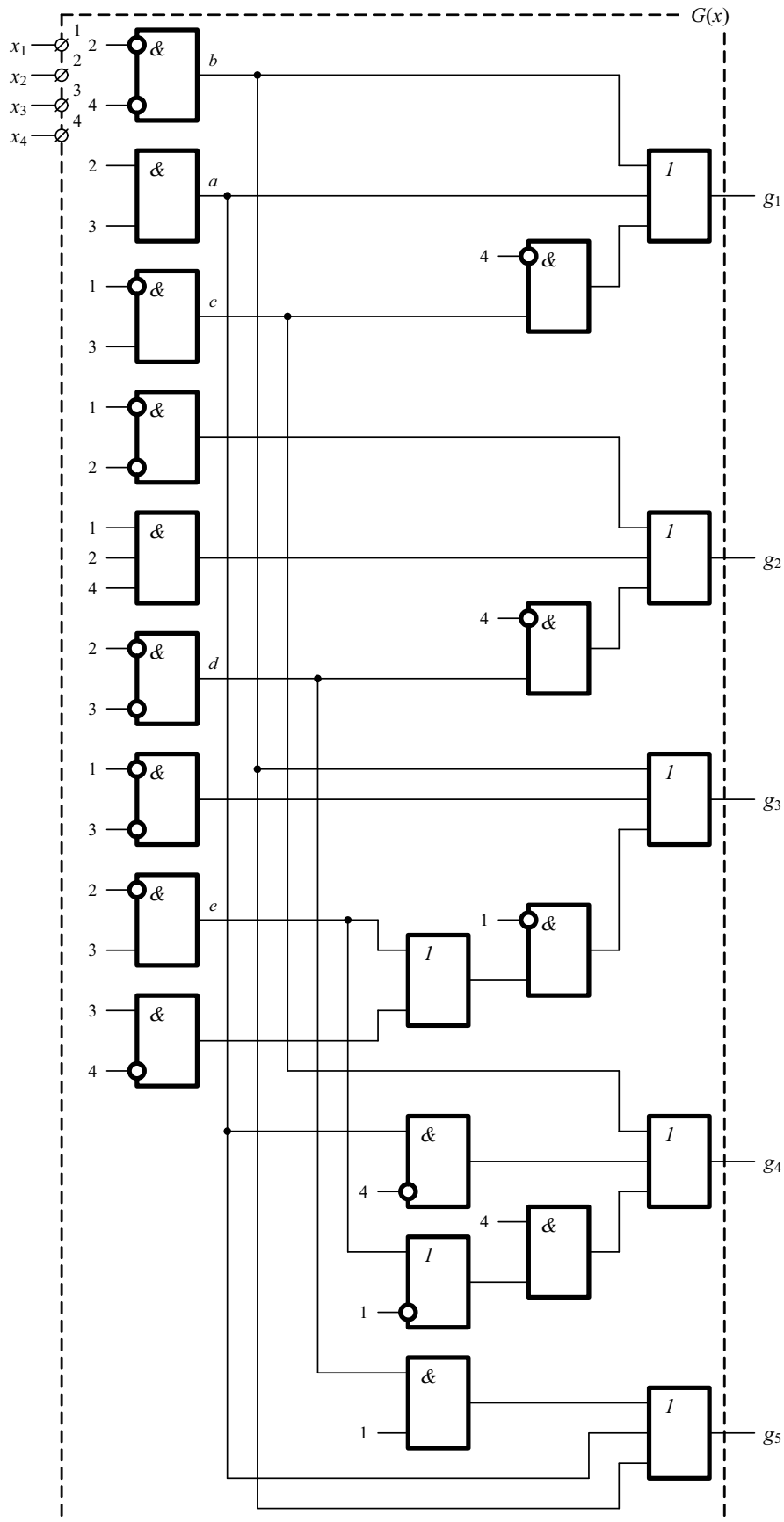


Рис. 8. Структурная схема блока $G(x)$

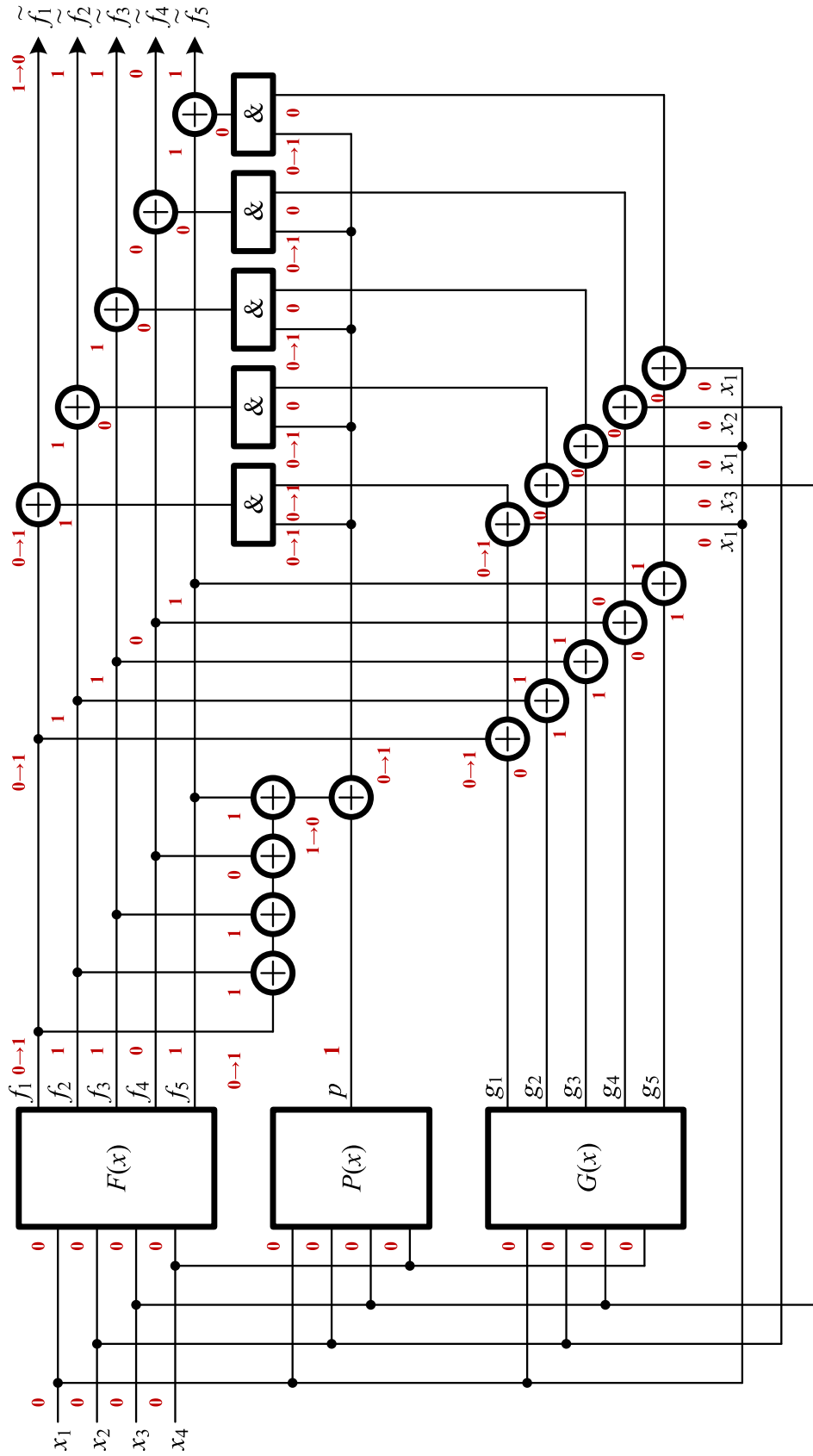


Рис. 9. Схема отказоустойчивого комбинационного устройства

Из полученного результата следует, что система, полученная на основе логического дополнения с контролем по коду паритета, для рассматриваемого комбинационного устройства является более простой, чем система «дублирование с коррекцией».

Сравним величину L_{PC} с величиной сложности реализации схемы коррекции по принципу «2 из 3» (L_{MC}), изображенной на рисунке 1 (в ней использованы мажоритарные элементы (рис. 10), сложность которых оценивается величиной $L_{\geq 2} = 9$):

$$L_{MC} = 3L_{F(x)} + 5L_{\geq 2} = 3 \cdot 97 + 5 \cdot 9 = 336.$$

Найдем отношение величин L_{PC} и L_{MC} :

$$\mu = \frac{L_{PC}}{L_{MC}} \cdot 100\% = \frac{291}{336} \cdot 100\% \approx 86,607\%.$$

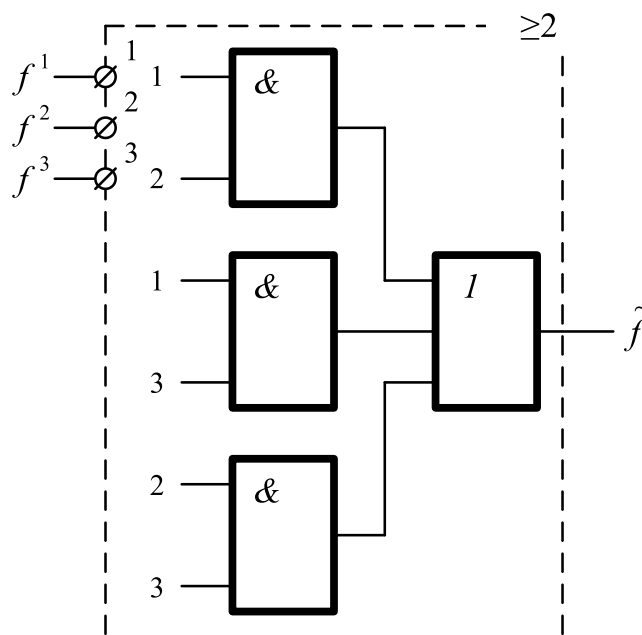


Рис. 10. Структурная схема элемента «2 из 3»

Полученный результат свидетельствует о том, что выигрыш в сложности технической реализации схемы «логическое дополнение с коррекцией по паритету» на основе кода паритета перед схемой мажоритарной коррекции составляет более 10%.

Таким образом, предложенная отказоустойчивая структура обладает преимуществом перед известными схемами коррекции.

5. Результаты экспериментов

В ходе исследований особенностей предложенной отказоустойчивой структуры были проведены экспериментальные исследования с комбинационными устройствами из специального набора контрольных схем [30, 31].

Эксперименты заключались в синтезе отказоустойчивых комбинационных схем по предложенной на рисунке 3 структуре, а также в анализе корректирующей способности. Для каждой контрольной схемы строилась предложенная структура, а также вычислялась занимаемая площадь (*area overhead*) в числе букв в формульной записи (*literals*). В ходе оценки корректирующей способности схем коррекции моделировалась работа контрольных комбинационных схем на 1000 псевдослучайных входных наборов при внесении последовательно всех одиночных константных неисправностей на выходах их внутренних логических элементов. Вероятность коррекции ошибки p_c определялась по формуле:

$$p_c = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{n_i}{1000}}{N}, \quad (3)$$

где N — число всех неисправностей для данной структуры (в эксперименте рассматривалась модель одиночных константных неисправностей); n_i — число входных векторов, на которых присутствует правильный выходной вектор.

В таблице 2 приведены результаты экспериментов для предложенной структуры. Дополнение $G(x)$ получено представленным выше способом. В качестве корректирующих функций $r_1, r_2, \dots, r_{n-1}, r_m$ были выбраны входные переменные, что позволило отказаться от реализации блока $R(x)$. В эксперименте производилось сравнение сложности технической реализации предложенной схемы коррекции с двумя известными схемами — «дублирование с коррекцией» и схемы с мажоритарным принципом коррекции. В таблице представлены результаты расчетов величин площадей составляющих системы коррекции на основе логического дополнения с контролем по паритету, а также результирующие величины для всех трех систем — L_{PC}, L_D, L_{MC} . В последних двух столбцах таблицы представлены характеристики δ и μ . Они показывают, какую долю площади занимает система «логическое дополнение с коррекцией по паритету» от площадей системы «дублирование с коррекцией» и системы с мажоритарной коррекцией.

В ходе эксперимента для структурной схемы отказоустойчивой системы получены следующие средние показатели: средняя площадь блока вычисления функции паритета составила 28,6% от средней площади исходной схемы, блока контрольной логики — 38,9%, дополнительных элементов — 81,5%. В среднем вся отказоустойчивая структура занимает площадь, равную 249% от площади исходной схемы. Эти результаты соизмеримы с результатами оценки сложности технической реализации систем с обнаружением неисправностей на основе дублирования. Сравним системы с коррекцией ошибок.

Таблица 2. Результаты экспериментов по оценке сложности технической реализации

№ п/п	Контрольная схема	t	m	L _{F(x)}	Сложность составляющих структуры «логическое дополнение с коррекцией по паритету»			L _{PC}	L _D	L _{MC}	δ, %	μ, %	
					L _{P(x)}	L _{G(x)}	L _{XORS} +L _{ANDS}						
1	5xp1	7	10	218	66	47	180	511	642	744	79,595	68,683	
2	b1	3	4	17	6	5	72	100	96	87	104,167	114,943	
3	bw	5	28	296	11	175	504	986	995	1140	99,095	86,491	
4	clip	9	5	366	127	106	90	689	929	1143	74,166	60,28	
5	cm138a	6	8	35	3	31	144	213	185	177	115,135	120,339	
6	cm42a	4	10	35	3	35	180	253	213	195	118,779	129,744	
7	cm82a	5	3	26	25	22	54	127	119	105	106,723	120,952	
8	cmb	16	4	62	20	32	72	186	200	222	93	83,784	
9	con1	7	2	32	22	22	36	112	114	114	98,246	98,246	
10	cu	14	11	90	26	53	198	367	360	369	101,944	99,458	
11	f51m	8	8	169	99	41	144	453	549	579	82,514	78,238	
12	idd	9	19	173	14	89	342	618	626	690	98,722	89,565	
13	misex1	8	7	131	22	54	126	333	382	456	87,173	73,026	
14	misex2	25	18	228	57	121	324	730	765	846	95,425	86,288	
15	pm1	16	13	85	55	51	234	425	407	372	104,423	114,247	
16	rd53	5	3	82	33	34	54	203	239	273	84,937	74,359	
17	rd73	7	3	275	62	88	54	479	654	852	73,242	56,221	
18	rd84	8	4	305	70	98	72	545	736	951	74,049	57,308	
19	sao2	10	4	284	65	130	72	551	689	888	79,971	62,05	
20	term1	34	10	625	194	126	180	1125	1584	1965	71,023	57,252	
21	x2	10	7	71	20	47	126	264	260	276	101,538	95,652	
22	z4ml	7	4	77	53	25	72	227	263	267	86,312	85,019	
				Средние значения	167,364	47,864	65,091	151,364	431,682	500,318	577,773	92,281	86,916

Для 15 из 22 схем получены значения величин $\delta < 100\%$, причем для ряда схем этот показатель не превышает 80% . Гораздо больший эффект получен при сравнении со схемой коррекции на основе мажоритарного принципа – для 17 из 22 схем получены значения $\mu < 100\%$, а для некоторых – менее 70% . Средние значения относительных показателей $\delta = 92,281\%$ и $\mu = 86,916\%$, что говорит о преимуществе предложенной структурной схемы перед известными.

В таблице 3 приведены данные по рассчитанным значениям вероятностей коррекции ошибок для выбранных контрольных комбинационных устройств. При проведении экспериментов специально не выделялись группы независимых выходов и не модифицировались структуры исходных комбинационных

Таблица 3. Результаты экспериментов по оценке вероятности коррекции ошибки

№ п/п	Контрольная схема	p_c
1	5xp1	0,958857
2	b1	0,911765
3	bw	0,954941
4	clip	0,986697
5	cm138a	0,918367
6	cm42a	0,914774
7	cm82a	0,940566
8	cmb	0,955479
9	con1	0,962706
10	cu	0,937016
11	f51m	0,945205
12	ldd	0,93921
13	misex1	0,960326
14	misex2	0,94939
15	pm1	0,938583
16	rd53	0,97218
17	rd73	0,987358
18	rd84	0,983732
19	sao2	0,985739
20	term1	0,984985
21	x2	0,94715
22	z4ml	0,957597
Среднее значение		0,95421

устройств. Таким образом, тестирование контрольных схем осуществлялось без привязки к особенностям их структуры; соответственно, не были исключены ошибки с четными кратностями (напомним, что они не обнаруживаются при контроле по паритету). Вероятности коррекции ошибок для структур каждого из рассматриваемых комбинационных устройств больше 0,9, а для ряда схем – свыше $p_c = 0,98$. Среднее значение анализируемой величины – $p_c = 0,95421$. Это свидетельствует о высокой эффективности самих схем коррекции для представленных контрольных комбинационных устройств.

Заключение

Предложенная отказоустойчивая структура, основанная на логическом дополнении и использовании контроля вычислений в блоке основной логики по коду паритета, позволяет находить любые неисправности, возникающие в блоке $F(x)$, которые проявляются в виде искажений значений на его выходах. При этом, однако, в структуре не будут обнаруживаться неисправности элементов *XOR* выходного каскада коррекции. Данная проблема решается путем выбора высоконадежных элементов сложения по модулю два.

В сравнении с традиционными структурами «дублирование с коррекцией» и системой на основе мажоритарного принципа коррекции предложенная отказоустойчивая структура оказывается более выгодной по показателям сложности технической реализации. Эффект при использовании новой структуры по сравнению со структурой «дублирование с коррекцией» оценивается сокращением аппаратных затрат на 25–30 %, а по сравнению с мажоритарной – на 40–45 %.

Как показал эксперимент, использование предложенной в статье схемы коррекции сигналов позволяет достигать высоких показателей корректирующей способности даже без анализа их структурных схем, модификации схем в схеме с независимыми выходами и без выделения групп независимых выходов. В эксперименте получено среднее число для 22 комбинационных устройств $p_c = 0,95421$.

Использование логического дополнения при синтезе отказоустойчивых устройств автоматики открывает новые пути реализации схем коррекции с уменьшенной избыточностью. Кроме того, могут быть разработаны структуры, устойчивые к проявлению множественных неисправностей, а их избыточность будет существенно ниже избыточности традиционных структур с коррекцией сигналов путем выбора большинства верных сигналов.

Библиографический список

1. *Goessel M. Error Detection Circuits / M. Goessel, S. Graf.* – London: McGraw-Hill, 1994. – 261 p.

2. Сапожников В. В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов, Д. В. Гавзов; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М.: Транспорт, 1995. – 272 с.
3. *Abramovici M.* Digital System Testing and Testable Design / M. Abramovici, M. A. Breuer, A. D. Friedman. – Computer Science Press, 1998. – 652 p.
4. *Fujiwara E.* Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications / E. Fujiwara. – New York: John Wiley & Sons, 2006. – 720 p.
5. Сапожников В. В. Основы теории надежности и технической диагностики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. – Санкт-Петербург: Издательство «Лань», 2019. – 588 с.
6. Сапожников В. В. Коды Хэмминга в системах функционального контроля логических устройств / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. – СПб.: Наука, 2018. – 151 с.
7. *Göessel M.* New Methods of Concurrent Checking: Edition 1 / M. Göessel, V. Ocheretny, E. Sogomonyan, D. Marienfeld. – Dordrecht: Springer Science+Business Media B. V., 2008. – 184 p.
8. Березюк Н. Т. Кодирование информации (двоичные коды) / Н. Т. Березюк, А. Г. Андрущенко, С. С. Мощицкий, В. И. Глушков, М. М. Бенеша, В. А. Гаврилов; под ред. Н. Т. Березюка. – Харьков, издательское объединение «Вища школа», 1978. – 252 с.
9. Согомонян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян, Е. В. Слабаков. – М.: Радио и связь, 1989. – 208 с.
10. *Sogomonyan E. S.* Self-Correction Fault-Tolerant Systems / E. S. Sogomonyan. – 2018. – 30 p.
11. *Chakraborty A.* Fault Tolerant Fail Safe System for Railway Signalling / A. Chakraborty // Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS 2009). – USA, San Francisco, 2009. – Vol. II. – P. 2–7.
12. *Ubar R.* Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source) / R. Ubar, J. Raik, H.-T. Vierhaus // Information Science Reference. – New York, Hershey: IGI Global, 2011. – 578 p.
13. *Borecký J.* Enhanced Duplication Method with TMR-Like Masking Abilities / J. Borecký, M. Kohlík, P. Vít, H. Kubátová // Euromicro Conference on Digital System Design (DSD). – Limassol, Cyprus, 2016. – Vol. 1. – P. 690–693. DOI: 10.1109/DSD.2016.91
14. Гессель М. Логическое дополнение – новый метод контроля комбинационных схем / М. Гессель, А. В. Морозов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 1. – С. 167–176.
15. Сапожников В. В. Построение полностью самопроверяемых структур систем функционального контроля с использованием равновесного кода «1 из 3» / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Электронное моделирование. – 2016. – Т. 38, № 6. – С. 25–43.
16. Ефанов Д. В. Синтез самопроверяемых схем встроенного контроля на основе метода логического дополнения до равновесного кода «2 из 4» / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Пивоваров // Информатика. – 2018. – Т. 15, № 4. – С. 71–85.
17. Аксенова Г. П. Построение самопроверяемых схем встроенного контроля для автоматов с памятью / Г. П. Аксенова, Е. С. Согомонян // Автоматика и телемеханика. – 1975. – № 7. – С. 132–142.

18. Аксенова Г. П. Необходимые и достаточные условия построения полностью проверяемых схем свертки по модулю 2 / Г. П. Аксенова // Автоматика и телемеханика. – 1979. – № 9. – С. 126–135.
19. Аксенова Г. П. О функциональном диагностировании дискретных устройств в условиях работы с неточными данными / Г. П. Аксенова // Проблемы управления. – 2008. – № 5. – С. 62–66.
20. Щербаков Н. С. Достоверность работы цифровых устройств / Н. С. Щербаков. – М.: Машиностроение, 1989. – 224 с.
21. Микони С. В. Общие диагностические базы знаний вычислительных систем / С. В. Микони. – СПб.: СПИИРАН, 1992. – 234 с.
22. Hamamatsu M. Finding the Optimal Configuration of a Cascading TMR System / M. Hamamatsu, T. Tsuchiya, T. Kikuno // 14th IEEE Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing, 15–17 December 2008. – Taiwan, Taipei, 2008. – P. 329–350. DOI: 10.1109/PRDC.2008.12
23. Matsumoto K. Evaluating the Fault Tolerance of Stateful TMR / K. Matsumoto, M. Uehara, H. Mori // 13th International Conference on Network-Based Information Systems, 14–16 September 2010. – Japan, Takayama, 2010. – P. 332–336. DOI: 10.1109/NBiS.2010.86.
24. Останин С. А. Синтез отказоустойчивых комбинационных схем / С. А. Останин // Прикладная дискретная математика (приложение № 1). – 2009. – № 1. – С. 71–72.
25. Стемпковский А. Л. Методы синтеза сбоеустойчивых комбинационных КМОП схем, обеспечивающих автоматическое исправление ошибок / А. Л. Стемпковский, Д. В. Тельпухов, Т. Д. Жукова, С. И. Гуров, Р. А. Соловьев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 7. – С. 197–210. DOI 10.23683/2311-3103-2017-7-197-210
26. Saposhnikov V. V. Self-Dual Parity Checking – a New Method for on Line Testing / V. V. Saposhnikov, A. Dmitriev, M. Goessel, V. V. Saposhnikov // Proceedings of 14th IEEE VLSI Test Symposium. – USA, Princeton, 1996. – P. 162–168.
27. Сапожников В. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Классические коды Бергера и их модификации. – СПб.: Наука, 2020. – Т. 1. – 383 с.
28. Ефанов Д. В. Применение модульных кодов с суммированием для построения систем функционального контроля комбинационных логических схем / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 10. – С. 152–169.
29. Сапожников В. В. Самопроверяемые дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
30. Sentovich E. M. Sequential Circuit Design Using Synthesis and Optimization / E. M. Sentovich, K. J. Singh, C. Moon, H. Savoj, R. K. Brayton, A. Sangiovanni-Vincentelli // VLSI in Computers & Processors: Proceedings IEEE International Conference on Computer Design, 11–14 October 1992. – USA, MA, Cambridge, 1992. – P. 328–333. DOI: 10.1109/ICCD.1992.276282
31. Collection of Digital Design Benchmarks. – URL: <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks> (дата обращения: 03.10.2019).

V.V. Sapozhnikov
VI.V. Sapozhnikov

*The department of "Automation and Telemechanics on the Railway"
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg*

D.V. Efanov

*Higher School of Transport, Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg*

FAULT-TOLERANT STRUCTURE BASED ON BOOLEAN COMPLEMENT WITH PARITY CALCULATIONS CONTROL

The paper discusses typical fault-tolerant structures based on multiple redundancy of original discrete devices with subsequent comparison of signals and error concealment. The main advantages and disadvantages of typical fault-tolerant structures are described. A fault-tolerant structure with a reduced technical implementation complexity in comparison with those already known is proposed. The complexity is reduced by eliminating redundancy with integer multiplicity and using simpler devices in the correction circuit. The correction circuit synthesis method is based on the Boolean complement of signals. The new structure is described, its advantages and disadvantages are specified. The paper proposes a method for obtaining Boolean complement and signal correction functions. An example of a fault-tolerant structure synthesis for a combinational automation device is given. The experiment results using the MCNC Benchmarks system of control combinational automation devices for the synthesis of fault-tolerant structures by various methods are discussed.

Fault-tolerant discrete devices, error correction circuits, discrete systems with fault detection, control by parity code, control by summation code, duplication, triplication, majority control principle, Boolean complement method

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-377-403

References

1. *Goessel M. & Graf S. (1994) Error Detection Circuits. London, McGraw-Hill Publ., 1994, 261 p.*
2. *Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V., Khristov Kh. A. & Gavzov D. V. (1995) Metody postroyeniya bezopasnykh mikroelektronnykh sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki [Methods for building safe microelectronic systems of railway automation]. Edited by VI. V. Sapozhnikov. Moscow, Transport Publ., 1995, 272 p. (In Russian)*
3. *Abramovici M., Breuer M. A. & Friedman A. D. (1998) Digital System Testing and Testable Design. Computer Science Press, 1998, 652 p.*
4. *Fujiwara E. (2006) Code Design for Dependable Systems. Theory and Practical Applications. New York, John Wiley & Sons Publ., 2006, 720 p.*
5. *Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V. & Efanov D. V. (2019) Osnovy teorii nadezhnosti i tekhnicheskoy diagnostiki [Reliability and technical diagnostics theory fundamentals]. Saint Petersburg, Lan' Publishing House, 2019, 588 p. (In Russian)*

6. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. & Efanov D. V. (2018) Kody Khemminga v sistemakh funktsional'nogo kontrolya logicheskikh ustroystv [Hamming codes in logical devices' functional control systems]. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2018, 151 p. (In Russian)
7. Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E. & Marienfeld D. (2008) New Methods of Concurrent Checking. Edition 1. Dordrecht, Springer Science+Business Media B. V. Publ., 2008, 184 p.
8. Berezyuk N. T., Andrushchenko A. G., Moshchitskiy S. S., Glushkov V. I., Benesha M. M. & Gavrilov V. A. (1978) Kodirovaniye informatsii (dvoichnyye kody) [Information coding (binary codes)]. Edited by N. T. Berezyuk. Kharkov, "Vishcha Shkola" Publishing Association, 1978, 252 p. (In Russian)
9. Sogomonyan E. S. & Slabakov E. V. (1989) Samoproveryayemye ustroystva i otkazoustoychivyye sistemy [Self-checking devices and fault-tolerant systems]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1989, 208 p. (In Russian)
10. Sogomonyan E. S. (2018) Self-Correction Fault-Tolerant Systems. Preprint, 2018, 30 p.
11. Chakraborty A. Fault Tolerant Fail Safe System for Railway Signalling. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS 2009)*. USA, San Francisco, 2009, vol. II, pp. 2–7.
12. Ubar R., Raik J. & Vierhaus H.-T. (2011) Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source). *Information Science Reference*. New York, Hershey: IGI Global Publ., 2011, 578 p.
13. Borecký J., Kohlík M., Vít P. & Kubátová H. (2016) Enhanced Duplication Method with TMR-Like Masking Abilities. *Euromicro Conference on Digital System Design (DSD)*. Limassol, Cyprus, 2016, vol. 1, pp. 690–693. DOI: 10.1109/DSD.2016.91
14. Gessel' M., Morozov A. V., Sapozhnikov V. V. Sapozhnikov V. V. (2003) Logicheskoye dopolneniye – novyy metod kontrolya kombinatsionnykh skhem [Logic complement, a new method of checking the combinational circuits]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and Remote Control]*, no. 1, pp. 167–176. (In Russian)
15. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. & Efanov D. V. (2016) Postroyeniye polnost'yu samoproveryayemykh struktur sistem funktsional'nogo kontrolya s ispol'zovaniyem ravnovesnogo koda "1 iz 3" [Formation of totally self-checking structures of concurrent error detection systems with the use of 1-out-of-3 constant-weight code]. *Electronic Modeling*, 2016, vol. 38, no. 6, pp. 25–43. (In Russian)
16. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. & Pivovarov D. B. (2018) Sintez samoproveryayemykh skhem vstroyennogo kontrolya na osnove metoda logicheskogo dopolneniya do ravnovesnogo koda «2 iz 4» [Synthesis of a self-checking integrated control circuit using the Boolean complement method up to 2-out-of-4 constant-weight code]. *Informatika*, 2018, vol. 15, no. 4, pp. 71–85. (In Russian)
17. Aksyonova G. P. & Sogomonyan E. S. (1975) Postroyeniye samoproveryayemykh skhem vstroyennogo kontrolya dlya avtomatov s pamyat'yu [Design of self-checking circuits of in-built testing for automata with memory]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and Remote Control]*, 1975, no. 7, pp. 132–142. (In Russian)
18. Aksyonova G. P. (1979) Neobkhodimyye i dostatochnyye usloviya postroyeniya polnost'yu proveryayemykh skhem svertki po modulyu 2 [Necessary and sufficient conditions for design of completely checkable modulo 2 convolution circuits]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and Remote Control]*, 1979, no. 9, pp. 126–135. (In Russian)
19. Aksyonova G. P. (2008) O funktsional'nom diagnostirovani diskretnykh ustroystv v usloviyakh raboty s netochnymi dannymi [On functional diagnostics of discrete devices under conditions

- of operation with inaccurate data]. *Problemy upravleniya [Control sciences]*, 2008, no. 5, pp. 62–66. (In Russian)
20. *Scherbakov N. S.* (1989) Dostovernost' raboty tsifrovyykh ustroystv [The reliability of digital devices]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1989, 224 p. (In Russian)
 21. *Mikoni S. V.* (1992) Obshchiye diagnosticheskiye bazy znaniy vychislitel'nykh sistem [General diagnostic knowledge base of computing systems.]. Saint Petersburg, SPIIRAN (St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences) Publ., 1992, 234 p. (In Russian)
 22. *Hamamatsu M., Tsuchiya T. & Kikuno T.* (2008) Finding the Optimal Configuration of a Cascading TMR System. *14th IEEE Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing*, 15–17 December 2008. Taiwan, Taipei, 2008, pp. 329–350. DOI: 10.1109/PRDC.2008.12.
 23. *Matsumoto K., Uehara M. & Mori H.* (2010) Evaluating the Fault Tolerance of Stateful TMR. *13th International Conference on Network-Based Information Systems*, 14–16 September 2010. Japan, Takayama, 2010, pp. 332–336. DOI: 10.1109/NBiS.2010.86
 24. *Ostainin S. A.* (2009) Sintez otkazoustoychivyykh kombinatsionnykh skhem [Synthesis of fault-tolerant combinational circuits]. *Applied Discrete Mathematics (Supplement No.1)*, 2009, no. 1, pp. 71–72. (In Russian)
 25. *Stempkovskiy A. L., Tel'pukhov D. V., Zhukova T. D., Gurov S. I. & Solov'yev R. A.* (2017) Metody sinteza sboyeustoychivyykh kombinatsionnykh KMOP skhem, obespechivayushchikh avtomaticheskoye ispravleniye oshibok [Synthesis methods of fault-tolerant combination CMOS circuits, providing automatic correction of errors]. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2017, no. 7, pp. 197–210. DOI 10.23683/2311-3103-2017-7-197-210 (In Russian)
 26. *Saposhnikov V. V., Dmitriev A., Goessel M. & Saposhnikov V. V.* (1996) Self-Dual Parity Checking – a New Method for on Line Testing. *Proceedings of 14th IEEE VLSI Test Symposium*. USA, Princeton, 1996, pp. 162–168.
 27. *Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. & Efanov D. V.* (2020) Kody s summirovaniyem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya [Summation codes for technical diagnostics systems]. *Klassicheskiye kody Bergera i ikh modifikatsii [Classic Berger codes and their modifications]*. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2020, vol. 1, 383 p. (In Russian)
 28. *Efanov D. V., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov V. V.* (2015) Primeneniye modul'nykh kodov s summirovaniyem dlya postroyeniya sistem funktsional'nogo kontrolya kombinatsionnykh logicheskikh skhem [Applications of modular summation codes to concurrent error detection systems for combinational boolean circuits]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and Remote Control]*, 2015, no. 10, pp. 152–169. (In Russian)
 29. *Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov V. B.* (1992) Samoproveryayemyye diskretnyye ustroystva [Self-checking discrete devices]. Saint Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1992, 224 p. (In Russian)
 30. *Sentovich E. M., Singh K. J., Moon C., Savoj H., Brayton R. K. & Sangiovanni-Vincentelli A.* (1992) Sequential Circuit Design Using Synthesis and Optimization. *VLSI in Computers & Processors*. Proceedings IEEE International Conference on Computer Design, 11–14 October 1992. USA, MA, Cambridge Publ., 1992, pp. 328–333. DOI: 10.1109/ICCD.1992.276282
 31. *Collection of Digital Design Benchmarks*. URL: <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks/> (accessed: 03.10.2019).

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Убаром Р.
Поступила в редакцию 19.11.2019, принята к публикации 03.12.2019*

САПОЖНИКОВ Валерий Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

e-mail: port.at.pgups1@gmail.com

САПОЖНИКОВ Владимир Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

e-mail: sapozhnikov-at@yandex.ru

ЕФАНОВ Дмитрий Викторович – доктор технических наук, доцент, первый заместитель генерального директора – главный инженер ООО «ВЕГА ИНЖИНИРИНГ», профессор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта

e-mail: TrES-4b@yandex.ru

© Сапожников Вал. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В., 2020

Подписано в печать с оригинал-макета 22.09.2020.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 21,25. Уч.-изд. л. 10,625.
Установочный тираж 300 экз. Заказ 000.

Отпечатано в типографии ООО «Издательство ОМ-Пресс»,
190031, СПб., наб. реки Фонтанки, 117.