



# АВТОМАТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

---

# AUTOMATION ON TRANSPORT

№ 4 • Том 6

Декабрь, 2020

---

December, 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: *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: *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

- А. Б. Никитин, И. В. Кушпиль*  
 Результаты исследования технических средств контроля  
 целостности поездов ..... 411

### СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

- В. Ю. Рязанов*  
 Анализ подтверждения соответствия, обеспечение качества  
 и безопасности микропроцессорных систем железнодорожной  
 автоматики ..... 435

### МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА В ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

- В. В. Грачев, А. В. Грищенко, В. А. Кручек, Ф. Ю. Базилевский, М. А. Шварц, Ф. М. Шварц*  
 Методика синтеза нейросетевых диагностических моделей сложных  
 технических объектов ..... 466
- Г. В. Осадчий, А. В. Шинкаренко, Д. Г. Плотников, А. В. Баните*  
 Принципы построения универсальной платформы непрерывного  
 мониторинга технического состояния инфраструктурных объектов ..... 484

### ЭЛЕКТРОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- А. М. Горбачев*  
 Математическая модель маршрутных расписаний наземного  
 городского электрического транспорта ..... 499

### ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ СИСТЕМЫ

- Д. В. Сперанский, А. В. Горелик, И. А. Журавлев, А. В. Орлов*  
 Тестирование систем с нечеткими дискретными компонентами ..... 518
- V. V. Sapozhnikov, VI. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov*  
 The Features of the Concurrent Error-Detection Systems of Combinational  
 Logic Circuits Based on the Search for Groups of Symmetrically-Independent  
 Outputs Construction. .... 532

## CONTENTS

### TRANSPORT CONTROL SYSTEMS

- A. B. Nikitin, I. V. Kushpil'*  
Results of studying technical means of train integrity monitoring ..... 411

### STANDARDIZATION AND CERTIFICATION

- V. Yu. Ryazanov*  
Analysis of the regulatory framework for confirmation  
of the functional safety requirements compliance  
of microprocessor-based railway automation systems ..... 435

### MONITORING METHODS IN TRANSPORT SYSTEMS

- V. V. Grachev, A. V. Grishchenko, V. A. Kruchek, F. Yu. Bazilevsky, M. A. Schwartz,  
F. M. Schwartz*  
Methodology for synthesis of neural network diagnostic models  
of complex technical objects ..... 466
- G. V. Osadchiy, A. V. Shinkarenko, D. G. Plotnikov, A. V. Banite*  
Structural principles of a universal platform for continuous monitoring  
of the technical condition of infrastructure facilities ..... 484

### ELECTRONIC SIMULATION

- A. M. Gorbachev*  
Mathematical model of aperiodic timetables of urban electric transport ..... 499

### TECHNICAL DIAGNOSTICS AND CONTROLLABLE SYSTEMS

- D. V. Speransky A. V. Gorelik I. A. Zhuravlev A. V. Orlov*  
Testing the systems with fuzzy discrete components ..... 518
- V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov*  
The Features of the Concurrent Error-Detection Systems  
of Combinational Logic Circuits Based on the Search for Groups  
of Symmetrically-Independent Outputs Construction ..... 532

УДК 656.256.3:656.259.9

**А. Б. Никитин, д-р техн. наук**

**И. В. Кушпиль**

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

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ПОЕЗДОВ

В статье изложен теоретический подход к решению задачи контроля целостности поездов бортовыми средствами. Проведен анализ существующих подходов и технических решений по данному направлению. В настоящее время отсутствует теоретическая база, необходимая для проектирования и эксплуатации бортовых систем контроля целостности поездов. Были проведены соответствующие теоретические исследования с целью выявления общих закономерностей и алгоритмов, а также синтез аналитических моделей функционирования этих систем. Установлено, каким образом наличие автономного источника питания в составе бортовой системы контроля целостности (в зависимости от эксплуатационных особенностей и ошибок, возникающих в канале связи при передаче данных) влияет на систему управления движением и пропускную способность участков. Это отражено в полученных математических моделях и графиках зависимостей. Результаты будут полезны при проектировании и эксплуатации бортовых систем контроля целостности поездов, систем управления движением, в основе которых лежат принципы спутникового позиционирования.

Контроль целостности поездов, полносоставность, алгоритмы функционирования, принцип работы, управление движением поездов, пропускная способность участков

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-411-434

### Введение

Растущий спрос на экономическую эффективность железнодорожных перевозок создает предпосылки для внедрения более эффективных систем железнодорожной автоматизации и телемеханики (СЖАТ). Изученный опыт зарубежных стран [1–8] позволяет сделать вывод, что экономически выгодные решения, гарантирующие безопасность движения поездов, основаны на использовании надежного цифрового радиоканала, систем спутникового позиционирования и бортовых систем контроля целостности поездов.

Контроль целостности поездов бортовыми средствами — перспективное направление автоматизации перевозочного процесса и одно из ключевых условий для внедрения более эффективных СЖАТ. При этом предполагается перенос функций обеспечения безопасности движения с путевой аппаратуры ЖАТ

(рельсовые цепи, системы счета осей) на локомотив и переход к принципам координатного регулирования движения поездов [9], [10].

Положительный экономический эффект заключается в сокращении количества путевой аппаратуры ЖАТ, снижении риска вандализма и краж, упрощении процесса технического обслуживания.

### 1. Анализ бортовых систем контроля целостности поездов

Анализ научных публикаций по данной теме [11–15] позволил выделить семь наиболее распространенных способов контроля целостности поездов (КЦП) бортовыми средствами (табл. 1).

Одним из примеров решения задачи КЦП бортовыми средствами, является использование блока хвостового вагона (БХВ) отечественной систем управления тормозами поезда разработки ЗАО «НПП ТОРМО» (рис. 1).

**Таблица 1.** Основные способы контроля целостности поездов бортовыми средствами

№	Способ	Недостатки	Примечание
1	Контроль воздушной тормозной магистрали поезда путем измерения давления и объема израсходованного воздуха	В случае закупорки труб нарушение целостности не обнаруживается или обнаруживается со значительным опозданием	Способ получил широкое распространение, но считается ненадежным
2	Сквозная электрическая цепь с головы поезда к хвостовому вагону	Невозможно реализовать на грузовых поездах	Способ получил распространение только на пассажирских поездах
3	Измерение времени прохождения радиосигнала между передатчиками, расположенными в голове и хвосте поезда	Наличие аккумулятора в хвостовом вагоне, погрешности измерений, возникающие в кривых участках пути	Способ получил незначительное распространение
4	Система радиолокационного импульсного контроля, состоящая из путевого радара и бортового активного ответчика	Необходимость в полном комплекте аппаратуры, сложность реализации	Способ не получил распространения
5	Контроль длины поезда GPS-приемниками, расположенными в голове и хвосте поезда, путем постоянного контроля его длины. Для повышения достоверности показаний дополнительно используется одомер	Наличие аккумулятора в хвостовом вагоне, отсутствие GPS-сигнала в тоннелях и гористой местности, значительное энергопотребление хвостового комплекта аппаратуры	Способ получил незначительное распространение

Окончание табл. 1

№	Способ	Недостатки	Примечание
6	Контроль длины поезда при помощи радиодальномера, установленного в голове поезда и направленного в сторону хвоста. На хвостовом вагоне установлена пассивная антенна-рефлектор (без источника питания)	Погрешности измерений и вероятность потери сигнала в кривых участках пути, сложность установки хвостового комплекта аппаратуры	Способ не получил распространения
7	Построение и контроль топологии сенсорных узлов, размещенных вдоль всего поезда, путем анализа путей связи между ними	Необходимость установки нескольких комплектов аппаратуры, сложные алгоритмы функционирования, погрешности измерений	Способ не получил распространения



Рис. 1. Внешний вид БХВ

Система применяется для снижения продольных тормозных усилий при вождении поездов свыше 9000 тонн с одним локомотивом путем одновременного торможения головных и хвостовых вагонов состава [16, 17].

В состав БХВ входит: комплект крепления к автосцепке, пневмоблок, аккумуляторная батарея (АКБ), вычислительный модуль (ВМ), радиомодем типа

МОСТ 160 МГц и антенна. Локомотивное оборудование состоит из регулятора локомотивного торможения (РЛТ), модуля регистрации (МР), съемного блока индикации и ввода данных (БИВ), блока сопряжения с САУТ (БСС САУТ), источника питания и радиомодема типа МОСТ диапазона 160 МГц (рис. 2).

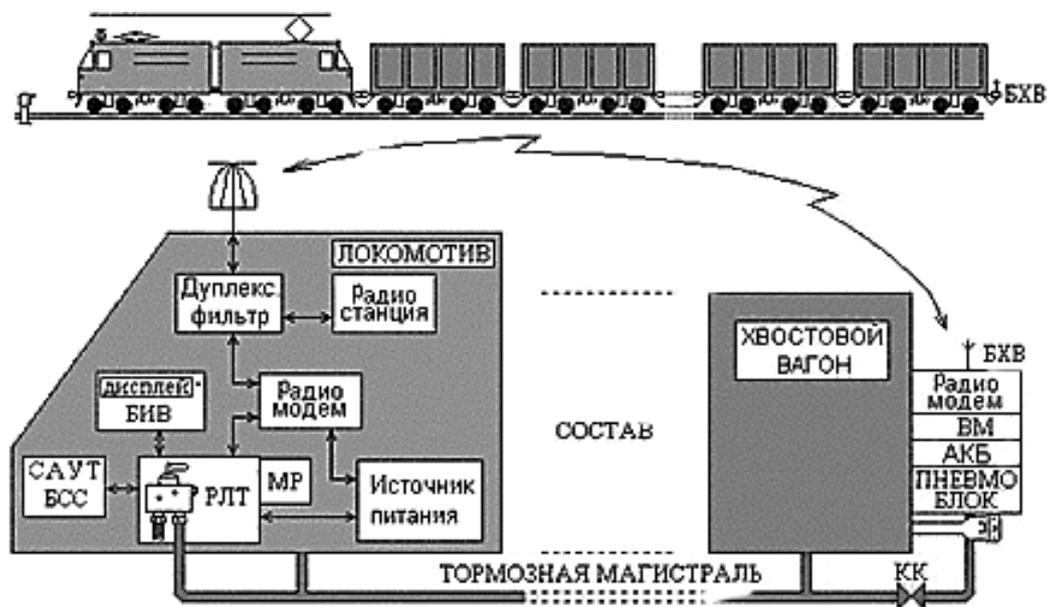


Рис. 2. Структурная схема СУТП

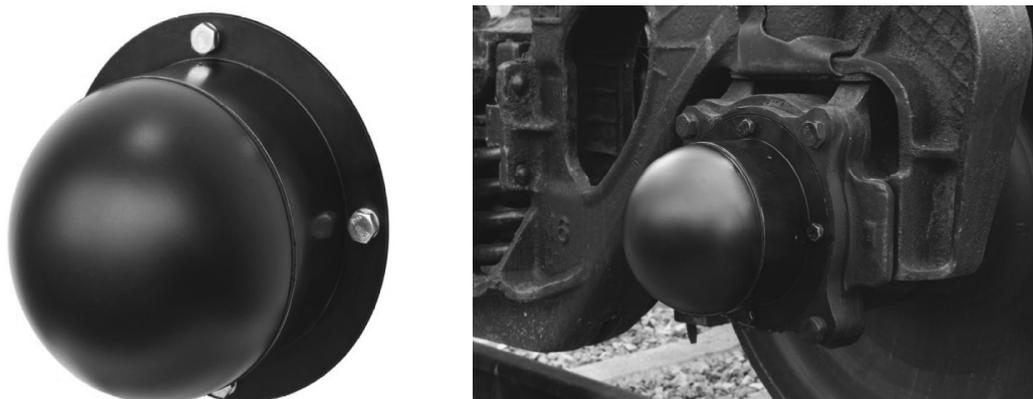
Универсальность БХВ заключается в выполнении одним устройством сразу двух функций — тормозной и функции КЦП — путем контроля давления воздуха в тормозной магистрали хвостового вагона. В системе применяется восьмикратный алгоритм передачи данных, что обеспечивает вероятность возникновения опасного отказа на уровне  $10^{-7}$ . Сигналы о состоянии тормозной магистрали передаются с БХВ на локомотив циклически каждые 4–5 с.

Недостатком БХВ является наличие аккумулятора, который в среднем рассчитан на 20–40 часов работы. Значительное энергопотребление имеет радиомодем МОСТ, который в режиме «прием» потребляет 80 % тока БХВ, в режиме «передача» потребление кратковременно увеличивается в шесть раз.

Другой пример реализации принципов КЦП — использование устройств мониторинга и диагностики грузового вагона (УМДВ) на подвижном составе [18] (рис. 3).

Устройство оснащено автономным источником питания и цифровым каналом передачи данных. Устанавливается на месте смотровой крышки буксового узла грузовых вагонов и контролирует местоположение каждого вагона, состояние рельсового пути, пробег вагона, температуру буксового узла и т. д.

Такой функциональный набор позволяет обеспечить достоверный контроль целостности поезда за счет пространственно-координатного контроля местопо-



**Рис. 3.** Внешний вид УМДВ

ложения каждого вагона и к тому же отказаться от аппаратуры КТСМ. Однако дооснащение вагонного парка потребует значительных вложений.

Сейчас не существует общепринятых требований к бортовым системам контроля целостности поездов (СКЦП). Зарубежные нормативные источники содержат различные показатели. Отечественная нормативная документация вовсе отсутствует, а те показатели, которые приводятся в статьях и докладах конференций [11, 12], основаны главным образом на переводах зарубежных документов. Приведем некоторые требования, основанные на анализе нормативных источников [14] по данному направлению (табл. 2).

К бортовым СКЦП предъявляются свои функциональные требования [13]:

- процесс соединения с системой целостности должен занимать минимум времени и состоять из минимума операций;
- система целостности должна функционировать без непосредственного участия человека;
- машинист должен постоянно иметь достоверную информацию о целостности поезда.

К аппаратным средствам бортовых СКЦП предъявляются свои требования:

- беспроводная связь предпочтительнее проводной;
- система целостности не должна требовать радикальных изменений в конструкции вагонов: это должно быть простое дополнение к существующему вагонному парку;
- необходимо использовать надежные, ударопрочные и вандаלוустойчивые аппаратные средства и материалы с широким рабочим температурным диапазоном, способные функционировать в суровых климатических условиях;
- система целостности должна быть максимально энергоэффективной.

Проведенный анализ показал, что основные направления исследований по данной теме сосредоточены обычно на каком-то одном способе КЦП, без теоретического подхода к задаче в целом.

**Таблица 2.** Количественные требования, предъявляемые к СКЦП международными железнодорожными организациями

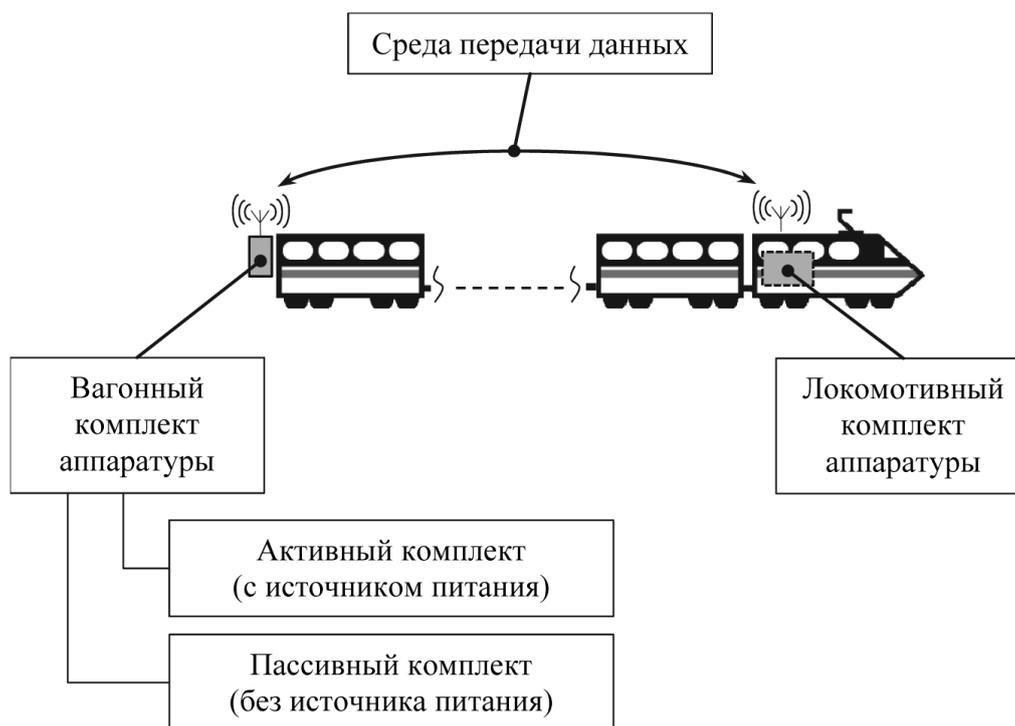
Организация, предъявляющая требования	Точность измерения длины поезда	Доступность (коэффициент готовности)	Уровень безопасности	Допустимая погрешность измерения длины поезда, L	Время реагирования системы
GRAIL	$\leq 10$ м	99,98 % — для магистральных линий 95 % — для малодействительных линий	SIL 4	$\leq 2$ L — для высокоскоростных линий $\leq 37,8$ % L — для линий со смешанным движением	—
SUGAST	6–50 м — для высокоскоростных линий > 50 м — для малодействительных линий	99,98 %	SIL 4	—	< 10 с
GNSS (Rail)	< 10 м	99,98 %	SIL 2 — SIL 4	—	10–30 с

*Примечание:* SIL 2:  $\geq 10^{-7}$  1/ч —  $< 10^{-6}$  1/ч; SIL3:  $\geq 10^{-8}$  1/ч —  $< 10^{-7}$  1/ч; SIL 4:  $\geq 10^{-9}$  1/ч —  $< 10^{-8}$  1/ч

Таким образом, целью данной статьи является теоретическое исследование бортовых СКЦП для установления общих закономерностей и алгоритмов, а также синтез аналитических моделей их функционирования.

## 2. Принцип построения и разработка алгоритмов функционирования СКЦП

Бортовые СКЦП имеют типовой принцип построения. В общем случае они состоят из локомотивного комплекта аппаратуры (ЛКА), вагонного комплекта аппаратуры (ВКА) и среды передачи данных. Вагонный комплект аппаратуры может быть как с источником питания (активный), так и без него (пассивный), (рис. 4).



**Рис. 4.** Структурная схема бортовых СКЦП

В состав локомотивного комплекта входят приемопередатчик (радиомодем, базовая радиостанция, радиодальномер и т. д.), вычислительное устройство (принимает решение о целостности поезда), источник питания.

Активный вагонный комплект включает в себя приемопередающее устройство, контроллер, датчики и источник питания. Пассивный состоит из рефлектора сигнала.

В качестве среды передачи данных может использоваться цифровой радиоканал, оптический или звуковой канал связи.

В бортовых СКЦП с пассивным ВКА отсутствует источник питания. Информационный обмен между ЛКА и ВКА осуществляется посредством отражения сигнала (отклика), посланного ЛКА от антенны-рефлектора, установленной на хвостовом вагоне в зоне прямой видимости сигнала. По полученному отклику локомотивный комплект аппаратуры принимает решение о целостности поезда. Разработан соответствующий алгоритм функционирования (рис. 5).

Особенностью СКЦП с активным ВКА является наличие источника питания. Информационный обмен между локомотивным и вагонным комплектами осуществляется по цифровому радиоканалу. Информация с датчиков ВКА формируется в пакеты данных и транслируется в ЛКА, где принимается решение о целостности [19].

Этот тип бортовых СКЦП имеет расширенные функциональные и технические возможности: применение методов кодирования информации, дополни-

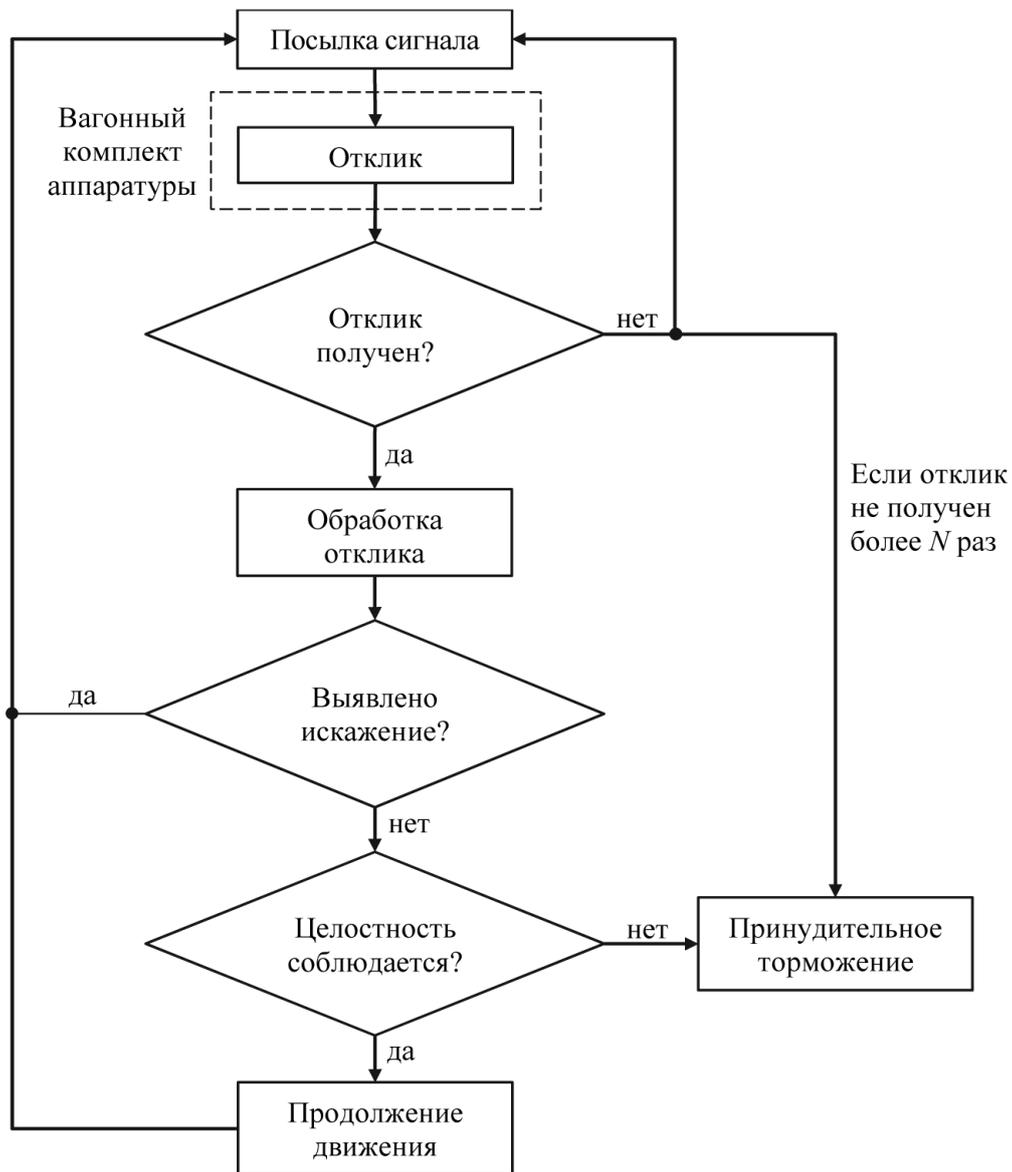


Рис. 5. Алгоритм функционирования бортовой СКЦП с пассивным ВКА

тельные функции ТИ и ТС, простота монтажа. Разработан соответствующий алгоритм функционирования (рис. 6).

### 3. Исследование характеристик источника питания СКЦП

Наличие автономного источника питания (аккумулятора) в составе ВКА накладывает ограничения на функционирование СКЦП. К ним можно отнести зависимость времени работы СКЦП от емкости источника питания, его зарядных и разрядных характеристик, температуры окружающей среды и т. д.

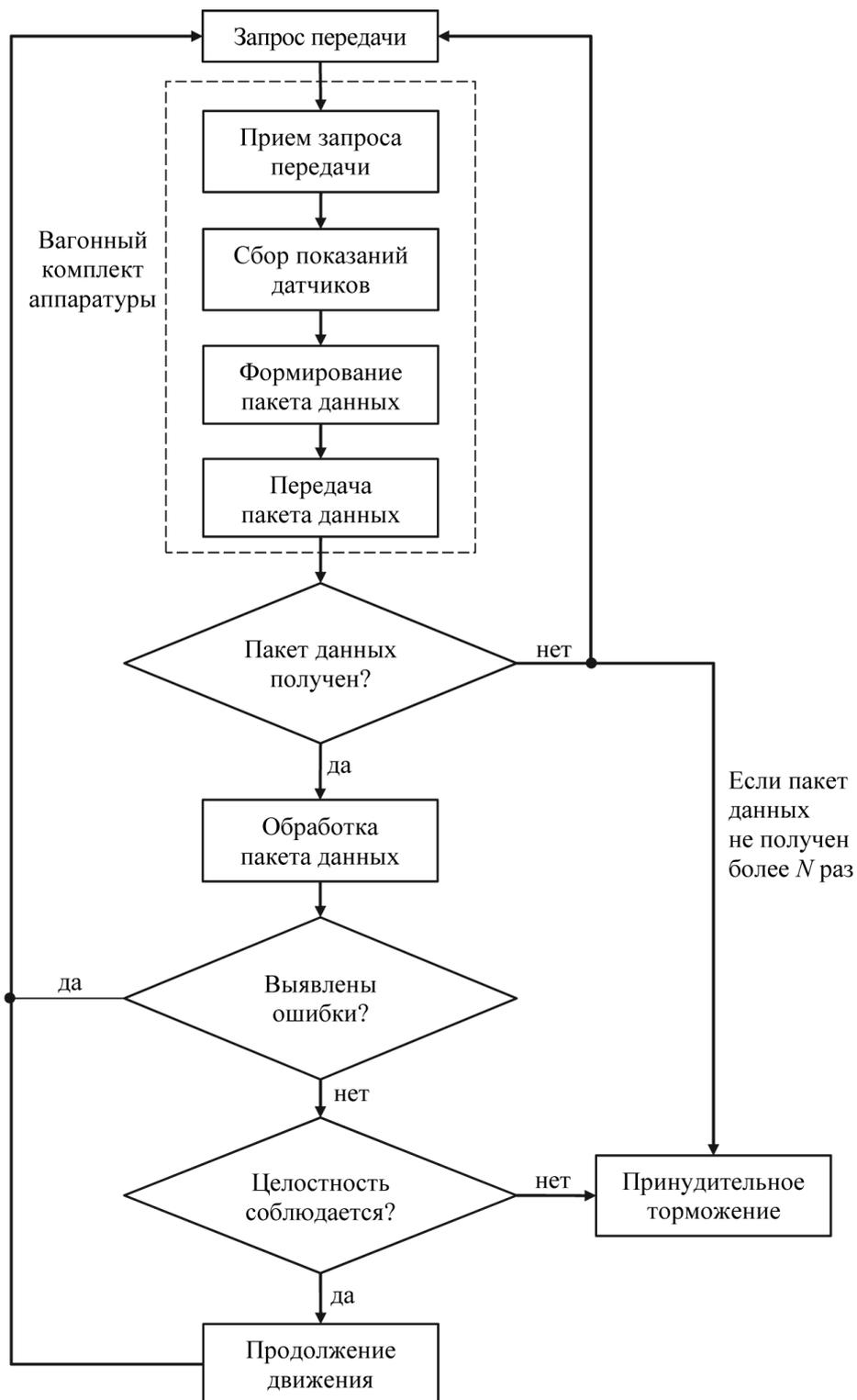


Рис. 6. Алгоритм функционирования СКЦП с активным ВКА

Возникают следующие задачи.

1. Определение типа аккумулятора с наилучшими характеристиками, способного обеспечить максимальное время работы СКЦП на одном заряде.

2. Определение ожидаемого времени работы аккумулятора на одном заряде в зависимости от эксплуатационных условий.

Для решения **первой задачи** проведем исследование технических и эксплуатационных характеристик аккумуляторов, представленных на рынке [20], [21] (табл. 3).

**Таблица 3.** Технические и эксплуатационные характеристики аккумуляторов

Тип аккумулятора	Технические характеристики (усредненные значения)					
	ЭДС, В	Диапазон рабочих температур, °С	Удельная энергоемкость, Вт·ч/кг	Саморазряд, % за 1 месяц	Допустимая глубина разряда, В	Срок службы, циклов
Свинцово-кислотный	2,1	–40...+40	25–40	≈ 15	до 1,75	до 800
Никель-кадмиевый	1,35	–50...+40	45–65	≈ 10	до 1	до 900
Никель-металлогидридный	1,25	–40...+55	60–120	≈ 10	до 1	до 1500
<b>Литий-ионный</b>	<b>3,7</b>	<b>–60...+85</b>	<b>110–270</b>	<b>≈ 2–5</b>	<b>до 2,5</b>	<b>до 5000</b>
	Эксплуатационные характеристики					
	Обслуживание	Влияние на экологию	Сфера применения			
Свинцово-кислотный	требуется	опасен	транспорт, резервные источники питания			
Никель-кадмиевый	не требуется	опасен	транспорт, авиация, судостроение			
Никель-металлогидридный	не требуется	безопасен	медицина, радиоаппаратура, ракетно-космическая отрасль			
Литий-ионный	не требуется	опасен	транспорт, бытовая техника			

Табличные данные свидетельствуют об очевидном преимуществе литий-ионных аккумуляторов, которое выражено в широком рабочем температурном диапазоне, низком значении саморазряда, длительном сроке службы, высокой удельной энергоемкости электролита, что обеспечит, в сравнении с другими типами аккумуляторов, максимальное время работы ВКА от одного заряда при минимальных габаритах аккумулятора.

Решение **второй задачи** сводится к составлению аналитической модели определения ожидаемого времени работы аккумулятора ( $T_{акк.}$ ) в зависимости от величины потребляемого тока ВКА за один период контроля целостности поезда

( $T_{\text{цел.}}$ ) и условий эксплуатации, с целью дальнейшего получения графика зависимости вида  $T_{\text{акк.}} = f(T_{\text{цел.}})$ .

Один период  $T_{\text{цел.}}$  состоит из двух более коротких временных периодов:

- периода «сна» ( $T_{\text{сна}}$ ), когда ВКА находится в состоянии ожидания запроса от ЛКА и потребляет за единицу времени минимальный ток  $I_{\text{сна}}$ ;
- периода «активности» ( $T_{\text{акт.}}$ ), когда ВКА принимает запросы ( $T_{\text{прием}}$ ), обрабатывает их ( $T_{\text{обр.}}$ ), снимает информацию с датчиков ( $T_{\text{инф.}}$ ), формирует пакет данных ( $T_{\text{форм.}}$ ) и передает данные на ЛКА ( $T_{\text{перед.}}$ ) в соответствии с алгоритмом (см. рис. 6). Ток, потребляемый за единицу времени каждого периода, выражается как  $I_{\text{акт.}}, I_{\text{прием}}, I_{\text{обр.}}, I_{\text{инф.}}, I_{\text{форм.}}, I_{\text{перед.}}$  (соответственно). Графически это можно изобразить следующим образом (рис. 7).

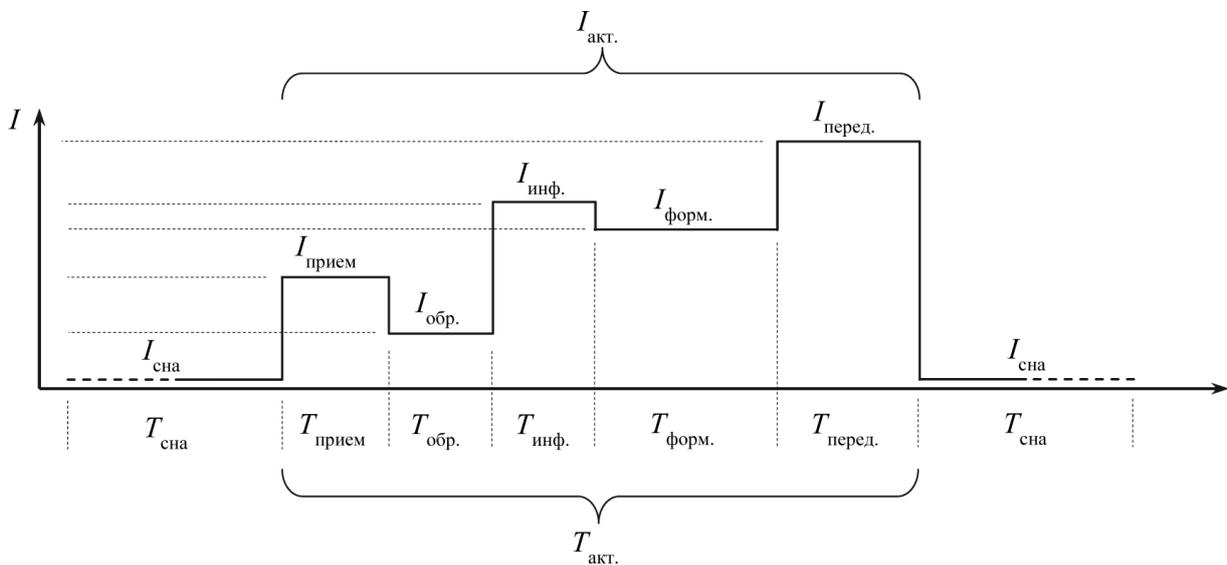


Рис. 7. Диаграмма функционирования активного ВКА

Опираясь на вышеизложенное, получим следующую группу выражений:

$$\begin{cases}
 T_{\text{цел.}} = T_{\text{сна}} + T_{\text{акт.}} \\
 T_{\text{акт.}} = T_{\text{прием}} + T_{\text{обр.}} + T_{\text{инф.}} + T_{\text{форм.}} + T_{\text{перед.}} \\
 I_{\text{цел.}} = \sum I_{\text{сна}} + \sum I_{\text{акт.}} \\
 \sum I_{\text{сна}} = I_{\text{сна}} \cdot T_{\text{сна}} \\
 \sum I_{\text{акт.}} = I_{\text{прием}} \cdot T_{\text{прием}} + I_{\text{обр.}} \cdot T_{\text{обр.}} + I_{\text{инф.}} \cdot T_{\text{инф.}} + \\
 + I_{\text{форм.}} \cdot T_{\text{форм.}} + I_{\text{перед.}} \cdot T_{\text{перед.}}
 \end{cases} , \quad (1)$$

где  $I_{\text{цел.}}$  — величина потребляемого тока за один период  $T_{\text{цел.}}$ , мА.

Следует отметить, что  $T_{\text{акт.}}$  и, следовательно,  $\sum I_{\text{акт.}}$  можно считать условно постоянными величинами, т. к. они зависят только от особенностей аппаратных

средств ВКА, а величина  $T_{\text{сна}}$  и, следовательно,  $\sum I_{\text{сна}}$  являются переменными величинами, зависящими от установленного значения  $T_{\text{цел.}}$ .

Зная  $I_{\text{цел.}}$ , можно вычислить  $T_{\text{акк.}}$  как:

$$T_{\text{акк.}} = \frac{C_{\text{акк.}}}{I_{\text{цел.}}} \cdot T_{\text{цел.}}, \quad (2)$$

где  $C_{\text{акк.}}$  — емкость аккумулятора ВКА, мА·ч, а  $\frac{C_{\text{акк.}}}{I_{\text{цел.}}}$  — ожидаемое количество возможных передач.

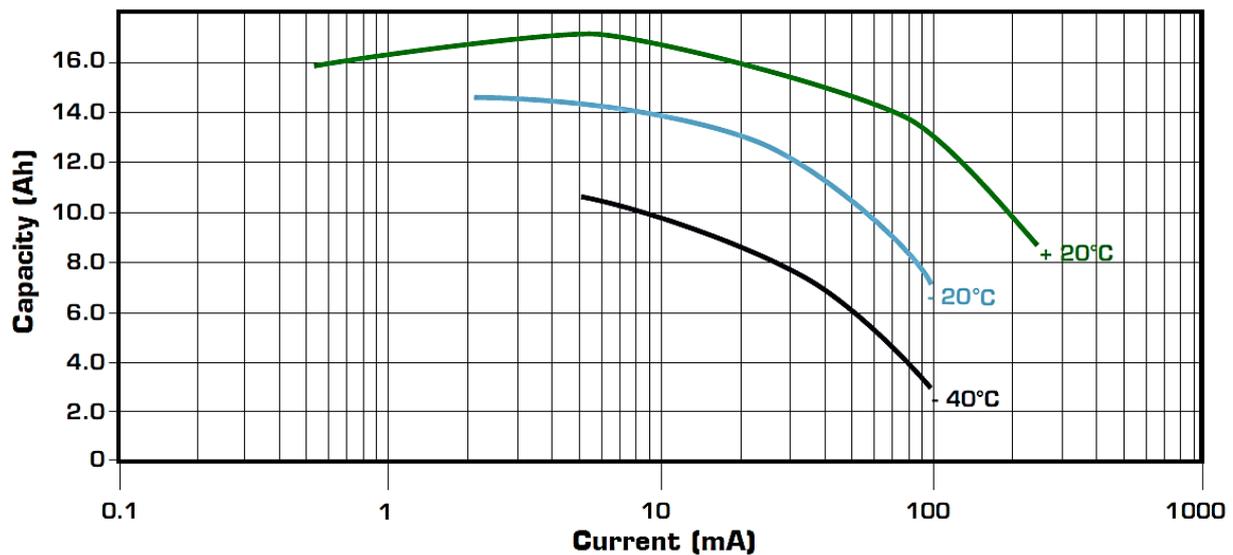


Рис. 8. Графики зависимости емкости батареи от температуры окружающей среды и тока нагрузки (батарея Saft; тип LS 33600; 17,0 А·ч)

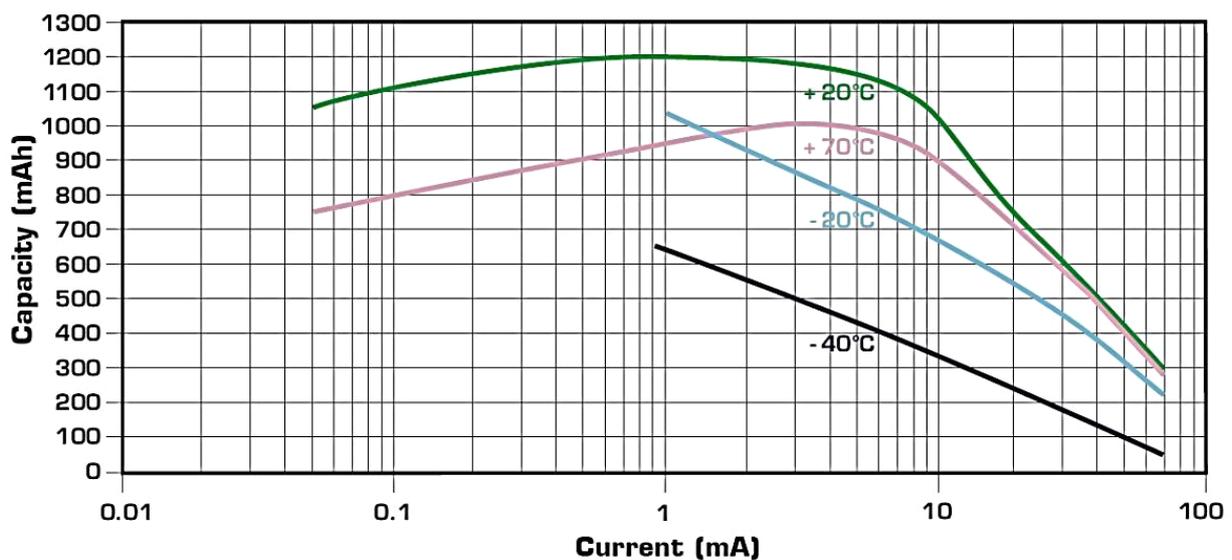


Рис. 9. Графики зависимости емкости батареи от температуры окружающей среды и тока нагрузки (батарея Saft; тип LS 142500; 1,2 А·ч)

Однако выражение (2) позволяет вычислить только теоретически возможный максимум  $T_{\text{акк.}}$ , достижимый в идеальных условиях эксплуатации. На практике же значительное влияние на  $C_{\text{акк.}}$  оказывает температура окружающей среды. В качестве примера приведем графики зависимости емкости (capacity) литиевых батарей от температуры окружающей среды и тока нагрузки (current), см. рис. 8, 9 [22].

Из графиков видно, что с понижением температуры наблюдается значительное снижение емкости источника питания. Например, при температуре  $-40^\circ\text{C}$  и токе нагрузки 10 мА потенциальная емкость батареи снижается с 17 А·ч до 10 А·ч (рис. 8), что нужно учитывать при расчете  $T_{\text{акк.}}$ .

#### 4. Влияние ошибок, возникающих в канале связи, на функционирование СКЦП

Ошибки, возникающие в канале связи при передаче данных, оказывают влияние на  $T_{\text{акк.}}$  [23]. При этом  $T_{\text{акк.}}$  снижается из-за необходимости повторных передач, уменьшающих ожидаемое количество безошибочных передач (2). Ошибки могут возникать из-за шумов, искажений и замираний сигнала, явления интерференции и т. д.

Количество ошибок, которые появляются на приемном конце при передаче данных, принято характеризовать коэффициентом битовых ошибок — BER (bit error ratio). Это безразмерная величина, указывающая на число битов из общего количества информации, которые исказятся при передаче:

$$\text{BER} = \frac{n_{\text{ошиб.}}}{n_{\text{общ.}}}, \quad (3)$$

где  $n_{\text{ошиб.}}$  — количество ошибочно принятых битов;  $n_{\text{общ.}}$  — общее количество переданных битов.

Предполагается, что информационный обмен осуществляется в режиме неполного декодирования (обнаружение ошибок без исправления), а вероятность трансформации информационной посылки на несколько порядков меньше вероятности появления отказа от декодирования (зависит от выбранного способа кодирования), что позволяет пренебречь ею в расчетах.

Условимся, что критерием необходимости повторной передачи является искажение хотя бы одного бита в принятом ЛКА от ВКА пакете данных. Тогда целесообразен переход от понятия «искаженный бит» к понятию «искаженный пакет» — PER (packet error ratio). Аналогично BER эта величина указывает на количество пакетов из общего числа пакетов, которые исказятся при передаче. При условии, что битовые ошибки не зависят друг от друга, PER определяется как [24]:

$$\text{PER} = 1 - (1 - \text{BER})^N = 1 - e^{N \log(1 - \text{BER})}, \quad (4)$$

где  $N$  — длина пакета, бит.

Введем в (2) коэффициент PER и получим выражение, позволяющее учесть влияние ошибок, возникающих в канале связи, на  $T_{акк.}$ :

$$T_{акк.} = \left( \frac{C_{акк.}}{I_{цел.}} - \frac{C_{акк.}}{I_{цел.}} \cdot PER \right) \cdot T_{цел.}, \quad (5)$$

где  $\left( \frac{C_{акк.}}{I_{цел.}} \cdot PER \right)$  — ожидаемое количество ошибочных передач.

На основе полученных моделей (1), (5) и исходных данных (табл. 4, 5) получим графики зависимости  $T_{акк.} = f(T_{цел.})$  для различных значений PER (рис. 10).

**Таблица 4.** Первичные исходные данные для построения графика зависимости  $T_{акк.} = f(T_{цел.})$

$T_{цел.}$ , МИН.	$T_{акт.}$ , МИН.	$\Sigma I_{акт.}$ , МА	$T_{сна.}$ , МИН.	$I_{сна.}$ , МА/МИН.	$\Sigma I_{сна.}$ , МА	$I_{цел.}$ , МА	$C_{акк.}$ , МА·Ч	PER
1	0,05	0,3	0,95	0,05	0,048	0,348	5000	$1 \cdot 10^{-1},$ $1 \cdot 10^{-2},$ $1 \cdot 10^{-3},$ $1 \cdot 10^{-4},$ $1 \cdot 10^{-5},$ 0
2			1,95		0,098	0,398		
3			2,95		0,148	0,448		
4			3,95		0,198	0,498		
5			4,95		0,248	0,548		
6			5,95		0,298	0,598		
7			6,95		0,348	0,648		
8			7,95		0,398	0,698		
9			8,95		0,448	0,748		
10			9,95		0,498	0,798		
11			10,95		0,548	0,848		
12			11,95		0,598	0,898		
13			12,95		0,648	0,948		
14			13,95		0,698	0,998		
15			14,95		0,748	1,048		
16			15,95		0,798	1,098		
17			16,95		0,848	1,148		
18			17,95		0,898	1,198		
19			18,95		0,948	1,248		
20			19,95		0,998	1,298		

**Таблица 5.** Итоговые исходные данные для построения графика зависимости  $T_{\text{акк.}} = f(T_{\text{цел.}})$ 

$T_{\text{цел.}}, \text{ мин.}$	$T_{\text{акк.}}, \text{ мин.}$ (PER= $=1 \cdot 10^{-1}$ )	$T_{\text{акк.}}, \text{ мин.}$ (PER= $=1 \cdot 10^{-2}$ )	$T_{\text{акк.}}, \text{ мин.}$ (PER= $=1 \cdot 10^{-3}$ )	$T_{\text{акк.}}, \text{ мин.}$ (PER= $=1 \cdot 10^{-4}$ )	$T_{\text{акк.}}, \text{ мин.}$ (PER= $=1 \cdot 10^{-5}$ )	$T_{\text{акк.}}, \text{ мин.}$ (PER=0)
1	12931	14224	14353	14366	14368	14368
2	22613	24874	25101	25123	25125	25126
3	30134	33147	33449	33479	33482	33482
4	36145	39759	40120	40157	40160	40161
5	41058	45164	45575	45616	45620	45620
6	45151	49666	50117	50162	50167	50167
7	48611	53472	53958	54007	54012	54012
8	51576	56734	57249	57301	57306	57307
9	54144	59559	60100	60154	60160	60160
10	56391	62030	62594	62650	62656	62657
11	58373	64210	64794	64852	64858	64858
12	60134	66147	66748	66808	66814	66815
13	61709	67880	68497	68559	68565	68565
14	63126	69439	70070	70133	70140	70140
15	64408	70849	71493	71558	71564	71565
16	65574	72131	72787	72852	72859	72860
17	66638	73301	73968	74034	74041	74042
18	67613	74374	75050	75118	75124	75125
19	68510	75361	76046	76114	76121	76122
20	69337	76271	76965	77034	77041	77042

Примечание: в качестве исходных данных были использованы усредненные значения потребления тока цифровым радиопередатчиком LoRaWAN [23], при этом в расчетах не учитывается влияние длины поезда на величину тока  $I_{\text{перед.}}$ .

Отметим, что на графике намеренно не показаны кривые со значениями PER= $=1 \cdot 10^{-3}$ ;  $1 \cdot 10^{-4}$ ;  $1 \cdot 10^{-5}$ , т.к. они практически полностью сливаются с кривой PER=0 и поэтому не будут различимы. Кривая PER=0 соответствует идеальным условиям, при которых в канале связи не возникают ошибки (2).

### 5. Влияние СКЦП на пропускную способность однопутных участков

При использовании бортовых СКЦП целостность поезда регулярно контролируется с заданной периодичностью  $T_{\text{цел.}}$ , после чего информация о це-

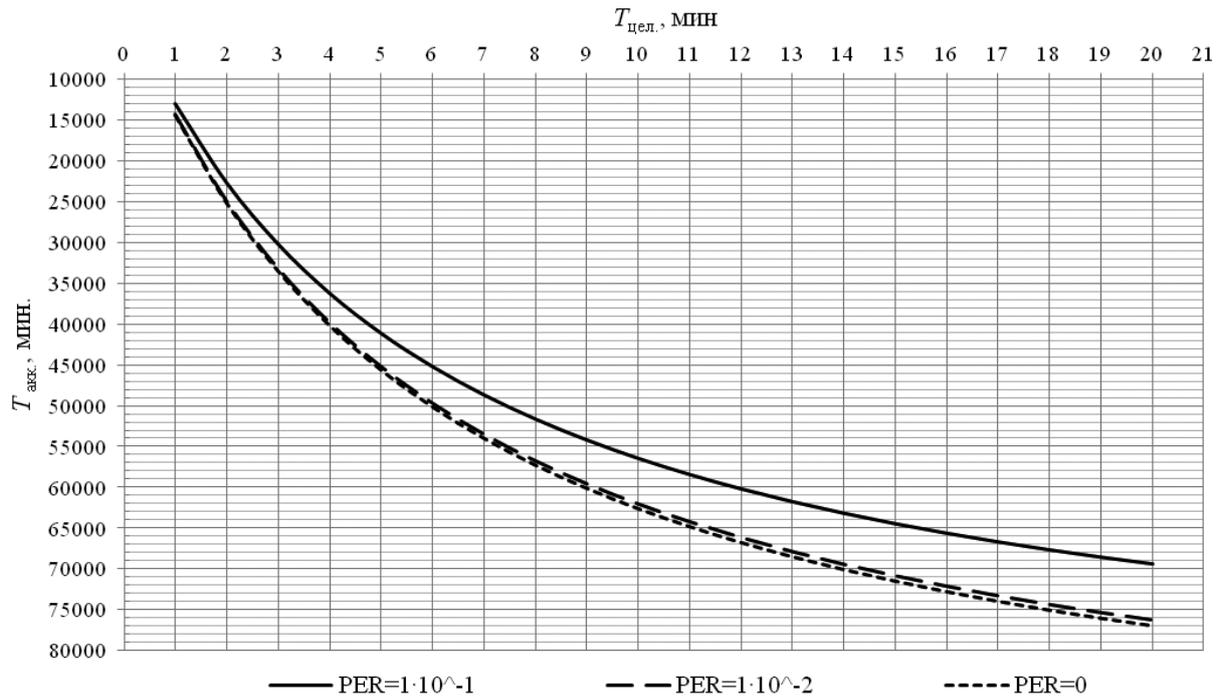


Рис. 10. График зависимости  $T_{акк.} = f(T_{цел.})$  при  $C_{акк.} = 5000$  мА·ч

лостности и местоположении поезда передается на опорную станцию за время  $T'_{перед.}$ . Там полученная информация обрабатывается за время  $T'_{обр.}$  и передается поездам, находящимся в пределах участка управления за время  $T''_{перед.}$ . Далее она обрабатывается локомотивной аппаратурой и воспринимается машинистом за время  $T''_{обр.}$ .

*Постановка задачи.* Установить, как периодичность  $T_{цел.}$  влияет на наличную пропускную способность однопутных участков  $N_n$  [ $\rightarrow N_n = f(T_{цел.})$ ] с целью определения минимально допустимой периодичности  $T_{цел.}$  для заданных размеров движения и решения обратной задачи.

Решение сводится к определению минимально допустимого межпоездного интервала  $J$ , мин. Построим схему, отражающую суть исследуемой задачи (рис. 11).

Из схемы видно, что для соблюдения условий БДП должно выполняться условие  $J > T_{цел.}$ , при этом формула расчета межпоездного интервала имеет следующий вид:

$$J = T_{цел.} + T'_{перед.} + T'_{обр.} + T''_{перед.} + T''_{обр.}. \quad (6)$$

Однако при таком способе расчета  $J$  на идущем сзади поезде будет постоянно срабатывать служебное торможение для его гарантированной остановки в расчетной стоп-точке. Чтобы движущиеся вслед поезда не снижали скорость из-за несвоевременно полученной информации о целостности идущего впереди

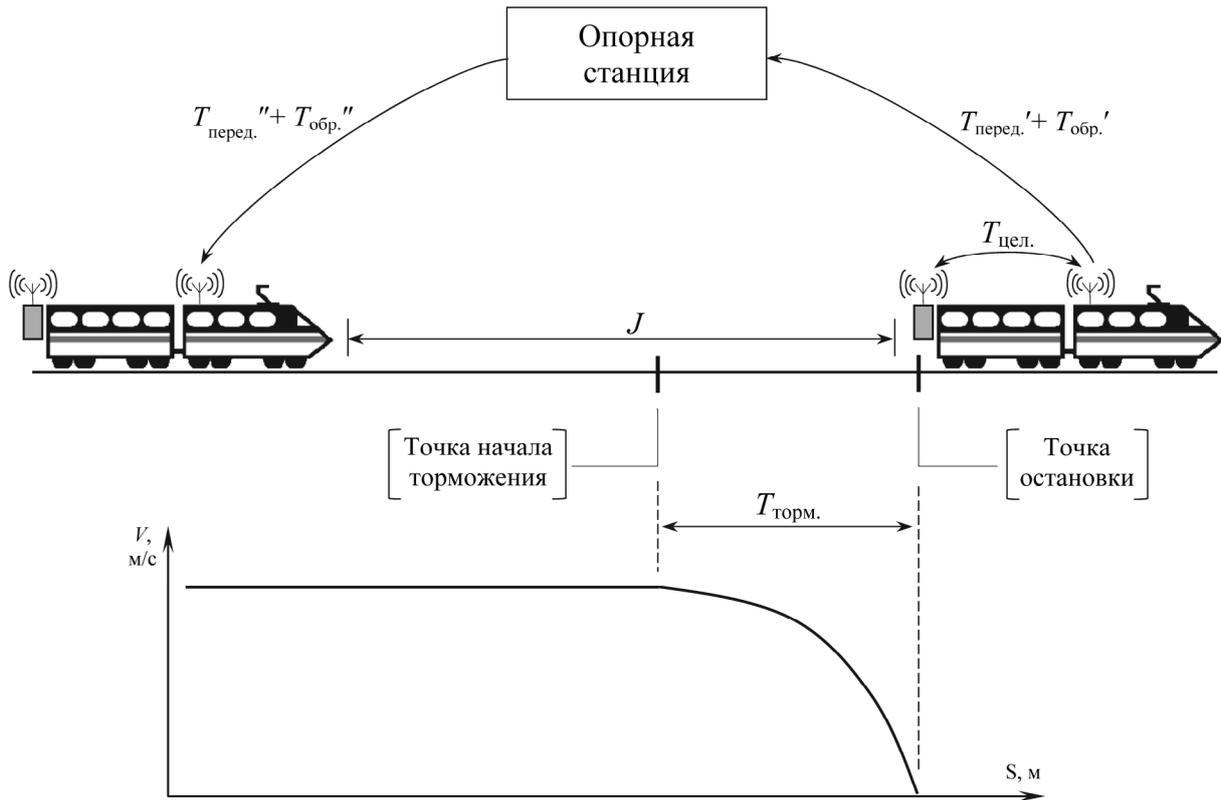


Рис. 11. Схема исследуемой задачи

поезда, в выражение (6) нужно дополнительно включить ожидаемое время, которое будет затрачено на служебное торможение идущего сзади поезда  $T_{\text{торм.}}$  см. рис. 11 [25].

Тогда выражение (6) принимает вид:

$$\begin{cases} J = T_{\text{цел.}} + T_{\text{перед.}}' + T_{\text{обр.}}' + T_{\text{перед.}}'' + T_{\text{обр.}}'' + T_{\text{торм.}} \\ T_{\text{торм.}} = \frac{V_{\text{п}}}{\alpha_{\text{торм.}}} \end{cases}, \quad (7)$$

где  $V_{\text{п}}$  — скорость сзади идущего поезда (установленная скорость движения на участке);  $\alpha_{\text{торм.}}$  — нормальное ускорение торможения сзади идущего поезда.

*Допущение 1.* Ввиду того, что сумма временных отрезков  $T_{\text{перед.}}'$ ,  $T_{\text{обр.}}'$ ,  $T_{\text{перед.}}''$ ,  $T_{\text{обр.}}''$  является незначительной, ими можно пренебречь в расчетах, что упростит выражение (7), следовательно:

$$J = T_{\text{цел.}} + T_{\text{торм.}} \quad (8)$$

Наличная пропускная способность однопутных участков ( $N_{\text{п}}$ ) рассчитывается в парах поездов с округлением результата в меньшую сторону следующим образом [26]:

$$N_H = \frac{(1440 - t_{\text{техн.}}) \cdot \alpha_H \cdot K}{T_{\text{период}}}, \quad (9)$$

где 1440 — количество минут в сутках;  $t_{\text{техн.}}$  — длительность технологических окон (для однопутных участков принимается равной 75 мин);  $\alpha_H$  — коэффициент надежности работы технических устройств (на однопутных линиях с тепловозной тягой принимается равным 0,92);  $T_{\text{период}}$  — период графика, мин;  $K$  — число пар поездов в периоде графика.

*Допущение 2.* Движение поездов с применением бортовых СКЦП фактически реализовано по принципу подвижных блок-участков, что условно соответствует пакетному графику движения (рис. 12).

Период графика при пакетном графике движения определяется как:

$$T_{\text{период}} = t_p' + t_p'' + t' + t'' + t_3' + t_3'' + \tau_A + \tau_B + (n-1) \cdot (J' + J''), \quad (10)$$

где  $t_p' + t_p''$  — суммарное время разгонов поездов;  $t' + t''$  — суммарное время хода поездов по перегону;  $t_3' + t_3''$  — суммарное время замедлений поездов;  $\tau_A, \tau_B$  — станционные интервалы ст. А и ст. Б.  $n$  — число поездов в пакете;  $J', J''$  — межпоездной интервал в пакете нечетного и четного направлений, мин; символы «'» и «''» означают четное и нечетное направления движения соответственно.

Полная формула расчета наличной пропускной способности при использовании бортовых СКЦП примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_H = \frac{(1440 - t_{\text{техн.}}) \cdot \alpha_H \cdot K}{t_p' + t_p'' + t' + t'' + t_3' + t_3'' + \tau_A + \tau_B + (n-1) \cdot (J' + J'')} \\ J' = T_{\text{цел.}}' + T_{\text{торм.}}' \\ J'' = T_{\text{цел.}}'' + T_{\text{торм.}}'' \end{array} \right. \quad (11)$$

По выражению (11) и исходным данным (табл. 6) выполним моделирование с целью получения графика зависимости  $N_H = f(T_{\text{цел.}})$ , а затем, наложив на него график зависимости  $T_{\text{акк.}} = f(T_{\text{цел.}})$  при  $PER=0$  (см. рис. 10), получим результирующий график зависимости вида  $T_{\text{цел.}} = f(T_{\text{акк.}}, N_H)$  (рис. 13).

## Заключение

Общемировые тенденции развития экономически эффективных систем управления движением поездов идут по пути совершенствования и внедрения в перевозочный процесс систем спутникового позиционирования, бортовых СКЦП и надежных систем цифровой радиосвязи.

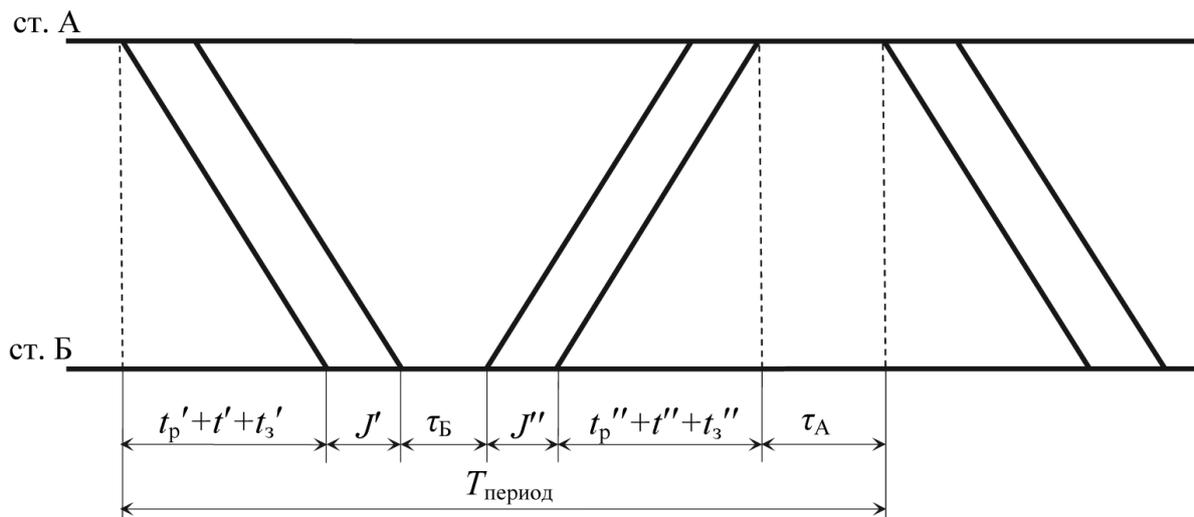


Рис. 12. Пример однопутного пакетного графика движения поездов

Таблица 6. Исходные данные для построения графика зависимости  $N_n = f(T_{цел.})$

$t_{техн.}$ МИН.	$\alpha_n$	$t_p' + t_3'$ , МИН	$t_p'' + t_3''$ , МИН	$\tau_A + \tau_B$ , МИН	$t'$ , МИН	$t''$ , МИН	$n$ , ед.	$K$ , ед.	$T_{цел.}' = T_{цел.}''$ , МИН	$T_{торм.}' = T_{торм.}''$ , МИН	$J' = J''$ , МИН	
75	0,92	3	3	5	20	20	2	2	1	2	3	
									2			4
									3			5
									4			6
									5			7
									6			8
									7			9
									8			10
									9			11
									10			12
									11			13
									12			14
									13			15
									14			16
									15			17
									16			18
									17			19
									18			20
									19			21
									20			22

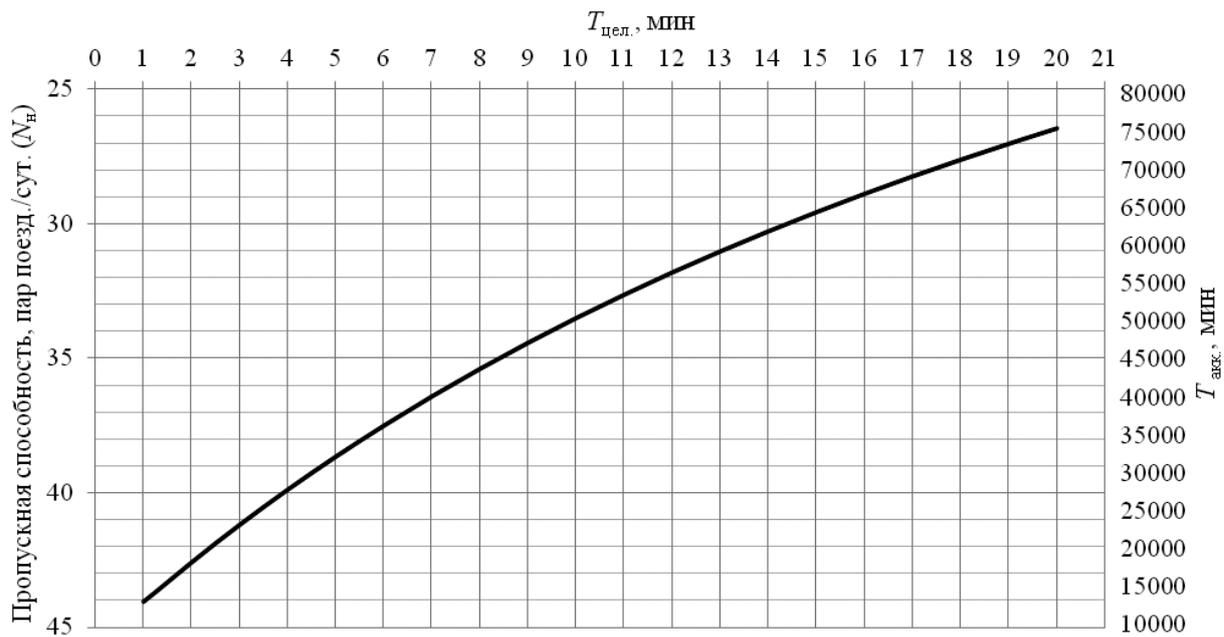


Рис. 13. График зависимости вида  $T_{\text{цел.}} = f(T_{\text{акк.}}, N_H)$  при  $C_{\text{акк.}} = 5000 \text{ МА}\cdot\text{ч}$

Проведенные теоретические исследования показали, что бортовые СКЦП имеют общий принцип построения и функционирования и обеспечивают работу систем интервального регулирования движения поездов посредством контроля целостности поездов, обращающихся на участке.

Было установлено, что при наличии аккумулятора в составе бортовых СКЦП накладываются ограничения на продолжительность работы этих устройств. Полученные зависимости позволяют определить наличную пропускную способность с учетом продолжительности работы бортовой СКЦП на одном заряде. Установлено, что условия эксплуатации и ошибки, возникающие в канале связи, влияют на продолжительность работы бортовой СКЦП.

Полученный график, отражающий зависимость наличной пропускной способности участков от периодичности контроля целостности поездов, позволяет оптимизировать параметры работы аккумулятора бортовой СКЦП за счет изменения периодичности контроля целостности поездов при расчете межпоездных интервалов.

### Библиографический список

1. Wang J. A train control system for low density line in China / J. Wang, M. Cheng, C. Baigen, L. Jiang // Journal of the China railway society. – 2015. – P. 46–52.
2. Материалы компаний JR East. ATACS – японская система управления движением поездов по радиоканалу // Железные дороги мира. – 2017. – № 1. – С. 56–60.

3. *Shigeto H.* Train control system for secondary lines using radio communications in specific area / H. Shigeto, F. Mitsuyoshi, F. Hiroyuki, O. Yuto // Quarterly Report of RTRI. – 2012. – Vol. 53. – № 1. – P. 1–6.
4. *Barbu G.* SATLOC – система управления движением поездов на базе спутниковой навигации для малодетальных линий / G. Barbu // Железные дороги мира. – 2014. – № 6. – С. 63–67.
5. *Graham H.* Implementation of electronic train order working on the NSW country regional network / H. Graham // AusRAIL. – 2015. – P. 1–7.
6. *Hyunjeong J.* Development of the on-board centered train control system to enhance efficiency of low-density railway line / J. Hyunjeong, K. Gonyop, B. Jonghyen, L. Kangmi, K. Yongkyu // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2012. – P. 269–276.
7. *Norris D.* Cost effective signaling for secondary lines / D. Norris, S. Axelsson // Signal+ Draht. – 1999. – P. 599–603.
8. *Geistler A.* ETCS уровня 2 с альтернативными системами радиосвязи / A. Geistler, M. Schwab // Железные дороги мира. – 2013. – № 10. – С. 57–63.
9. *Попов П. А.* Основные принципы контроля корректности бортовой системы позиционирования средствами железнодорожной автоматики / П. А. Попов, И. Н. Королев, П. Д. Мыльников // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. – № 4. – С. 355–366.
10. *Шаманов В. И.* Системы интервального регулирования движения поездов с цифровыми радиоканалами / В. И. Шаманов // Автоматика на транспорте. – 2018. – Т. 4. – № 2. – С. 223–240.
11. *Quante F.* Контроль полносоставности грузовых поездов // Железные дороги мира. – 2005. – № 2. – С. 43–48.
12. *Марюхненко В. С.* Радиолокационная система контроля целостности железнодорожного подвижного состава с активным ответом / В. С. Марюхненко, М. А. Гурулёва // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 2. – С. 158–167.
13. *Scholten H.* Sensing Train Integrity / H. Scholten, R. Westenberg, M. Schoemaker // IEEE SENSORS 2009 Conference. – 2009. – P. 669–674.
14. Report on rail user needs and requirements (outcome of the European GNSS' user consultation platform) // European-GNSS-Agency. – 2018. – 1st ed. – 80 p.
15. Train Integrity Concept and Functional Requirements Specifications // European railway agency. – 2018. – 3rd ed. – 83 p.
16. Блок хвостового вагона 034. Руководство по эксплуатации 034.00.000 РЭ. – 2012. – 18 с.
17. *Гончаров А. В.* Система управления тормозами поезда (СУТП) : Методическая разработка / А. В. Гончаров. – Кулунда : ОАО «РЖД», 2009. – 28 с.
18. Устройство мониторинга и диагностики вагона. – URL : <https://ratorm.ru/produktsiya/ustrojstvo-monitoringa-i-dagnostiki-vagona> (дата обращения : 20.01.2020).
19. *Никитин А. Б.* Принцип построения и алгоритмы функционирования бортовых систем контроля целостности поездов / А. Б. Никитин, Н. В. Шаталова, И. В. Кушпиль // «Транспорт России : проблемы и перспективы–2019» : Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – СПб. : ИПТ РАН, 2019. – 324 с.
20. Электрический аккумулятор. – URL : [https://ru.wikipedia.org/wiki/Электрический\\_аккумулятор](https://ru.wikipedia.org/wiki/Электрический_аккумулятор) (дата обращения : 20.10.2019).
21. Primary Lithium. – URL : <https://www.saftbatteries.com/products-solutions/products> (дата обращения : 20.10.2019).
22. LS, LSH, LSP. – URL : <https://www.saftbatteries.com/products-solutions/products/ls-lsh?text=&tech=80&market=&sort=newest&submit=Search> (дата обращения : 21.10.2019).

23. *Casals L.* Modeling the Energy Performance of LoRaWAN / L. Casals, B. Mir, R. Vidal, C. Gomez // *Sensors*. – 2017. – N 17, 2364. – P. 1–30.
24. Bit error rate. – URL : [https://en.wikipedia.org/wiki/Bit\\_error\\_rate](https://en.wikipedia.org/wiki/Bit_error_rate) (дата обращения : 22.10.2019).
25. *Pearson L.* Moving block railway signalling. Ph. D. thesis / L. Pearson. – England : Loughborough University of Technology, 1973. – 320 p.
26. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог. – М. : Стандартинформ, 2010. – 175 с.

**A. B. Nikitin**

**I. V. Kushpil'**

*The department of "Automation and Telematics on the Railway"*

*Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg*

## **RESULTS OF STUDYING TECHNICAL MEANS OF TRAIN INTEGRITY MONITORING**

The article describes a theoretical approach to solving the problem of train integrity monitoring by on-board means. The existing approaches and technical solutions in this area have been analyzed. Currently, no theoretical basis required for the design and operation of on-board train integrity monitoring systems exists. Topical theoretical studies have been carried out to identify general patterns and algorithms, as well as the synthesis of analytical models of the functioning of these systems. It has been established how an independent power source within the on-board train integrity monitoring system (depending on the operational features and errors occurring in the communication channel during data transmission) affects the traffic control system and the section capacity. This is represented by the obtained mathematical models and dependency graphs. The results obtained will be useful in the design and operation of on-board train integrity monitoring systems and traffic control systems governed by satellite positioning rules.

Train integrity monitoring, completeness, algorithms of functioning, the principle of operation, train traffic control, section capacity

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-411-434

### **References**

1. *Wang J., Cheng M., Baigen C. & Jiang L.* (2015) A train control system for low density line in China. *Journal of the China railway society*, pp. 46–52.
2. (2017) Materialy kompaniy JR East. ATACS – yaponskaya sistema upravleniya dvizheniyem poyezdov po radiokanalu [JR East materials. ATACS – Japanese radio train control system]. *Zheleznyye dorogi mira [Railways of the world]*, no. 1, pp. 56–60. (In Russian)
3. *Shigeto H., Mitsuyoshi F., Hiroyuki F. & Yuto O.* (2012) Train control system for secondary lines using radio communications in specific area. *Quarterly Report of RTRI*, vol. 53, no. 1, pp. 1–6.
4. *Barbu G.* (2014) SATLOC – sistema upravleniya dvizheniyem poyezdov na baze sputnikovoy navigatsii dlya malodeyatel'nykh liniy [SATLOC – Satellite-based railways traffic management system for low traffic lines]. *Zheleznyye dorogi mira [Railways of the world]*, no. 6, pp. 63–67. (In Russian)

5. *Graham H.* (2015) Implementation of electronic train order working on the NSW country regional network. *AusRAIL*, pp. 1–7.
6. *Hyunjeong J., Gonyop K., Jonghyen B., Kangmi L. & Yongkyu K.* (2012) Development of the on-board centered train control system to enhance efficiency of low-density railway line. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, pp. 269–276.
7. *Norris D. & Axelsson S.* (1999) Cost effective signaling for secondary lines. *Signal+Draht*, pp. 599–603.
8. *Geistler A. & Schwab M.* (2013) ETCS urovnya 2 s al'ternativnymi sistemami radiosvyazi [ETCS level 2 with alternative radio communication systems]. *Zheleznyye dorogi mira [Railways of the world]*, no. 10, pp. 57–63. (In Russian)
9. *Popov P.A., Korolev I.N. & Myl'nikov P.D.* (2015) Osnovnyye printsipy kontrolya korrektnosti bortovoy sistemy pozitsionirovaniya sredstvami zheleznodorozhnoy avtomatiki [Basic principles of monitoring the correctness of the on-board positioning system by railway automation means]. *Avtomatika na transporte [Automatic Equipment in Transport]*, vol. 1, no. 4, pp. 355–366. (In Russian)
10. *Shamanov V.I.* (2018) Sistemy interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poyezdov s tsifrovymi radiokanalami [Systems of train traffic interval control with digital radio channels]. *Avtomatika na transporte [Automatic Equipment in Transport]*, vol. 4, no. 2, pp. 223–240. (In Russian)
11. *Quante F.* (2005) Kontrol' polnosostavnosti gruzovykh poyezdov [Monitoring the completeness of freight trains]. *Zheleznyye dorogi mira [Railways of the world]*, no. 2, pp. 43–48. (In Russian)
12. *Maryukhnenko V.S. & Gurulyova M.A.* (2016) Radiolokatsionnaya sistema kontrolya tselostnosti zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava s aktivnym otvetom [Active response radar system for monitoring the integrity of railway rolling stock]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye [Modern technologies. System analysis. Modeling]*, no. 2, pp. 158–167. (In Russian)
13. *Scholten H., Westenberg R. & Schoemaker M.* (2009) Sensing Train Integrity. *IEEE SENSORS 2009 Conference*, pp. 669–674.
14. (2018) Report on rail user needs and requirements (outcome of the European GNSS' user consultation platform). *European-GNSS-Agency*, 1st ed., 80 p.
15. (2018) Train Integrity Concept and Functional Requirements Specifications. *European railway agency*, 3rd ed., 83 p.
16. (2012) Blok khvostovogo vagona 034 [Tail car unit 034]. Rukovodstvo po ekspluatatsii 034.00.000 PЭ [Operating manual 034.00.000RE]. (In Russian)
17. *Goncharov A.V.* (2009) Sistema upravleniya tormozami poyezda (SUTP): Metodicheskaya razrabotka [Train brake control system (TBCS): guidance paper]. *Kulunda, JSC Russian Railways Publ.*, 28 p. (In Russian)
18. *Ustroystvo monitoringa i diagnostiki vagona [Device for monitoring and diagnostics of a cargo wagon]*. URL: <https://ratorm.ru/produktsiya/ustrojstvo-monitoringa-i-diagnostiki-vagona> (accessed: January 20, 2020). (In Russian)
19. *Nikitin A.B., Shatalova N.V. & Kushpil'I.V.* (2019) Printsip postroyeniya i algoritmy funktsionirovaniya bortovykh sistem kontrolya tselostnosti poyezdov [Principle of arrangement and operation algorithms of on-board train integrity monitoring systems]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy – 2019 [Transport of Russia: problems and prospects – 2019]*: Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. Saint Petersburg, IPT RAS (Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences) Publ., 324, p. (In Russian)

20. *Elektricheskiy akkumulyator* [*Electric accumulator*]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Электрический\\_аккумулятор](https://ru.wikipedia.org/wiki/Электрический_аккумулятор) (accessed: October 20, 2019). (In Russian)
21. *Primary Lithium*. URL: <https://www.saftbatteries.com/products-solutions/products> (accessed: October 20, 2019). (In Russian)
22. *LS, LSH, LSP*. URL: <https://www.saftbatteries.com/products-solutions/products/ls-lsh?text=&tech=80&market=&sort=newest&submit=Search> (accessed: October 21, 2019).
23. *Casals L., Mir B., Vidal R. & Gomez C.* (2017) Modeling the Energy Performance of LoRaWAN. *Sensors*, no. 17, 2364, pp. 1–30.
24. *Bit error rate*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Bit\\_error\\_rate](https://en.wikipedia.org/wiki/Bit_error_rate) (accessed: October 22, 2019).
25. *Pearson L.* (1973) Moving block railway signalling. Ph. D. thesis. England, Loughborough University of Technology Publ., 320 p.
26. (2010) *Instruksiya po raschetu nalichnoy propusknoy sposobnosti zheleznykh dorog* [Guidelines for calculating the available capacity of railways]. Moscow, Standartinform Publ., 175 p. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Л. А. Барановым  
Поступила в редакцию 22.02.2020, принята к публикации 02.07.2020*

*НИКИТИН Александр Борисович* — доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

e-mail: [nikitin@crtc.spb.ru](mailto:nikitin@crtc.spb.ru)

*КУШПИЛЬ Игорь Васильевич* — аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

e-mail: [i\\_kushpil@mail.ru](mailto:i_kushpil@mail.ru)

© Никитин А. Б., Кушпиль И. В., 2020

УДК 656.25

**В. Ю. Рязанов**

*ООО «ЛокоТех-Сигнал», Москва*

## **АНАЛИЗ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ ПО ПОДТВЕРЖДЕНИЮ СООТВЕТСТВИЯ ТРЕБОВАНИЯМ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ**

Статья посвящена анализу современного состояния нормативно-правовой базы по вопросам доказательства безопасности, обеспечения качества и подтверждения соответствия микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики в ЕАЭС. Дан краткий анализ стандартов CENELEC. Произведен обзор мероприятий по обеспечению необходимого уровня безопасности микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики с точки зрения менеджмента качества процессов разработки, менеджмента безопасности и подтверждения правильности функционирования микропроцессорных систем. Проанализирована практика процедуры подтверждения соответствия требованиям стандартов автоматизированных систем управления технологическим процессом на железнодорожном транспорте в форме декларирования соответствия согласно ТР ТС 003/2011. Сделан вывод о необходимости развития нормативно-правовой базы для обеспечения регулируемого процесса анализа и оценки систем железнодорожной автоматики и телемеханики в соответствии с требованиями функциональной безопасности, а также дальнейшей разработки документов по стандартизации с целью регламентирования методов оценки функциональной безопасности.

Функциональная безопасность, подтверждение соответствия, доказательство безопасности, методы доказательства безопасности, модель жизненного цикла

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-435-465

### **Введение**

На современном этапе развития микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики вопросы доказательства безопасности, обеспечения качества и подтверждения соответствия имеют особое значение. Микроэлектронная, микропроцессорная и компьютерная техника определяет развитие средств автоматики и телемеханики с 1980-х годов [1].

Микропроцессорные автоматизированные системы управления движением на железнодорожном транспорте разрабатываются довольно интенсивно. Это подчеркивает актуальность совершенствования подходов к управлению качеством и обеспечению безопасности, а также стандартизации комплекса методов верификации подобных систем на всех этапах их жизненного цикла.

Современные требования к особо ответственным системам подразумевают использование методологии системной и программной инженерии, процессного подхода к разработке и риск-ориентированной стратегии на всех этапах производства и эксплуатации [2–8].

Важное значение имеют процедуры регламентирования и стандартизации процессов верификации и валидации, подтверждения соответствия, приемки микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) и их допуск к эксплуатации в целях дальнейшего тиражирования на сети железных дорог [8–13].

Число техногенных катастроф пропорционально общему количеству единиц используемой техники. Количество единиц транспортной техники с каждым годом возрастает, как и скорости их перемещения, неизбежно влияя на общий уровень безопасности [14]. Современные системы управления в большинстве своем реализуются на микроэлектронной и микропроцессорной основе. Специальные методы обеспечения безопасности микроэлектронных и микропроцессорных систем и методов доказательства безопасности технических средств разрабатываются с конца 1960-х — начала 70-х годов в ведущих институтах инженеров железнодорожного транспорта [1, 15].

Автор данной статьи ставил следующую задачу: проанализировать состояние нормативно-правовой базы в области доказательства безопасности, обеспечения качества и подтверждения соответствия СЖАТ, указав основные направления развития методологии оценки функциональной безопасности СЖАТ.

### **1. Мероприятия по доказательству безопасности микропроцессорных систем железнодорожной автоматики**

В соответствии с Договором о Евразийском экономическом союзе (ЕАЭС) от 29.05.2014 и Федеральным законом «О техническом регулировании» от 27.12.2002 № 184-ФЗ технические регламенты принимаются в целях защиты жизни и (или) здоровья человека, имущества, окружающей среды, жизни и (или) здоровья животных и растений. Для выполнения требований технического регламента Союза и оценки их соответствия на добровольной основе могут применяться международные, региональные (межгосударственные) стандарты, а в случае их отсутствия — национальные (государственные) стандарты [16].

В ЕАЭС действует технический регламент Таможенного союза ТР ТС 003/2011 «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» [9]. Согласно ТР ТС 003/2011, автоматизированные системы управления технологическим процессом на железнодорожном транспорте, как и программное обеспечение, подлежат обязательному подтверждению соответствия до момента выпуска в обращение.

Один из основополагающих документов из перечня стандартов, которые на добровольной основе обеспечивают соблюдение требований техническо-

го регламента ТР ТС 003/2011, — ГОСТ 33477 «Система разработки и постановки продукции на производство. Технические средства железнодорожной инфраструктуры. Порядок разработки, постановки на производство и допуска к применению». Данный стандарт [13] описывает основные стадии разработки, постановки на производство, подконтрольной эксплуатации и допуска к применению. Диаграмма процесса разработки представлена на рисунке 1.

В соответствии с [13], для продукции, обеспечивающей безопасное управление технологических процессов, необходимо провести испытания и подготовить документы программы обеспечения безопасности и доказательства безопасности в соответствии с ГОСТ 33432.

В межгосударственных стандартах и европейских нормах содержатся следующие методы доказательства безопасности СЖАТ [11, 17–20]:

- экспертно-расчетные (на основе экспертизы технической и конструкторской документации);
- испытания имитационных моделей программно-аппаратных средств;
- стендовые испытания;
- оценка безопасности по статистическим данным об отказах в процессе эксплуатации;
- испытания систем в условиях эксплуатации.

Одними из основных методов исследования безопасности сложных технических систем являются методы имитационных испытаний моделей аппаратных и программных средств (имитационное моделирование).

Данные методы позволяют: обеспечить быстрое получение результатов; создать во время испытаний множество возможных технологических ситуаций; имитировать большое число отказов и сбоев аппаратных и программных средств; собрать статистические данные по влиянию сбоев на безопасность; откорректировать перечни опасных отказов.

Наиболее сложной проблемой при проведении имитационных испытаний является разработка и доказательство адекватности моделей микроэлектронных и микропроцессорных систем [11, 19]. Для решения этого сложного вопроса были разработаны методы имитационного моделирования сложных микропроцессорных систем с использованием прикладного математического пакета MATLAB. Наряду с этим, в научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и ЭМС» Белорусского государственного университета транспорта разработаны методы построения моделей микроэлектронных, микропроцессорных систем и устройств, а также имитационный комплекс для проведения испытаний микроэлектронных и микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) на безопасность [15]. Применение этих разработок позволяет создавать имитационные модели сложных систем, использовать единый алгоритм оценки микроэлектронных и микропроцессорных СЖАТ любого уровня сложности учитывая сбои, приводящие к опасным отка-

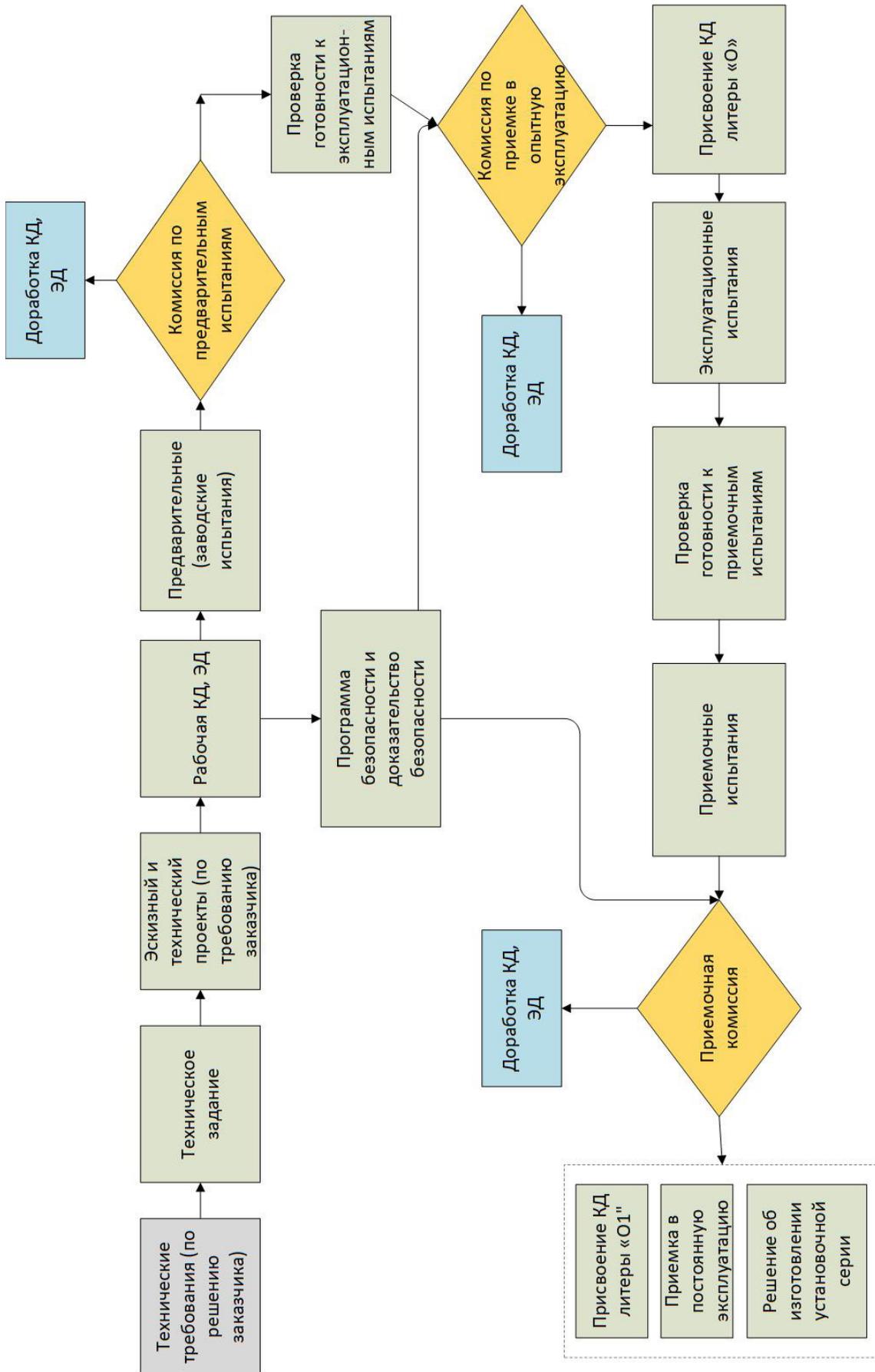


Рис. 1. Диаграмма процесса разработки технических средств железнодорожной инфраструктуры

зам, а также проверять условия отсутствия опасных отказов в устройствах СЖАТ не только для одиночных, но и для кратных отказов и сбоев.

Для преодоления проблемы малых вероятностей при реальных испытаниях СЖАТ предлагается путь, основанный на разработке и применении ускоренных натуральных испытаний. Ускоренные натурные испытания проводятся с использованием методов понижения дисперсии и, в частности, метода существенной (значимой) выборки. Данный метод заключается в искусственном повышении вероятностей ошибок и сбоев путем их генерации и последующим перерасчетом получаемых результатов для учета реальных процессов эксплуатации. Комплексное применение ускоренных натуральных испытаний и имитационного моделирования позволяет получать достоверные оценки в случаях, когда при проведении стендовых и эксплуатационных испытаниях нет необходимого количества времени для анализа, сбора и подтверждения статистических оценок показателей безопасности системы требуемой точности.

Таким образом, для объективного принятия решения о соответствии требуемому уровню безопасности необходимо применять комплексный подход к доказательству безопасности систем используя всю имеющуюся информацию (результаты расчетов, экспертные методы, ускоренные испытания, моделирование, стендовые испытания, имеющиеся аналоги эксплуатации подобных систем и т. д.). Обоснованные правила объединения информации базируются на методах теории квалиметрии.

Вопросы повышения безопасности движения решаются комплексно и сводятся к следующим действиям [21]:

- разработке и уточнению стандартов, инструкций и требований по безопасности движения поездов;
- координации работ по безопасности СЖАТ на всех этапах проектирования, изготовления, испытаний и эксплуатации СЖАТ;
- выработке организационных мероприятий, рекомендаций и проектно-технологических решений по обеспечению безопасности СЖАТ в конкретных проектах;
- контролю выполнения мероприятий и рекомендаций, а также соответствия характеристик проекта требованиям безопасности;
- оперативному обеспечению безопасности СЖАТ в процессе эксплуатации железнодорожного транспорта;
- обобщению опыта и организации конференций, семинаров и совещаний по безопасности движения поездов.

Основными требованиями к системе стандартов является получение нормативного базиса и критериев подтверждения соответствия и оценки функциональной безопасности аппаратуры СЖАТ. Стандарты должны обеспечить эффективность организационных, конструкторских, технологических и эксплуатационных мероприятий, направленных на достижение оптимального

уровня безопасности СЖАТ, а также объективность и сопоставимость результатов контроля и испытаний на безопасность.

Согласно текущей нормативной базе ГОСТ 33432 и EN 50129, доказательство безопасности в целом состоит из трех основных частей [5, 18]:

- отчет о мерах по управлению качеством;
- отчет о мерах по управлению функциональной безопасностью;
- отчет о состоянии функциональной безопасности.

Цель системы менеджмента качества — уменьшение числа человеческих ошибок на каждом этапе жизненного цикла.

Вопросы управления качеством СЖАТ непосредственно относятся к вопросам мониторинга и повышения эффективности процессов организационного обеспечения проектов разработки и процессов технического управления.

Основными нормативными требованиями являются ISO 9001–2015. В части разработки программных продуктов следует принять во внимание ГОСТ Р ИСО/МЭК 90003–2014. Стандартами, описывающими процессы системной и программной инженерии, считаются ГОСТ Р 57193–2016 «Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем» и ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207–2010 «Информационная технология (ИТ). Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла программных средств». Для реализации обеспечивающей системы организация-разработчик должна выбрать соответствующие процессы из ГОСТ Р 57193–2016 и ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207–2010 и адаптировать их под нужды организации в качестве стандартов организации в соответствии с ГОСТ Р 1.4–2004. Допускается подготовка плана обеспечения качества в рамках разработки конкретной целевой системы с адаптацией процессов под конкретные нужды проекта в соответствии с ГОСТ Р ИСО 10005.

Второе условие приемки безопасности — обеспечение управляемости разработки системы посредством системы менеджмента безопасности, например, согласующейся с методологией RAMS в соответствии с EN 50126. Цель данного процесса — дальнейшее снижение вероятных ошибок, приводящих к нарушению безопасности и являющихся следствиями действий человека, а также ошибок в работе самой системы.

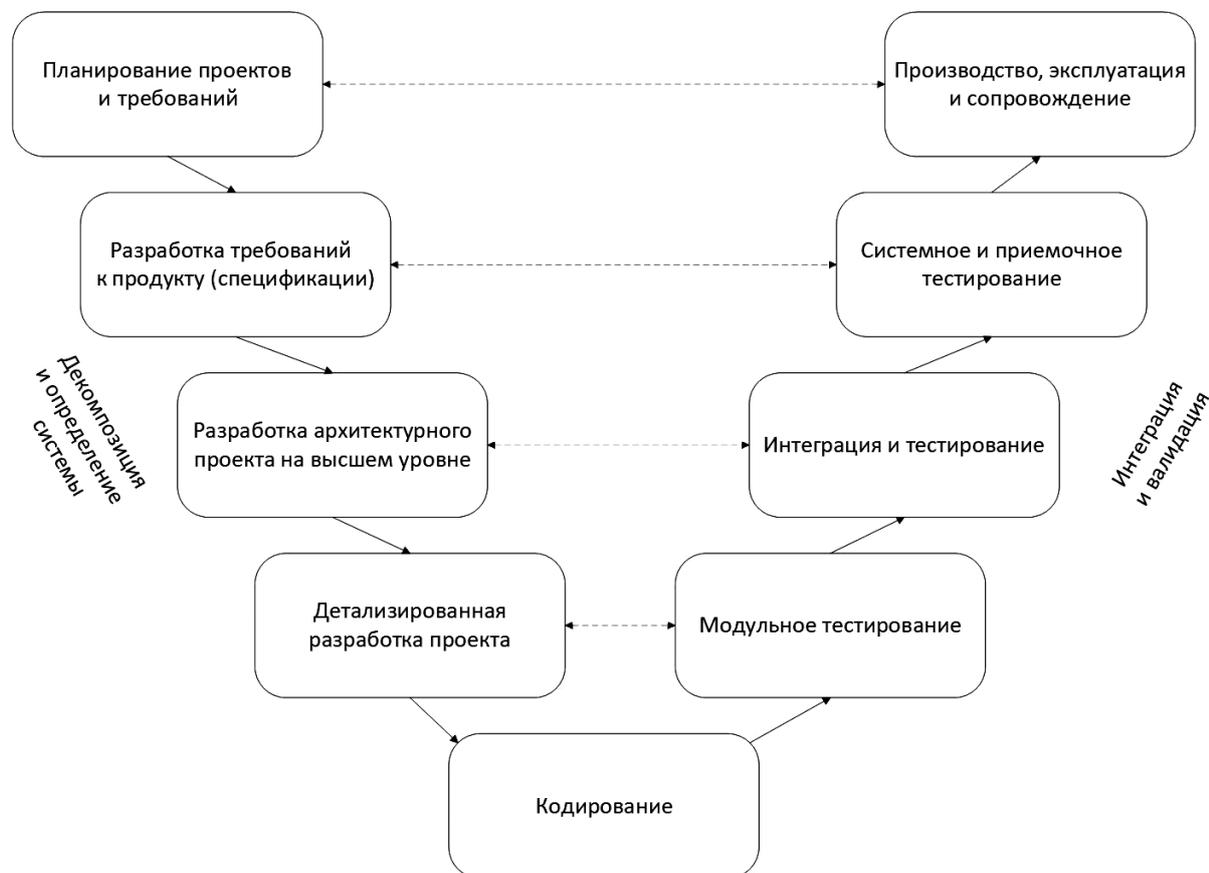
Меры по управлению функциональной безопасностью включают в себя организацию проекта с соответствующим распределением ролей и обеспечения их независимости, планирование необходимых мероприятий по определению требований безопасности, анализу и экспертизе безопасности, пересмотру аспектов безопасности в ходе разработки СЖАТ, ведения журнала опасностей, планирования мероприятий по верификации и валидации требований безопасности.

Следует заметить, что европейские и отечественные стандарты предписывают осуществлять разработку СЖАТ в соответствии с V-образной моделью жизненного цикла. V-образная модель была создана как разновидность ка-

складной модели с обеспечением планирования мероприятий по верификации и тестированию на ранних этапах разработки. V-образная модель применяется как на уровне системы, так и на уровне программного обеспечения. Таким образом, план и спецификация приемочного тестирования осуществляется на этапе разработки требований к системе, а планы интеграционного и модульного тестирования — на этапах разработки проекта и т. д. [22]. На рисунке 2 показана V-образная модель жизненного цикла программного обеспечения.

Следует заметить, что как в области управления качеством (ISO 9001), так и менеджмента безопасности, обязательным требованием является применение риск-ориентированного подхода. Так, например, оценка рисков и анализ угроз является необходимыми мероприятиями для определения требуемого уровня полноты безопасности (УПБ) [6, 18, 23]. В отечественной нормативной базе данный подход нашел свое отражение в системе управления ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла (УРРАН) [24–27].

Третьим условием является подтверждение правильности функционирования микропроцессорных систем и техническое доказательство соответствия данных систем требованиям безопасности в условиях их применения.



**Рис. 2.** V-образная модель жизненного цикла программного обеспечения

В отличие от релейных СЖАТ проблема безотказности и безопасности комплексно может быть решена не за счет применения более надежных элементов, а путем резервирования и контроля [28–36].

При неоспоримых преимуществах микропроцессорных систем, таких как широкие функциональные возможности, самодиагностика и лучшие показатели надежности, в процессе разработки должен быть учтен ряд особенностей:

1) Симметричность отказов. У элементов с симметричными отказами вероятность возникновения отказов вида  $0 \rightarrow 1$  и  $1 \rightarrow 0$  примерно равны (т. е. имеют один порядок). К данным элементам относится большинство используемых в микроэлектронной и микропроцессорной технике;

2) Особенности доказательства корректности реализации функций на программном уровне. Известно [37–40], что зачастую невозможно обнаружить все ошибки в программном коде методом перебора. К тому же это весьма трудоёмкая задача. Требуется разработка стратегии верификации и валидации технологических и системных функций, а также функций безопасности на уровне программного обеспечения. Выполнение соответствующих мероприятий становится одной из ключевых задач при разработке безопасных микропроцессорных систем;

3) Разнообразие микроэлектронной и программируемой техники;

4) Высокая чувствительность микроэлектронной элементной базы к влияниям внешней среды;

5) Многообразие интерфейсов, определяющих взаимодействие подсистем и систем между собой и с эксплуатационно-техническим персоналом;

6) Повышение плотности монтажа и снижение питающих напряжений интегральных схем, а также снижение пороговых значений логического «0» и «1», что в свою очередь приводит к росту влияния внутренних помех на работу микроэлектронных устройств.

Появление сложных микропроцессорных систем привело к выделению нового класса отказов — маскируемых. Отказы технических средств, которые не приводят к нарушению функционирования системы, называются маскируемыми и могут быть диагностируемыми и недиагностируемыми. Недиагностируемые отказы способны приводить к накоплению ошибок в системе и, как следствие, к нарушению функционирования системы и возможности их опасного влияния на работу системы.

При построении безопасных систем управления следует обеспечивать безотказность (reliability), отказоустойчивость (fault-tolerance) и их безопасное поведение при отказах (fail-safe) [35, 41].

Первые две стратегии подразумевают, что система, которая правильно выполняет свой алгоритм функционирования, безопасна. Они используются в различных отраслях техники, т. е. не являются специфическими. В железнодорожной автоматике они позволяют уменьшить вероятность опасного воздействия системы на объект управления.

Третья стратегия используется специально для построения безопасных систем и заключается в переводе системы в необратимое защитное состояние при появлении отказа. Обратный переход в работоспособное состояние исключается (маловероятен) и производится искусственным путем (обычно с участием человека).

Выполнение требований защищенности от опасных отказов или безопасности (fail-safe) может быть обеспечено тремя различными способами.

1) Комбинационная безопасность (composite fail-safety). Каждая ответственная операция должна выполняться не менее чем двумя техническими компонентами системы. При возникновении опасного отказа в одном из элементов он должен быть обнаружен и устранён до того, пока может возникнуть опасный отказ во втором элементе.

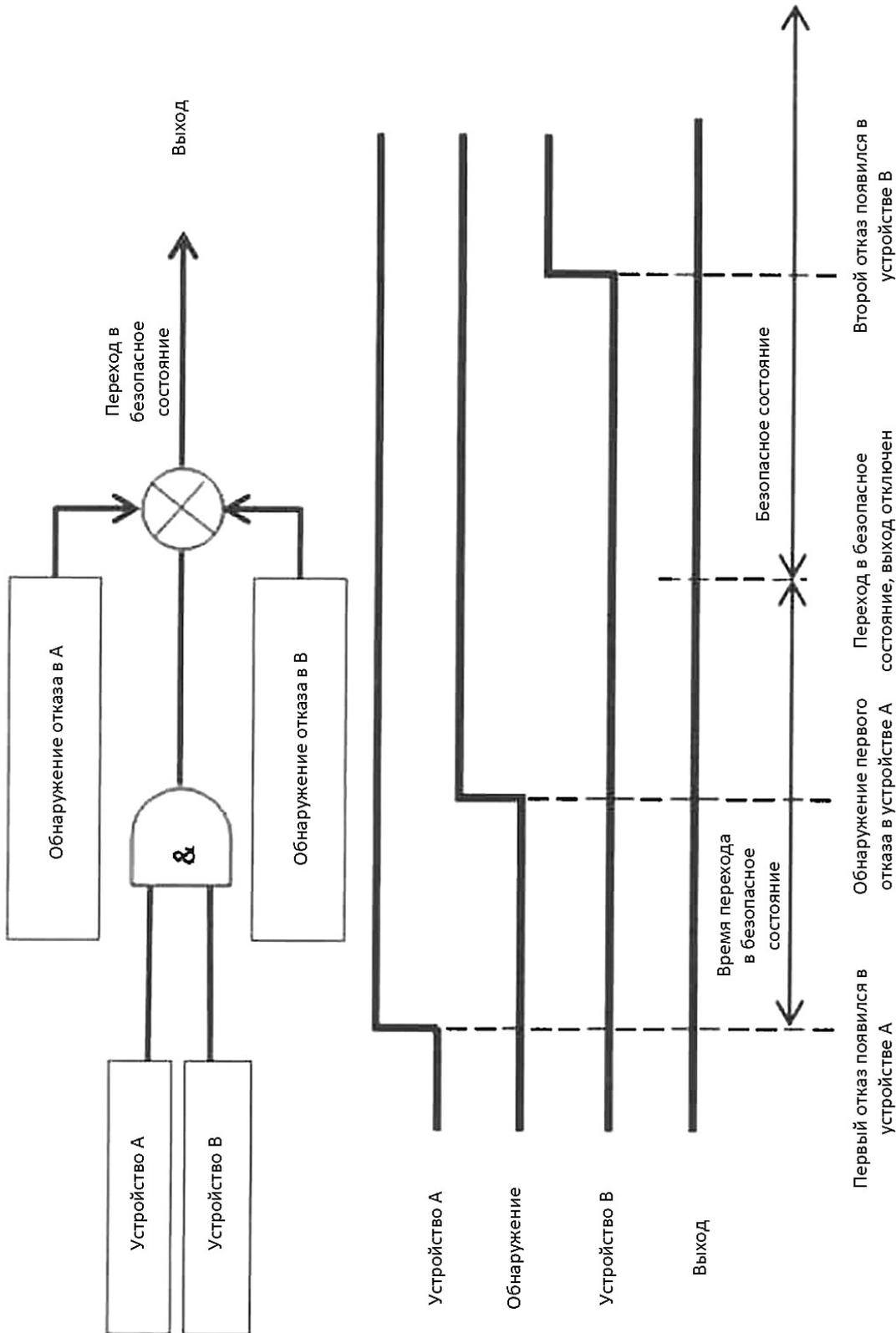
2) Возвратная безопасность (reactive fail-safety). Функция безопасности реализуется одним элементом, но с постоянной проверкой на отсутствие опасного отказа путем непрерывного вычисления, тестирования или другим путем. Во избежание отказов по общей причине функция проверки и тестирования может выполняться вторым независимым устройством.

3) Собственная безопасность (inherent fail-safety). Функция безопасности обеспечивается за счет одного элемента, который заведомо обладает свойством безопасности (например, реле первого класса надежности).

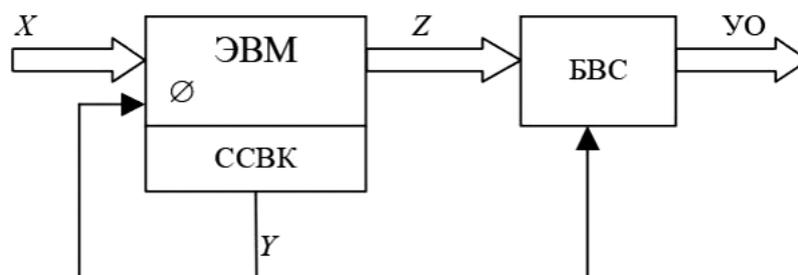
Наиболее широко распространенная концепция безопасности микроэлектронных СЖАТ требует, чтобы одиночные дефекты аппаратных и программных средств не приводили к опасным отказам и обнаруживались с заданной вероятностью на рабочих или тестовых воздействиях не позднее, чем в системе возникнет второй дефект [28, 30]. Проблема осложняется, если не все одиночные дефекты обнаруживаются. Тогда новый отказ может привести к нарушению безопасности. Поэтому необходимо предъявлять высокие требования к достоверности результатов диагностирования.

Обнаружение отказа должно происходить в течение заданного интервала времени (рис. 3). Эту задачу решают внутрипроцессорный и межпроцессорный контроль. Наиболее эффективно внутрипроцессорный контроль осуществляется путем тестирования в отведенные для этого промежутки времени или путем применения принципов самоконтроля (самопроверяемости) и сигнатурного анализа. Межпроцессорный контроль состоит во взаимной проверке работы процессоров на уровне системных шин, памяти и выходов (контроль с сильными связями). При контроле с умеренными связями производится проверка выходов. Применяется также вариант, когда один процессор реализует вычисления, а другой их проверяет (контроль со слабыми связями).

На рисунке 4 представлена одноканальная система, реализованная с помощью самопроверяемых схем встроенного контроля (ССВК) и безопасной выходной схемы (БВС). При возникновении отказа ССВК формирует сигнал  $Y$  для перевода системы в защитное состояние. Безопасность данной схемы зависит от эффективности способа самопроверки.

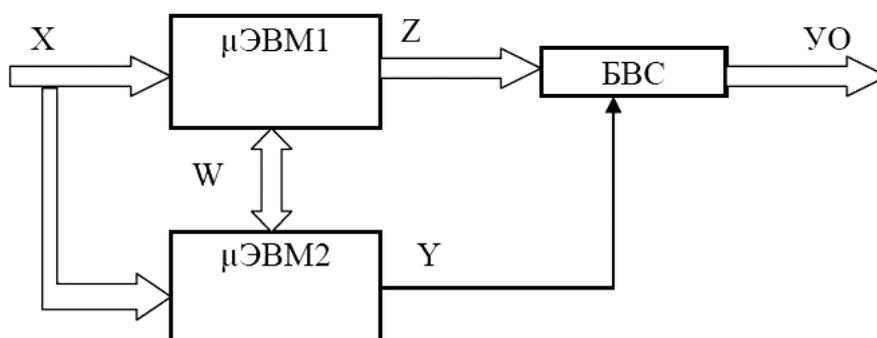


**Рис. 3.** Обнаружение отказа и переход в защитное состояние в двухканальной системе



**Рис. 4.** Обнаружение одиночных отказов в одноканальной системе с одной программой

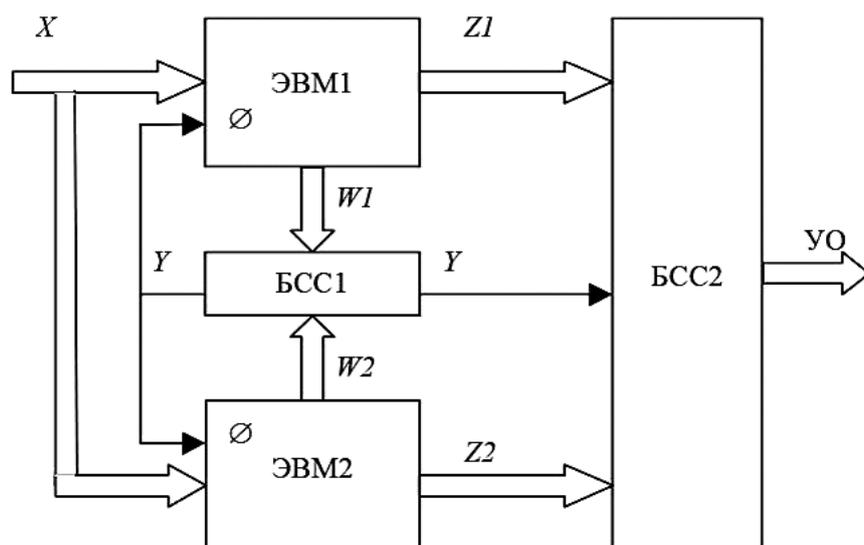
При реализации дублированной системы со слабыми связями (рис. 5) первый процессор (обозначен через  $\mu$ ЭВМ1 — микроЭВМ) реализует функцию безопасности, а второй ( $\mu$ ЭВМ2) осуществляет проверку, обмен информации осуществляется по шине W. Контроль работы микроЭВМ осуществляется за счет тестовых программ либо за счет параллельных вычислений и сравнения результатов.



**Рис. 5.** Обнаружение одиночных отказов в дублированной системе со слабыми связями

В отличие от дублированной системы, описанной выше, в дублированной системе с сильными связями (рис. 6) контроль работы осуществляется как на уровне выходов, так и на уровне шин и памяти. В данной системе производится потактовая проверка совпадения сигналов W1 и W2 на внутренних контрольных точках (шинах) с помощью безопасной схемы сравнения БСС 1. При расхождении сигналов W1 и W2 БСС1 формирует сигнал ошибки Y. Сигнал воздействует на БСС2 и отключает управляемое оборудование (УО).

На основании реализованной концепции безопасности СЖАТ в отчете о состоянии функциональной безопасности должно быть подтверждено, что функциональное поведение системы является безопасным в предполагаемых условиях применения в соответствии с заданными требованиями. Помимо прочего в от-



**Рис. 6.** Обнаружение одиночных отказов в дублированной системе с сильными связями

чете должен содержаться анализ влияния одиночных и множественных отказов, а также анализ защиты от систематических отказов и отказов по общей причине [42]. В отчете о состоянии функциональной безопасности должны быть приведены результаты испытаний СЖАТ, в том числе результаты функционирования при внешних воздействиях. Дополнительно в отчете должны быть определены правила, условия и ограничения, которые должны быть учтены в процессе применения СЖАТ.

Следует дополнить, что, помимо прочего, эргономический аспект является так же существенным с точки зрения безопасности и обязательно должен приниматься во внимание при выполнении мероприятий по оценке и доказательству безопасности. Он затрагивает вопросы, связанных с разработкой, например, требования к распределению функций между оперативным персоналом, осуществляющим технологическую и техническую эксплуатацию СЖАТ, а также методологию оптимального согласования характеристик человека и техники.

Подводя итоги обзору мероприятий по доказательству безопасности СЖАТ нельзя не учесть экономический аспект, учитывающий взаимосвязь безопасности СЖАТ, затрат на их разработку, внедрение, а также поддержание в эксплуатации. Любая работа по повышению безопасности и снижения степени риска СЖАТ требуют дополнительных материальных затрат и усилий специалистов различного профиля. Доведение степени риска технических систем до нуля по экономическим соображениям практически нереализуемо.

Таким образом между степенью допустимого риска (уровнем безопасности) и экономическими затратами должен существовать компромисс, т. е. должно проводиться технико-экономическое обоснование разработки микропроцессорных систем.

## 2. Нормативно-правовая база в области технического регулирования микропроцессорных систем железнодорожной автоматики

Проанализируем применяемую нормативно-правовую базу технического регулирования микропроцессорных СЖАТ.

Подтверждение соответствия автоматизированных систем управления движением железнодорожным транспортом осуществляется в форме декларации соответствия согласно требованиям ТР ТС 003/2011 «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта».

В перечне стандартов, обеспечивающих на добровольной основе соблюдение требований технического регламента Таможенного союза «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» (в ред. от 6 марта 2015 г. решением коллегии ЕЭК от 3 февраля 2015 г.), для автоматизированных систем управления движением применяются требования ГОСТ 34012, ГОСТ 33892–2016, ГОСТ 33893–2016, ГОСТ 33894–2016, ГОСТ 33895–2016, ГОСТ 338986–2016, ГОСТ 33436.4-1–2015. В данном перечне отсутствуют стандарты для декларирования соответствия программного обеспечения.

В аналогичном списке стандартов для ТР ТС 001/2011 «О безопасности железнодорожного подвижного состава» присутствуют следующие стандарты для подтверждения соответствия программного обеспечения: ГОСТ Р МЭК 61508-3–2012 (с 1 июля действует ГОСТ IEC 61508-3–2018), ГОСТ Р 51904–2002, СТ РК МЭК 62279–2007, СТБ IEC 62279–2011, ГОСТ ИСО/МЭК 9126–2001, ГОСТ Р 50739–95, ГОСТ Р 52980–2008. Дополнительно применяется ГОСТ Р 51188–98.

Среди поддерживающих стандартов для ТР ТС 003/2011 отсутствует ГОСТ Р МЭК 62279–2016, выпущенный позднее. Учитывая практику применения IEC 62279 и EN 50128, следует разработать аналогичный межгосударственный стандарт с использованием опыта реализации IEC 62279 (EN 50128), а также с исправлением неточностей перевода, сделанных при подготовке национального стандарта.

Необходимо дополнить перечень требованиями ГОСТ Р МЭК 62280–2017 «Железные дороги. Системы связи, сигнализации и обработки данных. Требования к обеспечению безопасной передачи информации» (разработан на основе IEC 62280 и EN 50159).

В Евросоюзе применяются стандарты требований CENELEC: EN 50126–2017, EN 50128:2011, EN 50129:2018, EN 50159, EN 50121-4 и др.

Стандарты EN 50126, EN 50129 не переведены на русский и не приняты в качестве национальных или межгосударственных стандартов на территории РФ. Однако на основании некоторых положений EN 50126, EN 50129 и ранее действовавшей отраслевой базы был подготовлен ГОСТ 33432, который копирует требования к подготовке программы обеспечения и доказательства безопасности. Частично учтены положения EN 50126 в отношении методологии RAMS

в стандартах системы УРРАН, а также общие положения в части управления рисками в ГОСТ 33433.

На данный момент отсутствует цельная методология расчета и оценки рисков, анализа микроэлектронной компонентной базы, верификации программного обеспечения, анализа отказов по общей причине, в стандартах нет методов контроля и подтверждения безопасности автоматизированных систем. На рисунке 7 приведена структура стандартов в рассматриваемой предметной области.

Еще до вступления в силу технических регламентов в области железнодорожного транспорта проблемы безопасности систем автоматики и методология доказательства рассматривались ведущими отечественными госуниверситетами, испытательными центрами — ПГУПС, МИИТ, БелГУТ. Была разработана отраслевая нормативная база, представленная руководящими документами, документами ССФЖТ, отраслевыми стандартами, отдельными книгами и статьями, затрагивающими методологию испытаний, моделирования аппаратных средств, имитацию отказов микропроцессорных комплексов, а также испытаний самопроверяемого программного обеспечения [43–50].

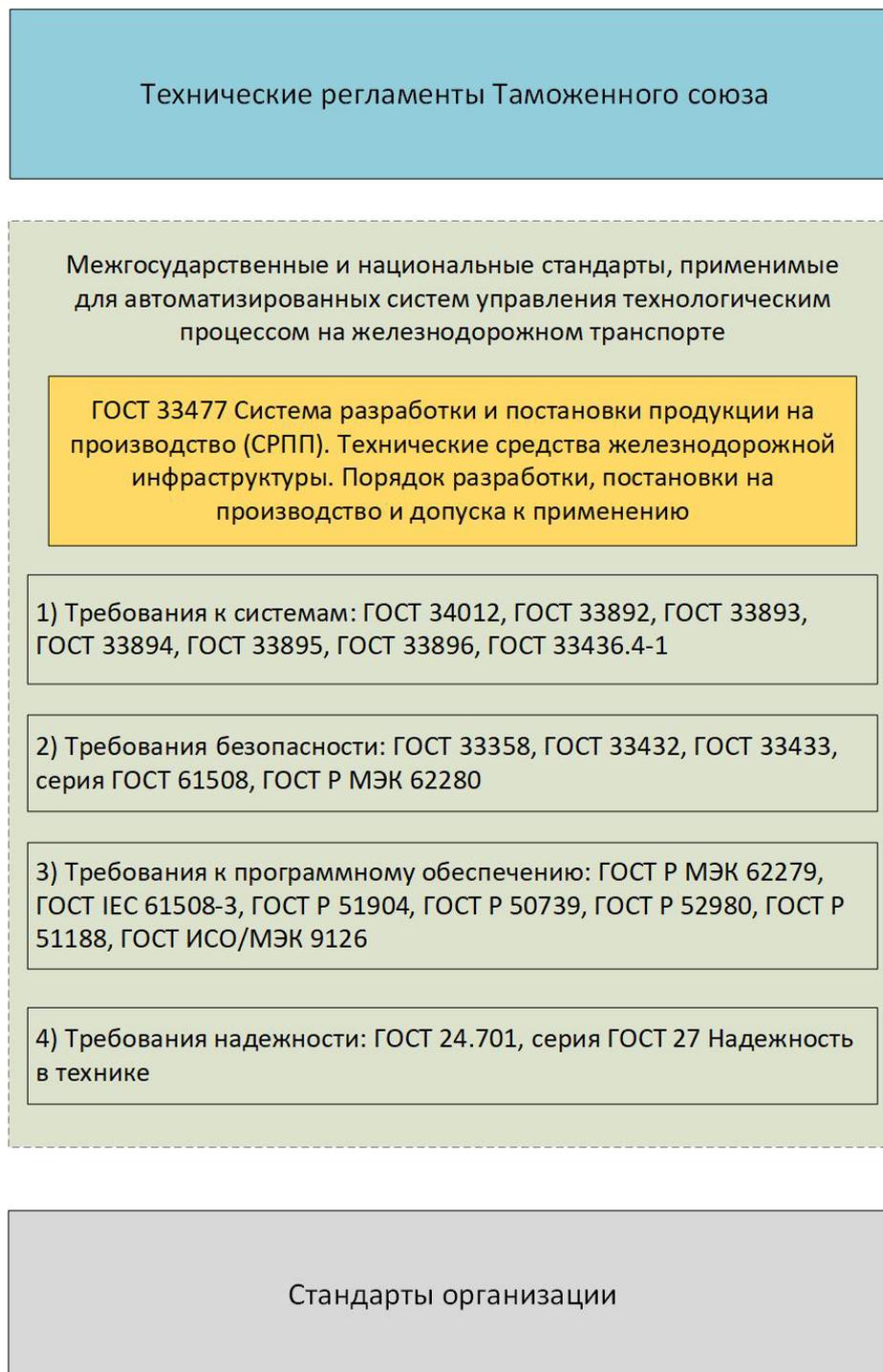
До вступления в силу технических регламентов в области железнодорожного транспорта подтверждение соответствия автоматизированных систем управления технологическим процессом на железнодорожном транспорте и программного обеспечения не носило обязательной формы, а осуществлялось, при необходимости и в форме добровольной сертификации. В этих рамках допускается разработка перечня сертификационных показателей (в т. ч. с учетом требований конструкторской и программной документации разработчика).

С вступлением в силу технических регламентов Таможенного союза отраслевые и руководящие документы прекратили действие. Разработанные взамен их российский (ГОСТ Р), а затем и межгосударственные стандарты (ГОСТ) не в полной мере заменили ранее существовавшие. Так, положения ОСТ 32.146–2000 «Аппаратура железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. Общие технические условия» содержат гораздо больше информации в части функциональной безопасности, надежности и требований к программному обеспечению, нежели ныне действующий ГОСТ 34012–2016.

ГОСТ Р МЭК 61508-3–2018 носит общий отраслевой характер, а обязательность его применения определяется непосредственно разработчиком.

В Европе независимый оценщик (ассессор) является нотифицированным органом (NoBo, DeBo) с аккредитацией на соответствие требованиям ISO/IEC 17020 «Оценка соответствия. Требования к работе различных типов органов инспекции». Экспертиза безопасности проходит в соответствии с требованиями EN 50126, EN 50128, EN 50129, EN 50159. Оцениваются:

- меры безопасности на каждом этапе жизненного цикла системы (качественно и количественно);
- процессы управления безопасностью и качеством (путем аудита);
- интенсивность опасных отказов для каждой функции.



**Рис. 7.** Структура современных стандартов в области технического регулирования микропроцессорных СЖАТ

Проводится экспертиза доказательства безопасности всего комплекта доказательной базы, включая протоколы испытаний. Экспертиза протоколов осуществляется по всем требуемым типам испытаний — от непосредственно функциональных и подтверждающих корректное поведение СЖАТ в условиях

нормальной работы и накопления внутренних и внешних отказов до испытаний на стойкость к внешним воздействиям, подтверждающих способность системы сохранять свое функциональное поведение при экстремальных воздействиях (и в некоторой степени имитирующих процесс старения отдельных деталей и узлов). На основании проведенной работы выдается отчет об оценке безопасности, и только при успешно пройденной опытной эксплуатации опытных образцов можно получить сертификат безопасности на СЖАТ.

В таблице 1 представлен общий план мероприятий по верификации и валидации программного обеспечения согласно требованиям EN 50128. Конкретные мероприятия уточняются планом обеспечения качества и планом верификации и валидации в зависимости от выбранной стратегии гарантии качества. Выбор стратегии разработки СЖАТ, мер для обеспечения безопасности, стратегии верификации и валидации — прерогатива разработчика, равно как и работа по обоснованию достаточности реализованных мер и решений.

**Таблица 1.** План мероприятий по верификации и валидации программного обеспечения

№	Мероприятие	Методика	Результат
<b>Организационные мероприятия</b>			
1	Подготовка плана обеспечения качества ПО	EN 50128/ IEEE 730	ПОК ПО
2	Подготовка плана верификации и валидации ПО	EN 50128/ IEEE 1012	План
3	Подготовка шаблонов, контрольных листов, методического сопровождения проекта	EN 50128	Шаблоны, контрольные листы
4	Верификация документа (план обеспечения качества ПО и план верификации и валидации)	EN 50128	Отчет о верификации плана
5	Верификация и валидация (обоснование выбора) инструментов разработки и тестирования ПО	EN 50128	Отчет о валидации инструментов
6	Верификация обоснования выбора стандарта кодирования	Анализ	Отчет о верификации, обновление сведений в плане обеспечения качества
<b>Этап разработки требований к ПО</b>			
7	Оценка полноты, тестируемости и корректности требований к ПО	Технический обзор	Предварительный отчет
8	Оценка прослеживаемости требований к ПО в соответствии с ТЗ или требованиями к системе	Анализ трассируемости	Матрица требований

Продолжение табл. 1

№	Мероприятие	Методика	Результат
9	Верификация предварительной редакции спецификации тестирования всего ПО	Технический обзор	Спецификация тестирования всего ПО
10	Оценка необходимости корректировки ПОК и плана верификации и валидации	Анализ	Корректировка (если необходимо)
11	Подготовка отчета о проверке требований к программному обеспечению	EN 50128	Отчет о верификации этапа разработки
<b>Этап разработки архитектуры и проектирования ПО</b>			
12	Оценка полноты, корректности и целостности архитектуры ПО	Технический обзор	Корректировка архитектуры ПО (при необходимости)
13	Оценка полноты и корректности проекта (алгоритмов) ПО	Анализ	Верифицированный проект ПО (алгоритмы)
14	Оценка соответствия разработанных документов требованиям к ПО	Анализ трассируемости	Матрица требований
15	Оценка спецификации тестирования интеграции ПО (ПО и АО)	Анализ	Предварительный отчет
16	Корректировка спецификации тестирования всего ПО (при необходимости)	Анализ	Корректировки в спецификацию тестирования
17	Подготовка отчета об архитектуре программного обеспечения и проверке проекта	EN 50128	Отчет о верификации этапа
<b>Этап модульного проектирования ПО</b>			
18	Оценка полноты и корректности проекта модуля ПО	Технический обзор	Верифицированный проект модуля ПО
19	Оценка соответствия проекта модуля ПО требованиям верхнего уровня	Анализ трассируемости	Матрица требований
20	Оценка спецификации тестирования модуля ПО	Технический обзор	Верифицированная спецификация тестирования модуля ПО
21	Анализ алгоритмов модуля ПО	Анализ	Верифицированный алгоритм
22	Подготовка отчета о проверке проекта компонента ПО	EN 50128	Отчет о верификации этапа

Продолжение табл. 1

№	Мероприятие	Методика	Результат
<b>Этап реализации ПО и модульного тестирования</b>			
23	Анализ исходного кода	Статический анализ, анализ применения стандарта кодирования, анализ дерева событий, анализ последствий ошибок ПО	Верифицированный код
24	Верификация данных	Анализ	Верифицированная структура данных, прикладных данных, эксплуатационных параметров
25	Оценка соответствия требованиям проекта модуля ПО	Анализ трассируемости	Матрица требований
26	Модульное тестирование	Функциональное тестирование («черный ящик»), структурное тестирование («белый ящик»)/ EN 50128	Отчет о тестировании
27	Оценка полноты тестовых проверок	Сквозной просмотр документации	Решение о достаточности проверок / о дополнительных проверках
28	Верификация результатов модульного тестирования	Обзор и анализ	Верифицированные результаты
29	Отчет о проверке исходного кода ПО	EN 50128	Отчет о верификации этапа
<b>Этап интеграции программного обеспечения</b>			
30	Интеграционное тестирование ПО	EN 50128	Отчет об интеграционном тестировании ПО
31	Интеграционное тестирование ПО и аппаратных средств	EN 50128	Отчет об интеграционном тестировании ПО и АО
32	Верификация результатов интеграционного тестирования	Обзор и анализ	Верифицированные результаты тестирования

Окончание табл. 1

№	Мероприятие	Методика	Результат
33	Подготовка отчета о проверке интеграции программного обеспечения	EN 50128	Отчет о верификации этапа
<b>Валидация программного обеспечения</b>			
34	Тестирование ПО (системный уровень) / квалификационное тестирование	Функциональное тестирование и тестирование временных характеристик / EN 50128	Отчет тестирования ПО системы
35	Оценка полноты тестовых проверок и верификация результатов тестирования	Сквозной просмотр документации	Решение о достаточности проверок / о дополнительных проверках
36	Подготовка отчета о валидации ПО	EN 50128	Отчет о валидации ПО

Таможенный союз не регламентирует оценку безопасности железнодорожной автоматики на нормативно-правовом уровне. В рамках приведенных стандартов и ГОСТ 33477 экспертизу доказательства безопасности принято осуществлять аккредитованным испытательным центрам. Согласно критериям аккредитации, указанным в Приказе Минэкономразвития РФ № 326, компетентность подтверждается опытом персонала в области заявленных испытаний, наличием оборудования, действующей системой менеджмента качества и т. д. При этом не проверяется наличие процедур и испытательного оборудования, компетентность сотрудников, требующей аналитического и критического мышления и соответствующих навыков. Нет однозначного понимания такого термина, как «испытания в области безопасности». Стоит ли под этим понимать испытания на требования функциональной безопасности или на внешние воздействующие факторы — климатические, механические воздействия и ЭМС, которые проводятся в рамках декларирования требованиям ТР ТС 003/2011? Отсутствует однозначная трактовка в части необходимости испытаний на функциональную безопасность и проверки доказательства безопасности для подтверждения соответствия требованиям ТР ТС 003/2011.

Основная проблема заключается в том, что испытательный центр должен быть аккредитован для оценки функциональной безопасности СЖАТ (по межгосударственному ГОСТ 33477, который не является нормативно-правовым документом), но непонятно, в соответствии с какими документами это должно происходить. Аккредитованный центр проводит испытания и выдает протоколы в области своей аккредитации. Экспертиза доказательства безопасности

осуществляется экспертным методом, и выдача экспертного заключения формально осуществляется не в рамках области аккредитации согласно законодательству отдельных стран Таможенного союза.

Сейчас принята практика доверять оценку безопасности испытательным центрам, уровень компетентности которых оценивается конечным потребителем (владельцем инфраструктуры) как приемлемый для проведения подобных работ. Необходимость доказательства безопасности не закреплена на нормативно-правовом уровне и регламентируется конечным заказчиком согласно ГОСТ 33477, поскольку на данный момент наличие декларации соответствия требованиям ТР ТС 003/2011 не подтверждает соблюдение методологии разработки безопасных СЖАТ и количественного доказательства интенсивности опасного отказа подобных систем.

Согласно ГОСТ 33477, на этапе предварительных испытаний опытного образца необходимо подготовить доказательство безопасности. Аккредитованный испытательный центр должен провести экспертизу данного доказательства безопасности [13].

Принято считать, что получение экспертизы доказательства безопасности является конечным результатом работ по выполнению требований функциональной безопасности в ЕАЭС. Процедура подготовки подобной экспертизы не регламентирована, как и список работ, необходимых для получения положительных результатов. В сложившейся ситуации испытательным центрам приходится вырабатывать собственный подход, что не позволяет однозначно сопоставить результаты различных институтов. С переходом на ГОСТ ISO/IEC 17025—2019 центры обязаны планировать и осуществлять действия по управлению рисками и возможностями в соответствии с действующими требованиями ISO 9001. Таким образом, риск-ориентированный подход и критическое мышление должны стать полноценным инструментом решения организационных и технических вопросов.

Полноценное проведение объема функциональных испытаний и испытаний на безопасность осуществляется до приемки в эксплуатацию, но не обеспечивается процедурой подтверждения соответствия, поскольку методы контроля не приведены в действующих документах по стандартизации. Это создает опасный прецедент, при котором часть ответственности перекладывается на потребителя — владельца инфраструктуры. В силу разнообразия микропроцессорной техники, критического влияния подобных систем на инфраструктуру, особых требований к уровню компетенции, а также отсутствия однозначных внутренних процедур проверки возможно сочетание неблагоприятных факторов, способных сказаться в дальнейшем на обеспечении безопасности движения в процессе эксплуатации.

При дальнейшем анализе отечественного подхода и требований стандартов CENELEC следует заметить, что расчет показателей безопасности систем осуществляется в ЕАЭС не в соответствии с функциями безопасности, а в зависимости от количества управляемых объектов. Например, для стационарных

систем электрической централизации показатели безопасности нормируются в зависимости от количества стрелок на станции ( $1 \cdot 10^{-7}$  1/ч на железнодорожную станцию для станций с числом централизованных стрелок до 22 включительно и  $1 \cdot 10^{-9}$  1/ч на централизованную стрелку для станций с числом централизованных стрелок более 22, согласно ГОСТ 33894). Показатели безопасности рассчитываются на функцию безопасности, т. е. на цепочку устройств (петлю безопасности), совместно выполняющих определенную задачу.

Не регламентирован и состав работ для аккредитованных испытательных центров. Данная работа может заключаться сугубо в экспертизе документа доказательств безопасности на соответствие содержания требованиям ГОСТ 33432, а может предполагать развернутый перечень мероприятий. Например, независимую оценку безопасности алгоритмов программного обеспечения, статический анализ исходного кода, оценку выполнения концепции безопасности, качественную оценку принятых мер безопасности, анализ одиночных отказов, анализ последовательностей отказов, оценку отказов по общей причине и т. д. Стандартизованные методики здесь также отсутствуют. Нет нормативных требований к надежности автоматизированных систем управления на национальном и межгосударственном уровнях. Согласно стандарту организации СТО РЖД 1.19.004, для автоматизированных систем управления движением предъявляются требования в средней наработке на отказ при выполнении всех функций не менее 40 000 часов. При нынешнем развитии элементной микропроцессорной базы подобный показатель фактически может быть достигнут только за счет полного резервирования всех функциональных элементов.

Для выпуска в обращение разработанной системы управления движением нужно подать в сертификационный орган заявление о регистрации декларации соответствия с комплектом конструкторской, программной и эксплуатационной документации, протоколами испытаний и иной доказательной базы. После проверки полноты комплекта документов и корректности оформления протокола испытаний принимается решение о регистрации декларации соответствия в национальной части единого реестра Таможенного союза.

При таком подходе отсутствует фактическая оценка системы менеджмента качества и безопасности, применяемой разработчиком СЖАТ, и проверка готовности изготовителя к обеспечению стабильных условий производства безопасных систем.

Автоматизированные системы являются проектно-компонентными системами, конечный состав которых определяется согласно индивидуальному проекту. Задача организации оценки безопасности и контроля качества осложняется выбором в рамках опытно-конструкторской работы такой конфигурации системы, при которой опытный образец будет представлять необходимый и полный набор функциональных и конструктивных свойств системы, при котором возможна проверка полного перечня функции системы и всех соответствующих ее состояний. При проведении дополнительного объема работ по разработке

дополнительных функций системы требуется провести регрессионное тестирование и полноценные функциональные испытания.

При осуществлении проекта под определенный объект внедрения уточняются условия эксплуатации системы, определяются эксплуатационные ограничения и соответствующие регламенты работ при выявленных отказах. Особую важность представляет собой этап анализа рисков, а также работа по планированию подтверждения проектных характеристик, требований RAMS, верификации программного обеспечения, в т. ч. основанного на данных, а также валидацию системы в рамках требований проекта.

EN 50129 выделяет следующие уровни продукта:

1) GP (general product) — базовый продукт, система рассматривается с общей точки зрения для использования в различных классах применения (например, операционные системы и базовое программное обеспечение, аппаратное обеспечение, представляющее собой базовые функции ввода-вывода, сетевой протокол на транспортном уровне сетевой модели OSI);

2) GA (general application) — базовое применение, возможно использование для определенного класса применения (например, технологическое программное обеспечение логики централизации, сетевой протокол на прикладном уровне сетевой модели OSI);

3) SA (specific application) — специальное применение, использование возможно только для конкретного применения на объекте, может включать физическую реализацию системы для единственного применения (например, файлы конфигурационных данных, представляющие собой топологию станции, свойства объектов на конкретном месте применения).

В Европейском союзе независимый оценщик проводит экспертизу доказательства безопасности проекта. Помимо экспертизы базового продукта и базового применения осуществляется экспертиза специального применения (SA) на уровне конфигурационных данных. В ЕАЭС такая практика обычно не применяется, поскольку она не отражена в техническом регламенте и соответствующих стандартах, не является обязательной. Тестирует программное обеспечение разработчик на полигоне применения.

На основании анализа нормативно-правовой базы в области технического регулирования микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и, в частности, оценки функциональной безопасности подобных систем, можно сделать вывод: обеспечению единой политики в области технического регулирования критических систем на железнодорожном транспорте на территории ЕАЭС требуется уделить дополнительное внимание.

## **Заключение**

Разработка микропроцессорных СЖАТ направлена на увеличение конкурентоспособности железнодорожного транспорта в условиях цифровой экономики.

Доказательство функциональной безопасности, управление качеством на этапах разработки и процедура подтверждения соответствия имеют ключевое значение для обеспечения железнодорожного транспорта надежными и конкурентоспособными СЖАТ.

Функциональная безопасность осуществляется за счет эффективной системы менеджмента качества процессов разработки систем управления и программного обеспечения, внедрения управления рисками и методологии RAMS в рамках менеджмента безопасности, выполнения данных требований на всех этапах жизненного цикла системы и совершенствования методов обеспечения и доказательства безопасности СЖАТ.

Был проведен анализ нормативно-правовой базы в области безопасности, обеспечения качества и подтверждения соответствия СЖАТ, определены различия в подходах, используемых в ЕАЭС и Европейском союзе. Продемонстрировано критическое отсутствие основополагающих документов, регламентирующих методологию оценки функциональной безопасности, а также состава мероприятий, необходимых для осуществления оценки безопасности СЖАТ. Поставлен вопрос о необходимости совершенствования нормативно-правовой базы в области подтверждения соответствия СЖАТ и организационной базы для оценки функциональной безопасности.

Необходимо дальнейшее развитие критического подхода в разработке и оценке СЖАТ с учетом тенденции развития современной техники. Существует потребность разработки методов оценки функциональной безопасности СЖАТ в форме межгосударственных стандартов для совершенствования технического регулирования в ЕАЭС.

### Библиографический список

1. Сапожников В. В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов, Д. В. Гавзов; под. ред. Вл. В. Сапожникова. – М.: «Транспорт», 1995. – 272 с.
2. ГОСТ 33433–2015. Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте.
3. ГОСТ Р ИСО 9001–2015. Системы менеджмента качества. Требования.
4. ISO / TS 22163:2017. Железные дороги. Система менеджмента качества. Требования к системам менеджмента бизнеса для предприятий железнодорожной отрасли: ISO 9001:2015 и частные требования, применимые в железнодорожной отрасли.
5. ГОСТ 33432–2015. Безопасность функциональная. Политика, программа обеспечения безопасности. Доказательство безопасности объектов железнодорожного транспорта.
6. СТО РЖД 1.02.033–2010. Управление ресурсами на этапах жизненного цикла, рисками и анализом надежности (УРРАН). Порядок идентификации опасностей и рисков.
7. EN 50126–1:2017. Railway Applications. The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Generic RAMS Process.
8. ГОСТ Р 57193–2016. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем.

9. ТР ТС 003/2011. О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта.
10. *Белишкіна Т. А.* Особенности подтверждения соответствия требованиям безопасности железнодорожной автоматики и телемеханики в переходный период после принятия технических регламентов Таможенного союза / Т. А. Белишкіна // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2. – № 2. – С. 208–227.
11. *Сапожников В. В.* Сертификация и доказательство безопасности систем железнодорожном автоматике / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, В. И. Талалаев и др.; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М.: Транспорт, 1997. – 288 с.
12. ГОСТ Р ИСО / МЭК 12207–2010. Информационная технология (ИТ). Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла программных средств.
13. ГОСТ 33477–2015. Система разработки и постановки продукции на производство (СРПП). Технические средства железнодорожной инфраструктуры. Порядок разработки, постановки на производство и допуска к применению.
14. *Васильев С. Н.* Проблемы обеспечения безопасности в современных микропроцессорных системах управления подвижным составом, вызванные особенностями современной элементной базы, и их решение на примере блока безопасности «Барс» вагонов 81–760 московского метрополитена / С. Н. Васильев, А. П. Кирпичников, А. А. Ботвинёнок // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2016. – № 5. – С. 13–23
15. *Розенберг Е. Н.* Многоуровневая система управления и обеспечения безопасности движения поездов / Е. Н. Розенберг. – М.: Российский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи. – 317 с.
16. Договор о Евразийском экономическом союзе (Подписан в г. Астане 29.05.2014).
17. ГОСТ 33894–2016. Система железнодорожной автоматики и телемеханики на железнодорожных станциях. Требования безопасности и методы контроля.
18. EN 50129:2018. Railway applications – Communication, signaling and processing systems – Safety related electronics systems for signaling.
19. ОСТ 32.41–95. Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Методы доказательства безопасности систем и устройств железнодорожной автоматики и телемеханики.
20. РД 32 ЦШ 1115842.02–93. Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Порядок и методы контроля показателей безопасности, установленных в нормативно-технических документах.
21. *Розенберг Е. Н.* Методы и модели функциональной безопасности технических систем: монография / Е. Н. Розенберг, И. Б. Шубинский. – 2004. – С. 188.
22. *Федорец О. Н.* Модели и методы разработки безопасного программного обеспечения: монография / О. Н. Федорец, В. В. Грибков. – М.: Словян. поляна, 2009. – С. 188.
23. ГОСТ Р МЭК 61508-1–2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 1. Общие требования.
24. *Гапанович В. А.* Внедрение методологии урран в хозяйстве АТ / В. А. Гапанович, Б. Ф. Безродный, А. В. Горелик, Д. В. Шалягин // Автоматика, связь, информатика. – 2012. – № 4. – С. 12–15.
25. *Горелик А. В.* Методы анализа надежности и эффективности функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики / А. В. Горелик, И. А. Журавлев, П. А. Невазов, Н. А. Тарадин // Наука и техника транспорта. – 2011. – № 3. – С. 88–93.

26. Горелик А. В. Модели оценки технологической эффективности систем железнодорожной автоматики и телемеханики / А. В. Горелик, П. А. Неваров, И. А. Журавлев, А. С. Веселова // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1. – № 2. – С. 143–155.
27. Горелик А. В. Оценка рисков, связанных с функционированием систем электрической централизации / А. В. Горелик, В. Ю. Горелик, Д. В. Шалягин // Электротехника. – 2018. – № 9. – С. 49–53.
28. Сапожников В. В. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: учеб. пособие / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, В. И. Шаманов; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2017. – 318 с.
29. Согомонян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян, Е. В. Слабаков. – М.: Радио и связь, 1989. – 208 с.
30. Сапожников В. В. Основы теории надежности и технической диагностики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. – СПб: Издательство «Лань», 2019. – 588 с.
31. Сапожников В. В. Самопроверяемые дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – СПб: Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
32. Бочков К. А. Методы обеспечения безопасности в микропроцессорных системах железнодорожной автоматики и телемеханики: учеб. пособие / К. А. Бочков, С. Н. Харлап. – Гомель: БелГУТ, 2001. – 84 с.
33. Smith D. J. Functional safety: A Straightforward Guide to IEC 61508 and Related Standards. 1st ed. / D. J. Smith, K. G. L. Simpson. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. – 208 p.
34. Скляр В. В. Обеспечение безопасности АСУТП в соответствии с современными стандартами / В. В. Скляр. – М.: Инфра-Инженерия, 2018. – 384 с.
35. Гавзов Д. В. Методы обеспечения безопасности дискретных систем / Д. В. Гавзов, Вл. В. Сапожников, В. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 8. – С. 3–50.
36. Theeg G. Railway Signalling & Interlocking: 3ed ed. / G. Theeg, S. Vlasenko. – Germany, Leverkusen: PMC Media House GmbH, 2020. – 552 p.
37. Шубинский И. Б. Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа / И. Б. Шубинский. – М.: Областная типография «Печатный двор», 2012. – 296 с.
38. Майерс Г. Надежность программного обеспечения / Г. Майерс. – М.: Мир, 1980. – 360 с.
39. Липаев В. В. Функциональная безопасность программных средств / В. В. Липаев. – М.: СИНТЕГ, 2004. – 348 с.
40. Орлов С. А. Технологии разработки программного обеспечения. Разработка сложных программных систем: учебник / С. А. Орлов. – СПб.: Питер, 2002. – 464 с.
41. 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.
42. Бочков К. А. Разработка отказоустойчивых систем на основе диверситетных базисов / К. А. Бочков, С. Н. Харлап, Б. В. Сивко // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2. – № 1. – С. 47–64.
43. Васильев Д. А. Представление данных в модели полигона управления экспертной программы для испытаний программного обеспечения систем микропроцессорных централизаций / Д. А. Васильев, С. В. Гизлер, О. А. Наседкин, М. П. Шайфер // Проблемы безопасности и надежности микропроцессорных комплексов. – 2015. – № 1. – С. 80–83.

44. РТМ 32 ЦШ 1115482.02–94. Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Методы расчета показателей безотказности и безопасности СЖАТ. – СПб.: ПГУПС, 1994. – 36 с.
45. ОСТ 32.78–97. Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Безопасность программного обеспечения.
46. *Новиков Д. В.* К вопросу о выборе среды для имитационного моделирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Новиков // Актуальные вопросы развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики. сб. науч. трудов. – СПб.: Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2013. – С. 60–65.
47. *Марков Д. С.* Виды испытаний систем железнодорожной автоматики и телемеханики на работоспособность и безопасность. основные понятия и терминология / Д. С. Марков, О. А. Наседкин, Д. И. Ургансков, М. А. Бутузов // Автоматика на транспорте. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 429–440.
48. *Васильев Д. А.* Представление данных в модели полигона управления экспертной программы для испытаний программного обеспечения систем микропроцессорных централизаций / Д. А. Васильев, С. В. Гизлер, О. А. Наседкин, М. П. Шайфер // Проблемы безопасности и надежности микропроцессорных комплексов: сб. трудов научно-практической конференции. – СПб.: ПГУПС, 2015. – С. 80–84.
49. *Горелик А. В.* Применение имитационного моделирования при проектировании и оценке надежности систем железнодорожной автоматики / А. В. Горелик, А. С. Веселова, А. А. Маслов // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2016. – Т. 2. – 5 с.
50. *Васильев Д. А.* Имитаторы для испытаний программного обеспечения микропроцессорных систем железнодорожного транспорта / Д. А. Васильев // Автоматика и телемеханика железных дорог России. Техника, технология, сертификация. – 2011. – № 1. – С. 119–126.
51. *Марков Д. С.* Понятийный аппарат экспертизы и испытаний железнодорожной автоматики на безопасность / Д. С. Марков, О. А. Наседкин, Д. А. Васильев, М. А. Бутузов // Автоматика на транспорте. – 2018. – Т. 4. – № 1. – С. 30–45.
52. *Марков Д. С.* Терминологические особенности этапов разработки и доказательства безопасности железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. С. Марков, О. А. Наседкин, Д. А. Васильев, М. А. Бутузов // Автоматика на транспорте. – 2017. – Т. 3. – № 3. – С. 368–379.
53. *Белишклина Т. А.* Нормативная база как инструмент для обеспечения надежности и безопасности железнодорожной автоматики и телемеханики / Т. А. Белишклина, О. А. Абрамов // Автоматика на транспорте. – 2018. – Т. 4. – № 4. – С. 540–560.
54. *Липаев В. В.* Программная инженерия. Методологические основы / В. В. Липаев. – М.: ТЕИС, 2006–608 с.

**V. Yu. Ryazanov**

*LocoTech-Signal LLC, Moscow*

## **ANALYSIS OF THE REGULATORY FRAMEWORK FOR CONFIRMATION OF THE FUNCTIONAL SAFETY REQUIREMENTS COMPLIANCE OF MICROPROCESSOR-BASED RAILWAY AUTOMATION SYSTEMS**

The article analyzes the current regulatory framework for proof of safety, quality assurance, and confirmation of the conformity of microprocessor-based railway automation and remote control systems in the EAEU. CENELEC standards are briefly discussed. A brief overview is provided as regards measures to ensure the required level of safety of microprocessor-based railway automation and remote control systems from the point of view of quality management of development, safety management, and confirmation of the proper functioning of microprocessor systems. The practice of confirming the railway transport automated process control systems comply with standards in the form of a declaration of conformity per TR CU 003/2011 has been analyzed. It is concluded that there is a need to develop a regulatory framework to ensure regulated analysis and assessment of railway automation and remote control systems following the requirements of functional safety, as well as further development of standardization documents to regulate methods for assessing functional safety.

Functional safety, confirmation of conformity, proof of safety, methods to prove safety, life cycle model

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-435-465

### **References**

1. *Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Khristov Kh. A. & Gavzov D. V. (1995) Metody postroyeniya bezopasnykh mikroelektronnykh sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki [Methods for building safe microelectronic railway automation systems]. Edited by Vl. V. Sapozhnikov Moscow, Transport Publ., 272 p. (In Russian)*
2. GOST 33433–2015. Bezopasnost' funktsional'naya. Upravleniye riskami na zheleznodorozhnom transporte [Functional safety. Risk management on railway transport]. (In Russian)
3. GOST R ISO 9001–2015. Sistemy menedzhmenta kachestva. Trebovaniya [Quality Management Systems – Requirements]. (In Russian)
4. ISO/TS 22163:2017. Zheleznyye dorogi. Sistema menedzhmenta kachestva. Trebovaniya k sistemam menedzhmenta biznesa dlya predpriyatiy zheleznodorozhnoy otrasli: ISO 9001:2015 i chastnyye trebovaniya, primenimyye v zheleznodorozhnoy otrasli [Railways. Quality Management System. Requirements for business management systems for railway enterprises: ISO 9001:2015 and specific requirements applicable to the railway industry]. (In Russian)
5. GOST 33432–2015. Bezopasnost' funktsional'naya. Politika, programma obespecheniya bezopasnosti. Dokazatel'stvo bezopasnosti ob"yektov zheleznodorozhnogo transporta [Functional safety. Policy and program of safety provision. Safety proof of the railway objects]. (In Russian)
6. Russian Railways Standard STO 1.02.033–2010. Upravleniye resursami na etapakh zhiznennogo tsikla, riskami i analizom nadezhnosti (URRAN). Poryadok identifikatsii opasnostey i riskov [Resource management at life cycle stages, risk and reliability analysis (URRAN). Procedure for identifying hazards and risks]. (In Russian)

7. EN 50126–1:2017. Railway Applications. The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Generic RAMS Process.
8. GOST R 57193–2016. Sistemnaya i programmnyaya inzheneriya. Protsessy zhiznennogo tsikla sistem [Systems and software engineering. System life cycle processes]. (In Russian)
9. CU TR 003/2011. O bezopasnosti infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta [On safety of railway transport infrastructure]. (In Russian)
10. *Belishkina T. A.* (2016) Osobennosti podtverzheniya sootvetstviya trebovaniyam bezopasnosti zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki v perekhodnyy period posle prinyatiya tekhnicheskikh reglamentov Tamozhennogo soyuza [Confirmation of safety compliance of railway automation and remote control during the transition period after the adoption of the Customs Union Technical Regulations]. *Avtomatika na transporte [Automatic Equipment in Transport]*, vol. 2, no. 2, pp. 208–227. (In Russian)
11. *Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Talalayev V. I. et al.* (1997) Sertifikatsiya i dokazatel'stvo bezopasnosti sistem zheleznodorozhnom avtomatiki [Certification and safety proof of railway automation systems]. Edited by Vl. V. Sapozhnikov Moscow, Transport Publ., 288 p. (In Russian)
12. GOST R ISO/IEC 12207–2010. Informatsionnaya tekhnologiya (IT). Sistemnaya i programmnyaya inzheneriya. Protsessy zhiznennogo tsikla programmnykh sredstv [Information technology. System and software engineering. Software life cycle processes]. (In Russian)
13. GOST 33477–2015. Sistema razrabotki i postanovki produktsii na proizvodstvo (SRPP). Tekhnicheskkiye sredstva zheleznodorozhnoy infrastruktury. Poryadok razrabotki, postanovki na proizvodstvo i dopuska k primeneniyu [System of development and launching into manufacture. Railway infrastructure equipment. Procedure of development, launching into manufacture and tolerance for use]. (In Russian)
14. *Vasil'yev S. N., Kirpichnikov A. P. & Botvinyonok A. A.* (2016) Problemy obespecheniya bezopasnosti v sovremennykh mikroprotsessornykh sistemakh upravleniya podvizhnym sostavom, vyzvannyye osobennostyami sovremennoy elementnoy bazy, i ikh resheniye na primere bloka bezopasnosti “Bars” vagonov 81–760 moskovskogo metropolitena [Problems of ensuring safety in current microprocessor-based rolling stock control systems caused by the nature of the modern element base, and their solution exemplified by the Bars safety unit for 81–760 cars of the Moscow metro]. *Bulletin of the Joint Scientific Council of Russian Railways*, no. 5, pp. 13–23. (In Russian)
15. *Rozenberg E. N.* (2004) Mnogourovnevaya sistema upravleniya i obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poyezdov [Multilevel train traffic control and safety system]. Moscow, Russian Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation Publ., 317 p. (In Russian)
16. Treaty on the Eurasian Economic Union (Signed in Astana on May 29, 2014). (In Russian)
17. GOST 33894–2016. Sistema zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki na zheleznodorozhnykh stantsiyakh. Trebovaniya bezopasnosti i metody kontrolya [Railway automatics and telemechanics systems on railway stations. Safety requirements and methods of checking]. (In Russian)
18. EN 50129:2018. Railway applications – Communication, signaling and processing systems – Safety related electronics systems for signaling.
19. OST 32.41–95. Bezopasnost' zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki. Metody dokazatel'stva bezopasnosti sistem i ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Safety of railway automation and telemechanics. Methods for proving the safety of systems and devices of railway automation and telemechanics]. (In Russian)
20. RD 32 TsSh 1115842.02–93 (Regulatory Document ПД 32 ЦШ 1115842.02–93). Bezopasnost' zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki. Poryadok i metody kontrolya pokazaniya [Safety of railway automation and telemechanics. Procedure and methods of control display]. (In Russian)

- teley bezopasnosti, ustanovlennykh v normativno-tekhnicheskikh dokumentatsii [Safety of railway automation and telemechanics. Procedure and methods for monitoring safety indicators established in the regulatory and technical documentation]. (In Russian)
21. Rozenberg E. N. & Shubinskiy I. B. (2004) *Metody i modeli funktsional'noy bezopasnosti tekhnicheskikh sistem: monografiya* [Methods and models of functional safety of technical systems: monograph], pp. 188. (In Russian)
  22. Fedorets O. N. & Gribkov V. V. (2009) *Modeli i metody razrabotki bezopasnogo programmnogo obespecheniya: monografiya* [Models and methods of safe software development: monograph]. Moscow, Slavyanskaya Polyana Publ., pp. 188. (In Russian)
  23. GOST R IEC 61508–1-2012. Funktsional'naya bezopasnost' sistem elektricheskikh, elektronnykh, programmiruyemykh elektronnykh, svyazannykh s bezopasnost'yu. Chast' 1. Obschie trebovaniya. [Functional safety of electrical, electronic, programmable electronic safety-related systems. Part 1. General requirements]. (In Russian)
  24. Gapanovich V. A., Bezrodnyy B. F., Gorelik A. V. & Shalyagin D. V. (2012) Vnedreniye metodologii URRAN v khozyaystve AT [Implementation of the URRAN methodology in the A&T]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, computer science], no. 4, pp. 12–15. (In Russian)
  25. Gorelik A. V., Zhuravlev I. A., Nevarov P. A. & Taradin N. A. (2011) Metody analiza nadezhnosti i effektivnosti funktsionirovaniya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Methods for analyzing the reliability and efficiency of railway automation and remote control systems functioning]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology in Transport], no. 3, pp. 88–93. (In Russian)
  26. Gorelik A. V., Nevarov P. A., Zhuravlev I. A. & Veselova A. S. (2015) Modeli otsenki tekhnologicheskoy effektivnosti sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Models for assessing the technological efficiency of railway automation and remote control systems]. *Avtomatika na transporte* [Automatic Equipment in Transport], vol. 1, no. 2, pp. 143–155. (In Russian)
  27. Gorelik A. V., Gorelik V. Yu. & Shalyagin D. V. (2018) Otsenka riskov, svyazannykh s funktsionirovaniyem sistem elektricheskoy tsentralizatsii [Assessment of risks associated with the operation of electrical interlocking systems]. *Elektrotekhnika* [Electrical Engineering], no. 9, pp. 49–53. (In Russian)
  28. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Efanov D. V. & Shamanov V. I. (2017) Nadezhnost' sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki, telemekhaniki i svyazi: ucheb. posobiye [Reliability of railway automation, remote control and communication systems: textbook]. Edited by V. V. Sapozhnikov Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Railway educational training center] Publ., 318, 544 p. (In Russian)
  29. Sogomonyan E. S. & Slabakov E. V. (1989) Samoproveryayemye ustroystva i otkazoustoychivyye sistemy [Self-checking devices and fault-tolerant systems]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 208 p. (In Russian)
  30. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. & Efanov D. V. (2019) Osnovy teorii nadezhnosti i tekhnicheskoy diagnostiki [Reliability and technical diagnostics theory fundamentals]. St. Petersburg, Lan' Publishing House, 588 p. (In Russian)
  31. Sapozhnikov V. V. Sapozhnikov V. V. (1992) Samoproveryayemye diskretnyye ustroystva [Self-checking discrete devices]. St. Petersburg, Energoatomizdat, 224 p. (In Russian)
  32. Bochkov K. A. & Kharlap S. N. (2001) Metody obespecheniya bezopasnosti v mikroprotssessornykh sistemakh zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: ucheb. posobiye [Methods of ensuring safety in microprocessor-based railway automation and remote control systems: textbook]. Gomel, Belarusian State University of Transport Publ., 84 p. (In Russian)

33. *Smith D. J. & Simpson K. G. L.* (2001) *Functional safety: A Straightforward Guide to IEC 61508 and Related Standards*. 1st ed. Oxford, Butterworth-Heinemann Publ., 208 p.
34. *Sklyar V. V.* (2018) *Obespecheniye bezopasnosti ASUTP v sootvetstvi s sovremennymi standartami* [Ensuring the safety of the automated process control system in accordance with current standards]. Moscow, Infra-Inzheneriya Publ., 384 p. (In Russian)
35. *Gavzov D. V., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov Vl. V.* (1994) *Metody obespecheniya bezopasnosti diskretnykh sistem* [Methods for providing safety in discrete systems]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], no. 8, pp. 3–50. (In Russian)
36. *Theeg G. & Vlasenko S.* (2020) *Railway Signalling & Interlocking*. 3ed ed. Germany, Leverkusen, PMC Media House GmbH Press, 552 p.
37. *Shubinskiy I. B.* (2012) *Funktsional'naya nadezhnost' informatsionnykh sistem. Metody analiza* [Functional reliability of information systems. Analysis methods]. Moscow, "Pechatnyy dvor" Regional Printing House, 296 p. (In Russian)
38. *Myers G.* (1980) *Nadezhnost' programmnogo obespecheniya* [Software reliability]. Moscow, Mir Publ., 360 p. (In Russian)
39. *Lipaev V. V.* (2004) *Funktsional'naya bezopasnost' programmnykh sredstv* [Software functional safety]. Moscow, SINTEG Publ., 348 p. (In Russian)
40. *Orlov S. A.* (2002) *Tekhnologii razrabotki programmnogo obespecheniya* [Software development technologies]. *Razrabotka slozhnykh programmnykh sistem: uchebnik* [Software development technologies. Development of complex software systems: textbook]. St. Petersburg, Piter Publ., 464 p. (In Russian)
41. *Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Khristov Kh. A. & Gavzov D. V.* (1995) *Metody postroyeniya bezopasnykh mikroelektronnykh sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki* [Methods for building safe microelectronic railway automation systems]. Edited by Vl. V. Sapozhnikov. Moscow, Transport Publ., 272 p. (In Russian)
42. *Bochkov K. A., Kharlap S. N. & Sivko B. V.* (2016) *Razrabotka otkazoustoychivykh sistem na osnove diversitetnykh bazisov* [Development of fault-tolerant systems based on diverse bases]. *Avtomatika na transporte* [Automatic Equipment in Transport], vol. 2, no. 1, pp. 47–64. (In Russian)
43. *Vasil'yev D. A., Gizler S. V., Nasedkin O. A. & Shayfer M. P.* (2015) *Predstavleniye dannykh v modeli poligona upravleniya ekspertnoy programmy dlya ispytaniy programmnogo obespecheniya sistem mikroprotsessornykh tsentralizatsiy* [Representation of data in the expert program control area model for testing the software of microprocessor-based interlocking systems]. *Problemy bezopasnosti i nadezhnosti mikroprotsessornykh kompleksov* [Problems of safety and reliability of microprocessor-based systems], no. 1, pp. 80–83. (In Russian)
44. (1994) *RTM 32 TsSh 1115482.02–94* (Regulatory Document PTM 32 ЦШ 1115482.02–94). *Bezopasnost' zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki. Metody rascheta pokazateley bezotkaznosti i bezopasnosti SZhAT* [Safety of railway automation and remote control devices. Methods for calculating the indicators of reliability and safety of railway automation and remote control systems]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 36, pp. (In Russian)
45. *OST 32.78–97. Bezopasnost' zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki. Bezopasnost' programmnogo obespecheniya* [Safety of railway automation and remote control. Software security]. (In Russian)
46. *Novikov D. V.* (2013) *K voprosu o vybore sredy dlya imitatsionnogo modelirovaniya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki* [On the issue of choosing an environment for railway automation and remote control systems simulation]. *Actual problems of railway automation and remote control systems development*. Sb. nauch. trudov [Scientific proceedings], Saint Petersburg, PGUPS Publ., pp. 60–65. (In Russian)

47. Markov D. S., Nasedkin O. A., Urganskov D. I. & Butuzov M. A. (2019) Vidy ispytaniy sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki na rabotosposobnost' i bezopasnost'. osnovnyye ponyatiya i terminologiya [Types of performance and safety tests of railway automation and remote control systems. Basic concepts and terminology]. *Avtomatika na transporte [Automatic Equipment in Transport]*, vol. 5, no. 4, pp. 429–440. (In Russian)
48. Vasil'yev D. A., Gizler S. V., Nasedkin O. A. & Shayfer M. P. (2015) Predstavleniye dannykh v modeli poligona upravleniya ekspertnoy programmy dlya ispytaniy programmogo obespecheniya sistem mikroprotsessornykh tsentralizatsiy [Representation of data in the expert program control area model for testing the software of microprocessor-based interlocking systems]. *Problemy bezopasnosti i nadezhnosti mikroprotsessornykh kompleksov [Problems of safety and reliability of microprocessor-based systems]*. Sb. trudov nauchno-prakticheskoy konferentsii [Proceedings of the Scientific and Practical Conference]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., pp. 80–84. (In Russian)
49. Gorelik A. V., Veselova A. S. & Maslov A. A. (2016) Primeneniye imitatsionnogo modelirovaniya pri proyektirovanii i otsenke nadezhnosti sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki [Application of simulation in the design and reliability assessment of railway automation systems]. *Proceedings of the International Symposium on Reliability and Quality*, vol. 2, 5 p. (In Russian)
50. Vasil'yev D. A. (2011) Imitatory dlya ispytaniy programmogo obespecheniya mikroprotsessornykh sistem zheleznodorozhnogo transporta [Simulators for testing the railway transport microprocessor-based systems software]. *Avtomatika i telemekhanika zheleznodorozhnykh dorog Rossii. Tekhnika, tekhnologiya, sertifikatsiya [Automation and remote control of Russian railways. Equipment, technology, certification]*, no. 1, pp. 119–126. (In Russian)
51. Markov D. S., Nasedkin O. A., Vasil'yev D. A. & Butuzov M. A. (2018) Ponyatiynyy apparat ekspertizy i ispytaniy zheleznodorozhnoy avtomatiki na bezopasnost' [Research vocabulary of railway automation safety examination and testing]. *Avtomatika na transporte [Automatic Equipment in Transport]*, vol. 4, no. 1, pp. 30–45. (In Russian)
52. Markov D. S., Nasedkin O. A., Vasil'yev D. A. & Butuzov M. A. (2017) Terminologicheskiye osobennosti etapov razrabotki i dokazatel'stva bezopasnosti zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Terminological features of the development and proof of railway automation and remote control safety]. *Avtomatika na transporte [Automatic Equipment in Transport]*, vol. 3, no. 3, pp. 368–379. (In Russian)
53. Belishkina T. A. & Abramov O. A. (2018) Normativnaya baza kak instrument dlya obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Regulatory framework as a tool to ensure the reliability and safety of railway automation and remote control]. *Avtomatika na transporte [Automatic Equipment in Transport]*, vol. 4, no. 4, pp. 540–560. (In Russian)
54. Lipaev V. V. (2006) Programmaya inzheneriya. Metodologicheskiye osnovy [Software engineering. Methodological foundations]. Moscow, TEIS Publ., 608 p. (In Russian)

Статья представлена к публикации членом редколлегии К. А. Бочковым  
Поступила в редакцию 12.05.2020, принята к публикации 15.06.2020

РЯЗАНОВ Вячеслав Юрьевич — руководитель отдела качества и безопасности  
ООО «ЛокоТех-Сигнал»

e-mail: vyacheslav.ryazanov@locotech-signal.ru

© Рязанов В. Ю., 2020

УДК 681.518.5

**В. В. Грачев, канд. техн. наук**

**А. В. Грищенко, д-р техн. наук**

**В. А. Кручек, д-р техн. наук**

**Ф. Ю. Базилевский, канд. техн. наук**

*Кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург*

**М. А. Шварц, канд. техн. наук**

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

**Ф. М. Шварц, аспирант**

*Кафедра «Инженерная химия и естествознание», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург*

## МЕТОДИКА СИНТЕЗА НЕЙРОСЕТЕВЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Несмотря на обширный опыт применения аппарата нейронных сетей для решения разнообразных задач машинного обучения, многочисленные попытки использования его в технической диагностике не приводят (за редким исключением) к законченным решениям. Причиной сложившейся ситуации являются особенности задач технической диагностики, отличающие их от традиционных задач машинного обучения. В результате анализа этих особенностей авторами предложен подход к диагностированию сложных технических объектов, ориентированный на применение в системах встроенной диагностики и основанный на использовании нейросетевых эталонных диагностических моделей функционально обособленных узлов и агрегатов. Описывается методика синтеза таких моделей, особенности их обучения на данных, полученных в результате мониторинга объекта диагностирования с использованием встроенных средств диагностирования, определения допустимых ошибок отклика и адаптации к текущему состоянию объекта. Предлагаемая в статье фаззификация результатов работы диагностической модели на диагностической выборке позволяет унифицировать подход к диагностированию сложных технических объектов различного назначения. Предложенное авторами применение следящего контрольного сигнала  $D$ . Тригга для контроля остатков регрессии в процессе обучения повышает качество обучения моделей и их обобщающую способность. Значение этого сигнала, определяемое в результате работы модели на диагностической выборке, представляет собой дополнительный информативный диагностический параметр, повышающий точность классификации состояния объекта диагностирования. Применение предложенной методики на стадии проектирования сложных технических объектов позволяет оптимизировать вектор контролируемых параметров икратно повысить эффективность использования диагностической информации, регистрируемой встроенными средствами диагностики и мониторинга.

Техническая диагностика, нейросетевая регрессионная модель, декомпозиция сложного объекта, обучающая выборка, ошибка отклика модели, вектор контролируемых параметров объекта, вектор диагностических параметров, алфавит классов состояния объекта, фаззификация, функция принадлежности

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-466-483

## 1. Постановка задачи

В настоящее время практически все сложные технические системы оборудуются встроенными средствами мониторинга и диагностики (ВСМД), обеспечивающими непрерывный контроль и регистрацию значительных объемов измерительной информации в процессе эксплуатации. В связи с этим актуальными становятся вопросы использования этой информации для внедрения современных (предиктивных и прескриптивных) форм технического обслуживания сложных видов техники, обеспечивающих существенное снижение эксплуатационных расходов при одновременном повышении уровня надежности технических устройств.

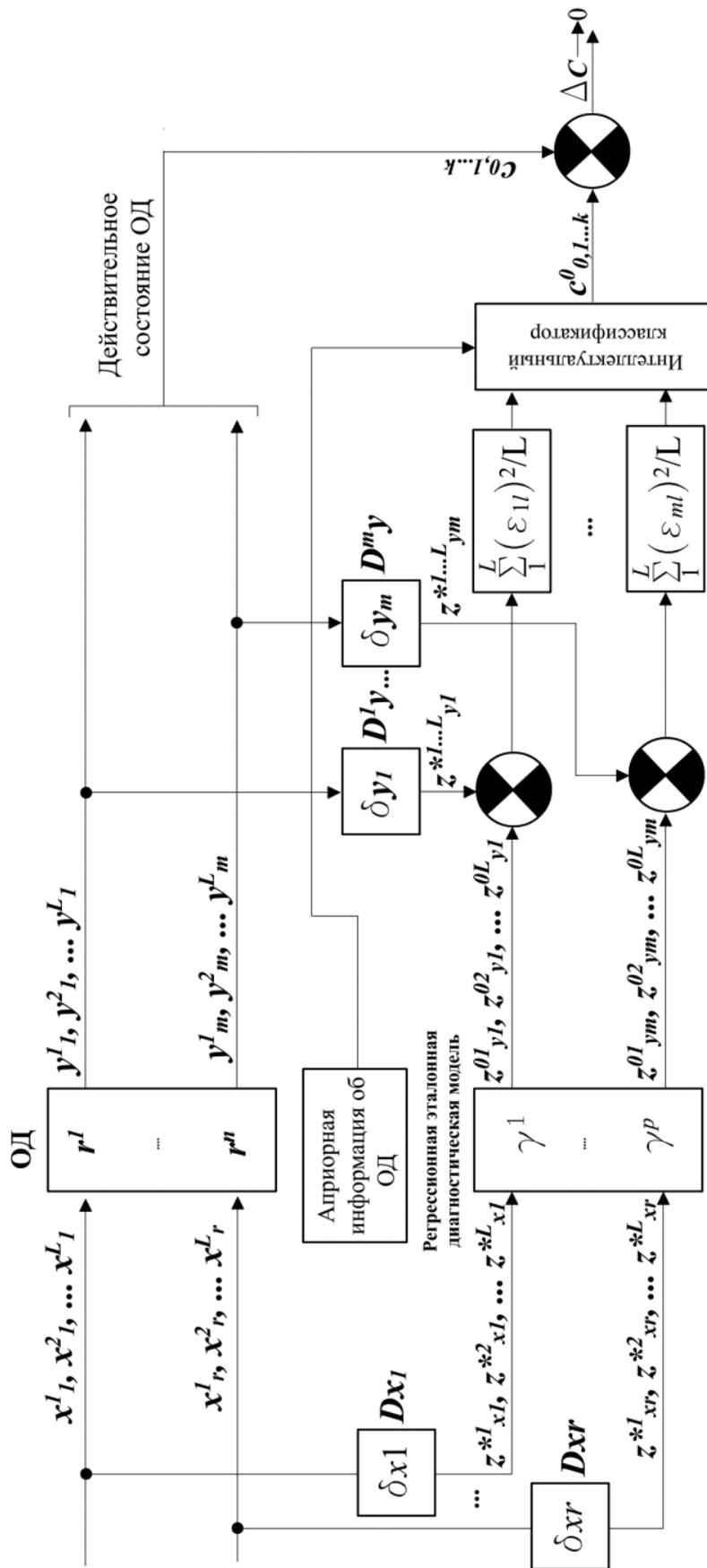
Использовать для этой цели средства и методы стационарной тестовой диагностики, как и опыт их применения, как правило, не удается, поскольку отсутствует возможность реализации тестовых режимов работы оборудования в условиях его эксплуатации.

Попытки прямого применения популярных технологий Data Mining и Big Data для обработки информации, регистрируемой подсистемами ВСМД, также не приводят к успеху — прежде всего из-за особенностей задач диагностирования сложных технических объектов и отличия их от задач, решаемых с использованием инструментария Data Mining и Big Data в других областях.

Первая из таких особенностей заключается в жесткой структурированности измерительной информации и заведомом отсутствии в ней каких-либо «скрытых знаний» или «скрытых закономерностей», на поиск которых ориентированы подходы Data Mining и Big Data [1–3]. Источником информации является ограниченное и неизменное количество измерительных каналов, осуществляющих периодическое измерение значений контролируемых параметров оборудования в процессе его эксплуатации. Результаты измерений представляют собой числовые данные, хранящиеся в табличной форме с числовыми (или преобразуемыми к таковым) типами полей на одном сервере. Принципы работы объектов диагностирования и их конструкция, перечень входных и выходных параметров хорошо известны, взаимосвязь между ними в отдельных (как правило, номинальном или близких к нему) режимах работы описывается характеристиками оборудования или даже аналитическими моделями.

Второй особенностью задач диагностирования сложных технических объектов является высокая надежность объектов диагностирования (ОД) и связанная с ней сложность формирования выборки параметров оборудования для каждого из классов его состояния (отказа) в объеме, необходимом для качественного обучения интеллектуального классификатора состояния.

Один из эффективных подходов к решению таких задач связан с использованием метода FDI (Fault Detection and Identification) [4] (рис. 1), в котором в качестве эталонной диагностической модели ОД применяется регрессионная модель с параметрами  $\{\gamma^1, \gamma^2, \dots, \gamma^P\}$ , определяемыми, исходя из условия мини-



**Рис. 1.** Модификация FDI-метода для систем бортовой диагностики локомотивов.  $(x^{1..L}_r, y^{1..L}_m)$  – векторы входных и выходных признаков объекта диагностирования (ОД) с размерностью  $r$  и  $m$ ;  $z^{*1..L}_{x1..r}, z^{*1..L}_{y1..m}$  – векторы измеренных входных и выходных признаков;  $z^{01..L}_{y1..m}$  – модельный вектор выходных признаков;  $\varepsilon_{1..m,1..L}$  – ошибки отклика модели на объектах диагностической выборки;  $C_{0,1..k}$  – алфавит классов состояния ОД

мизации ошибки отклика модели, на обучающей выборке параметров ОД, который находится в состоянии, принимаемом за эталонное.

Выполненный анализ показал, что предпочтительный базис для построения таких моделей – аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС) [5–7]. Его преимущества – высокая точность моделирования, удобство реализации в пользовательских приложениях, возможность дообучения моделей по мере накопления новых данных, инвариантность по отношению к особенностям функционирования и даже физической природе объекта диагностирования и размерности вектора его входных параметров, хорошая экстраполирующая способность.

Наличие практически неограниченного объема данных для объектов, находящихся в эталонном состоянии, позволяет эффективно обучать сети с любой структурой.

В связи с вышеизложенным актуальной становится задача разработки методики синтеза нейросетевых диагностических моделей оборудования сложных технических систем.

## **2. Синтез нейросетевых эталонных диагностических моделей сложных технических систем**

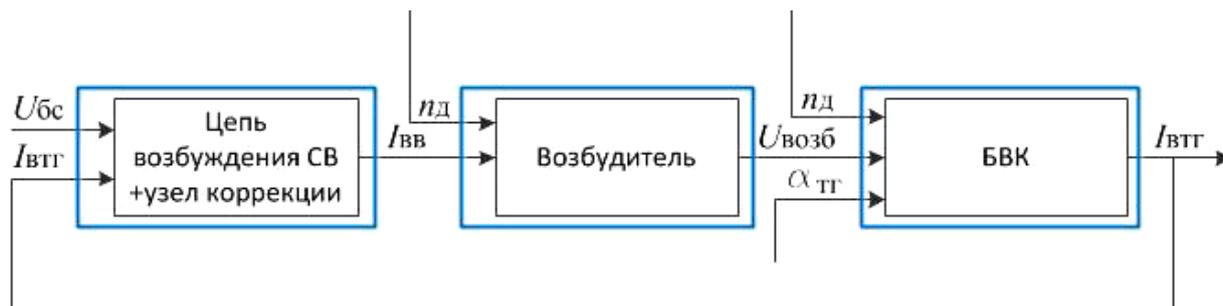
### **2.1. Определение структуры моделей**

Для реализации универсального подхода к диагностике сложных технических объектов на базе нейросетевых технологий предлагается концепция функционально прозрачных нейронных сетей [8], основанная на следующих основных аспектах формирования нейросетевой диагностической модели:

- декомпозиции сложного объекта на функционально обособленные относительно простые узлы и агрегаты, связанные друг с другом входными и выходными измеряемыми параметрами, совокупность которых образует вектор  $Z^*$ ;
- семантической адаптации функциональных зависимостей между входными и выходными параметрами узлов и агрегатов сложного объекта к физическому смыслу процессов их функционирования;
- функциональном сочетании расчетных и реальных характеристик.

Таким образом, в соответствии с концепцией функционально прозрачных нейронных сетей единая эталонная модель  $Z^0$  сложного технического ОД заменяется совокупностью (ансамблем) простых моделей  $\{Z_1^0, Z_2^0, Z_3^0, \dots, Z_m^0\}$  отдельных узлов и агрегатов, выделяемых в процессе декомпозиции ОД. Эти модели, как правило, имеют одномерный вектор  $Y$  выходных параметров и маломерный (3–5 параметров) вектор  $X$  входных параметров. При этом  $X, Y \in Z^*$ , где  $Z^*$  – вектор контролируемых параметров ОД.

Набор входных и выходных параметров для каждой из моделей  $Z_m^0$  определяется в процессе декомпозиции ОД, исходя из:



**Рис. 2.** Пример декомпозиции узла возбуждения тягового генератора тепловоза в соответствии с концепцией функционально прозрачных нейронных сетей:  $U_{бс}$  – напряжение бортовой сети;  $I_{втг}$  – ток возбуждения тягового генератора;  $I_{вв}$  – ток возбуждения возбудителя; напряжение возбудителя;  $n_d$  – частота вращения коленчатого вала дизеля; БВК – управляемый выпрямитель;  $\alpha_{тг}$  – угол управления тиристорами

- физических принципов функционирования отдельных узлов 1 ...  $m$  ОД и всего объекта в целом;
- располагаемого перечня регистрируемых (измеряемых) параметров (компонентов вектора  $Z^*$ ).

Этими же факторами определяется и глубина декомпозиции, если она выполняется для серийного объекта с уже известным фиксированным набором компонент вектора  $Z^*$ .

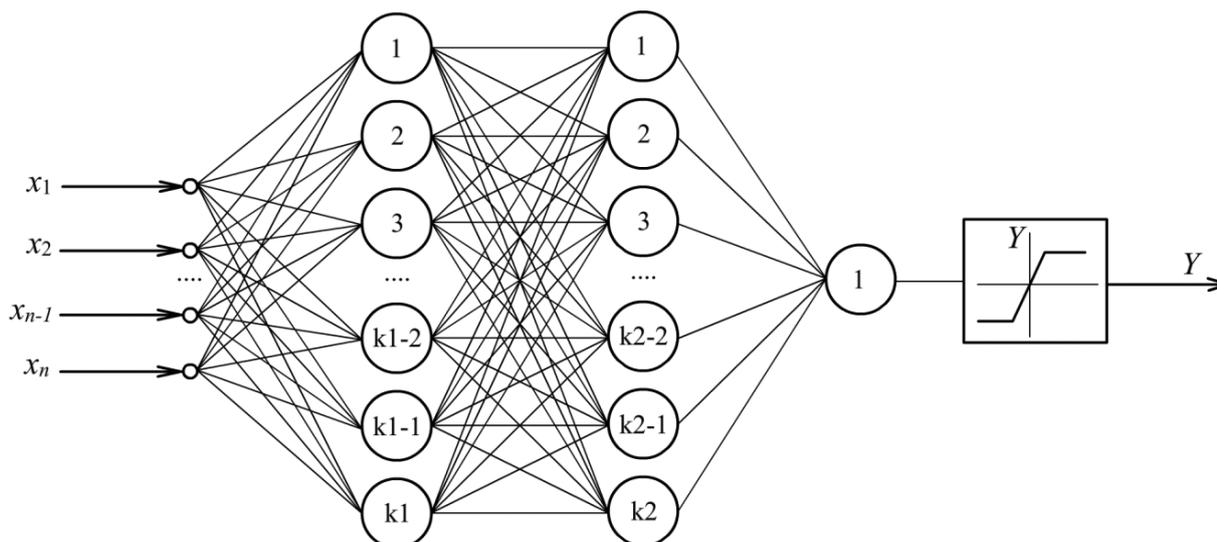
Пример декомпозиции узла возбуждения тягового генератора тепловоза приведен на рисунке 2 [9].

Как отмечалось выше, использование концепции ФПНС при синтезе эталонных моделей сложных объектов позволяет снизить размерность задач, решаемых моделями отдельных узлов. Это, в свою очередь, дает возможность упростить структуру НС моделей и снизить требования к ним в части скорости обучения и использования вычислительных ресурсов при реализации. При использовании данного подхода к выбору структуры моделей большинство практических задач диагностирования может успешно решаться с использованием простых многослойных полносвязных сетей прямого распространения (рис. 3).

## 2.2. Обучение нейросетевых моделей

Обучение моделей сводится к последовательной подаче на их входы векторов обучающей выборки, расчету ошибки отклика сети и коррекции синаптических весов с целью ее минимизации [5].

Поскольку структура моделей проста, для обучения может использоваться метод обратного распространения ошибки с любым способом оптимизации весов в ходе обучения [10]. Периодический контроль достигнутого уровня качества обучения осуществляется посредством определения стандартных метрик оценки качества регрессионных моделей [10–12]:



**Рис. 3.** Схема трехслойной полностью связанной сети прямого распространения ( $n-k_1-k_2-1$ )

– коэффициента детерминации

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}; \quad (1)$$

– среднеквадратичной ошибки отклика модели

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N-1}}; \quad (2)$$

где  $y_i$  – измеренные значения выходной (зависимой) переменной модели;  $\hat{y}_i$  – расчетные (модельные) значения зависимой переменной.

Вычисление этих метрик осуществляется как на обучающей выборке, так и на тестовой, данные которой для обучения не используются.

Дополнительная информация о текущем состоянии ОД может быть получена в результате анализа параметров распределения ошибок отклика модели (регрессионных остатков) на диагностической выборке. Однако необходимым условием информативности такого распределения будет его контроль в процессе обучения диагностической модели и учет результатов контроля при оценке качества обучения, чего, как правило, не делается в задачах Big Data и Machine Learning.

В [13–15] обоснована возможность проверки адекватности регрессионных моделей с помощью следящего контрольного сигнала (СКС) Д. Тригга  $K_j$ , определяемого соотношением:

$$K_i = \frac{\widehat{\varepsilon}_i}{\varepsilon_i}, \quad (3)$$

где  $\widehat{\varepsilon}_i = \gamma \cdot \varepsilon_i + (1 - \gamma) \cdot \widehat{\varepsilon}_{i-1}$  — сглаженная ошибка отклика модели на  $i$ -м объекте обучающей выборки;  $\varepsilon_i = y_i - \theta \cdot y_i^*$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  — сглаженная абсолютная ошибка отклика модели;  $\gamma$  — параметр сглаживания.

Если модель окажется настолько неадекватной изучаемому процессу, что все ошибки будут одного знака, то контрольный сигнал будет стремиться к  $+1$  или  $-1$  (выйти за эти пределы он не может). Если известно, что модель адекватна реальному процессу и полученные ошибки  $\varepsilon_i$  образуют нормально распределенную случайную последовательность с нулевым средним и стандартным отклонением  $\sigma$ , то для контрольного сигнала могут быть определены доверительные интервалы.

В [13] доказывается, что при малых  $\gamma$  ( $0.05 \dots 0.1$ ) и принятых допущениях относительно  $\varepsilon_i$  распределение  $K_i$  может быть аппроксимировано нормальным распределением. В этом случае статистический тест на адекватность модели имеет следующий вид:

гипотеза  $H_0$ : модель адекватна ( $M(\varepsilon_i) = 0$ ,  $M(\varepsilon_i \cdot \varepsilon_d) = 0$ ,  $d > 1$ ,  $\sigma = 1, 2 \cdot \widehat{\varepsilon}_i$  при  $\gamma \leq 0,1$  и  $t \rightarrow 0$ ) принимается на уровне значимости  $\alpha$ , если

$$|K_i| \leq 1,2 \cdot \Phi_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{2-\gamma}}, \quad (4)$$

где  $\Phi_{1-\frac{\alpha}{2}} = \Phi_{0,975} = 1,96$  при  $\alpha = 0,05$  — квантиль нормального распределения.

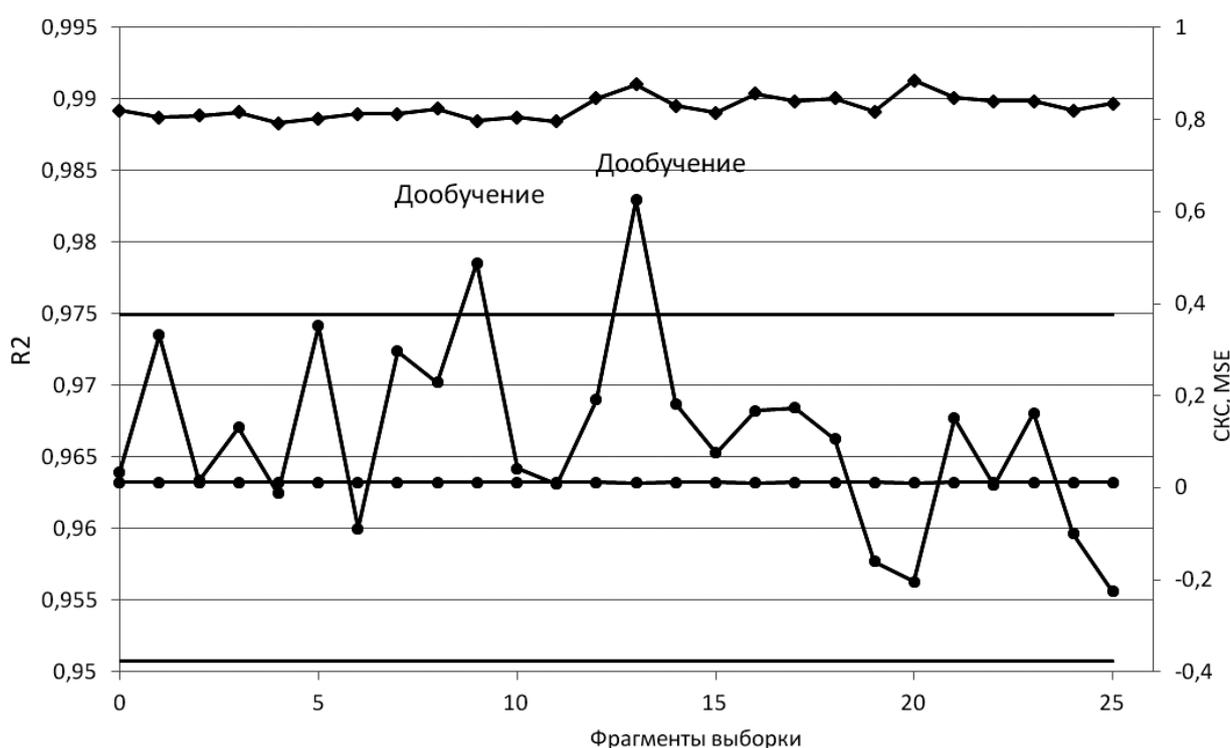
При  $\gamma = 0,05$  неравенство (4) имеет вид  $|K_i| < 0,3766$ .

Выполнение условия (4) является одним из критериев остановки процесса обучения.

На рисунке 4 представлено изменение следящего контрольного сигнала для ошибок отклика обученной модели тягового генератора на различных фрагментах исходной выборки, полученных ее ресемплированием.

### 2.3. Определение допустимой ошибки отклика обученной модели

Особенностью многих технических систем, в частности силовых установок транспортных средств, является принципиальная невозможность обеспечить полную репрезентативность обучающей выборки контролируемых параметров по отношению к их генеральной совокупности. Эта невозможность обусловлена, во-первых, широкими пределами изменения режимов работы установок в процессе эксплуатации, связанными с изменением внешних условий (профиля пути, загрузки, температуры и давления окружающей среды, погодных условий и др.). Во-вторых, она связана с ограниченной размерностью вектора контролируемых параметров и наличием неучтенных моделью влияющих факторов.



**Рис. 4.** Изменение сигнала SKC на фрагментах тестовой выборки модели тягового генератора

В силу этой особенности результаты работы даже хорошо обученной модели на выборках параметров ОД, не совпадающих с обучающей, отличаются от результатов, полученных при обучении.

Влияние указанных факторов может быть учтено назначением гибких допустимых пределов изменения ошибки отклика обученной модели по результатам ее работы на контрольных выборках параметров ОД, находящегося в эталонном состоянии, зафиксированных в различные периоды его эксплуатации.

Предельно допустимое значение среднеквадратичной ошибки отклика обученной модели на выборке объекта, находящегося в состоянии, которое определяется как эталонное, предлагается определять следующим образом [9]:

$$\Delta_{\text{пр}} = I_{0,95} + 3 \cdot \sigma_{\Delta}, \quad (5)$$

где  $I_{0,95} = m_{\Delta} + 1,96 \cdot \frac{\sigma_{\Delta}}{\sqrt{N}}$  – граница доверительного интервала математического

ожидания квадратичной ошибки отклика;  $m_{\Delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |\varepsilon_i|^2}{N}}$  – математическое

ожидание среднеквадратичной ошибки отклика на выборке группы оборудования локомотива в эталонном состоянии при постоянном периоде измерения;

$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - m_{\Delta})^2}{N-1}}$  – среднеквадратичное отклонение ошибки отклика на выборке группы оборудования локомотива в эталонном состоянии при постоянном периоде измерения;  $N$  – количество отсчетов выборки.

Математическое ожидание ошибки отклика  $m_{\Delta}^0$ , граница доверительного интервала  $I_{0,95}^0$  и допустимая ошибка отклика (5) определяются на контрольных выборках ОД после обучения обобщенной эталонной модели (табл. 1) и в дальнейшем используются для диагностирования данного объекта.

**Таблица 1.** Расчет допустимых ошибок отклика моделей узла возбуждения тягового генератора тепловоза

№ п/п	Метрика	Тяговый генератор	Возбудитель	БВК	Объем выборки
1	MSE	0,00730	0,00290	0,00844	999
	СКС	0,992	-0,378	0,957	
2	MSE	0,0100	0,00378	0,0129	499
	СКС	0,999	0,986	-0,994	
3	MSE	0,00639	0,00811	0,0102	1000
	СКС	1,0	-0,606	-1,0	
4	MSE	0,0115	0,00792	0,0104	1000
	СКС	0,9872	0,999	-0,999	
5	MSE	0,0106	0,00231	0,00594	1000
	СКС	0,618	0,262	0,929	
6	MSE	0,0172	0,00471	0,00607	1000
	СКС	0,999	-0,999	-0,990	
7	MSE	0,0144	0,00760	0,0140	380
	СКС	1,0	-0,83	-0,993	
8	MSE	0,0157	0,00258	0,00804	1000
	СКС	-0,998	0,894	-0,072	
9	MSE	0,00771	0,00249	0,0100	1000
	СКС	0,855	-0,967	0,999	
Σ	MV MSE	0,0110	0,00454	0,00899	7878
	STO MSE	0,00386	0,00249	0,00276	
	$I_{0,95}$	0,0135	0,00617	0,0108	
	$\Delta_{np}$	0,0251	0,0136	0,0191	

## 2.4. Адаптация обобщенной модели к характеристикам и эксплуатационному состоянию конкретного объекта

В реальной эксплуатации могут находиться (и часто находятся) технические объекты или системы, состояние которых, согласно действующим нормативным документам [16], должно определяться как «неработоспособное», поскольку они не в состоянии выполнять отдельные функции по причинам, зависящим от их состояния.

В то же время состояние этих объектов определяется как рабочее, поскольку большинство своих функций, востребованных в данных условиях эксплуатации, они выполнять могут. При этом задача восстановления полной работоспособности таких объектов эксплуатирующим предприятием может даже не ставиться, поскольку ее решение сопряжено с немалыми затратами ресурсов. С другой стороны, недоступные функции объекта не востребованы и не будут востребованы в дальнейшем в данных условиях эксплуатации.

Кроме того, эксплуатационные характеристики сложных технических объектов, находящихся в исправном состоянии, могут существенно отличаться, особенно в режимах работы, существенно отличных от номинального [17–18].

Таким образом, эталонные значения контролируемых параметров сложного ОД зависят от конкретных условий эксплуатации и могут многократно изменяться в течение его жизненного цикла.

Алгоритмическое обеспечение эффективной системы контроля технического состояния таких ОД должно предусматривать возможность адаптации диагностических моделей к состоянию ОД, принимаемому за эталонное в конкретных условиях эксплуатации.

Очевидным способом такой адаптации является дообучение модели на выборке параметров конкретного объекта. Однако данная операция плохо поддается автоматизации и требует значительных затрат времени.

В связи с этим может быть предложена следующая методика адаптации обобщенных нейросетевых диагностических моделей к характеристикам и эксплуатационному состоянию объекта диагностирования.

Во время первого сеанса диагностирования для каждой модели определяются среднеквадратичная ошибка отклика  $m_{\Delta}^1$ , ее среднеквадратичное отклонение  $\sigma_{\Delta}^1$ , граница доверительного интервала среднеквадратичного отклонения  $I_{0,95}^1$ , а также следящий контрольный сигнал  $K_1$  на диагностической выборке. Если выполняются неравенства:

$$I_{0,95}^1 \leq I_{0,95}^0, \quad |K_1| < 0,3766, \quad (6)$$

предельное значение среднеквадратичной ошибки отклика сохраняется неизменным и используется в дальнейших сеансах диагностирования.

В противном случае делается экспертный анализ текущего технического состояния объекта. Если оно признается рабочим и приемлемым для данных

условий эксплуатации, вычисляется коэффициент адаптации модели  $\theta$  по формуле:

$$\theta = 1 + \text{sign}(K_1) \cdot |m_{\Delta}^0 - m_{\Delta}^1|. \quad (7)$$

После этого выполняется повторное определение математического ожидания  $m_{\Delta}^1$  ошибки отклика модели и  $K_1$ , при этом на каждом шаге ошибка вычисляется с использованием зависимости:

$$\varepsilon_i = y_i - \theta \cdot y_i^*, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (8)$$

Если условие  $|K_1| < 0,3766$  не выполняется, то осуществляется поиск оптимального значения коэффициента адаптации  $\theta$  по условию  $|K_1| \rightarrow 0$ , после чего определяются значения  $m_{\Delta}^1$ ,  $\sigma_{\Delta}^1$ ,  $I_{0,95}^1$ , и для дальнейших сеансов диагностирования принимается:

$$\begin{aligned} m_{\Delta}^0 &= m_{\Delta}^1, \\ I_{0,95}^0 &= I_{0,95}^1, \\ \Delta_{\text{пр}}^0 &= \Delta_{\text{пр}}^1. \end{aligned} \quad (9)$$

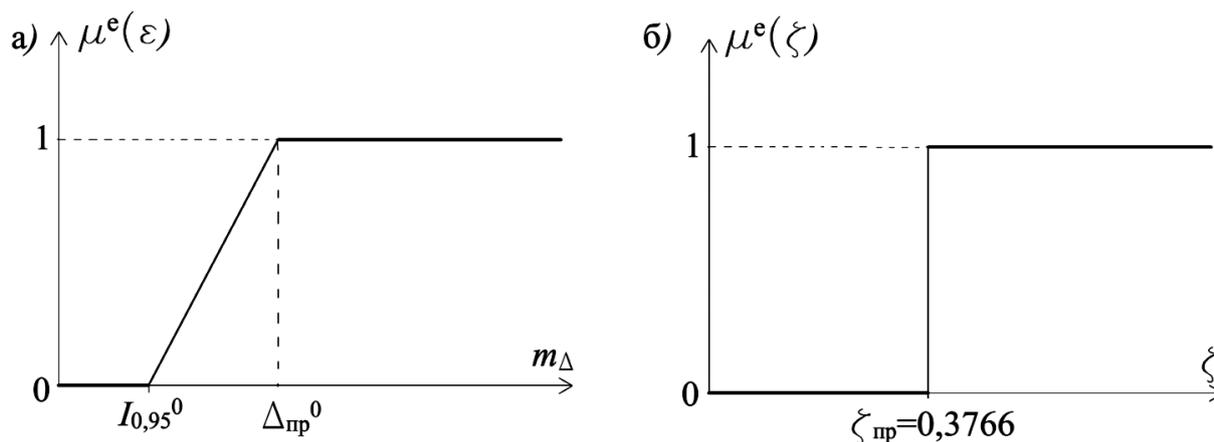
## 2.5. Фаззификация результатов моделирования диагностической выборки

Если величина среднеквадратичной ошибки отклика  $m_{\Delta}^i$ , найденной в результате очередного  $i$ -го сеанса диагностирования, удовлетворяет неравенству  $m_{\Delta}^i \leq I_{0,95}^0$ , текущее состояние группы оборудования признается соответствующим эталонному. Напротив, выполнение неравенства  $m_{\Delta}^i > \Delta_{\text{пр}}^0$  свидетельствует о критическом отклонении текущего состояния группы оборудования от эталонного, в котором определялась величина  $\Delta_{\text{пр}}^0$ . Положение верхней границы  $\Delta_{\text{пр}}^0$ , достижение и тем более превышение которой позволяет классифицировать текущее состояние объекта как нерабочее или предельное, может быть уточнено по мере накопления статистики отказов.

Однако в случае  $I_{0,95}^0 < m_{\Delta}^i < \Delta_{\text{пр}}^0$  существует неопределенность, которая существенно затрудняет классификацию состояния оборудования.

Для ее количественной оценки решение о текущем состоянии агрегата может приниматься с использованием аппарата нечеткой логики [19].

Пусть  $C^1 = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_n\}$  – множество (алфавит) классов состояний ОД, объединяющее классы состояний, отличных от рабочего  $c_0$ , т. е. требующих изъятия оборудования из эксплуатации и проведения работ по восстановлению его рабочего состояния. Пусть  $E^* = \{m_{\Delta 1}^*, \zeta_1^*, m_{\Delta 2}^*, \zeta_2^*, m_{\Delta 3}^*, \zeta_3^*, \dots, m_{\Delta m}^*, \zeta_m^*\}$ , где



**Рис. 5.** Функции принадлежности диагностических параметров:  
а) функция отклика эталонной модели; б) СКС

$m_{\Delta}^*, \zeta^* = |K_i|^*$  – четкий вектор результатов моделирования диагностической выборки контролируемых параметров обученной эталонной моделью агрегата, состоящей из  $m$  элементарных НС моделей.

В таком случае степень работоспособности агрегата может быть описана нечетким вектором, символьное описание которого имеет вид:

$$\left\{ \frac{\mu^{\varepsilon_1}(m_{\Delta 1}^*)}{m_{\Delta 1}^*}, \frac{\mu^{\varepsilon_1}(\zeta_1^*)}{\zeta_1^*}, \dots, \frac{\mu^{\varepsilon_m}(m_{\Delta m}^*)}{m_{\Delta m}^*}, \frac{\mu^{\varepsilon_m}(\zeta_m^*)}{\zeta_m^*} \right\}, \quad (10)$$

где  $\mu^{\varepsilon_m}(m_{\Delta m}^*)$  – функция принадлежности МО среднеквадратичной ошибки отклика  $m_{\Delta m}^*$  модели  $m$  на диагностической выборке одному из состояний  $C^1$  такая, что  $\mu^{\varepsilon_m} : m_{\Delta m}^* \rightarrow [0,1]$  [5, 19];  $\mu^{\varepsilon_m}(\zeta_m^*)$  – функция принадлежности значения следящего контрольного сигнала модели  $m$  на диагностической выборке одному из состояний  $C^1$  такая, что  $\mu^{\varepsilon_m} : \zeta_m^* \rightarrow [0,1]$ .

Вид функции  $\mu^{\varepsilon}$  определяется характером решаемой задачи. Поскольку каждая из  $m$  элементарных НС моделей осуществляет преобразование входного вектора контролируемых параметров  $X_m$  в среднеквадратичную ошибку  $m_{\Delta}^*$ , представляется целесообразным использовать функцию принадлежности класса  $\gamma$  [5] (рис. 5, а).

Как отмечалось выше, наряду с абсолютным значением МО среднеквадратичной ошибки отклика модели существенную диагностическую информацию, необходимую для локализации отказа, может дать анализ распределения ошибок отклика модели на диагностической выборке, для интегральной оценки которого было предложено использовать следящий контрольный сигнал Д. Тригга [13–15].

Результаты ряда экспериментов с различными наборами данных позволяют сделать следующие выводы:

основную часть информации о текущем состоянии объекта моделирования несет в себе знак следящего контрольного сигнала при условии  $|K_i| > 0,3766$ ; учет знака  $K_i$  для модельной кривой имеет смысл только при  $\mu^{e_m}(m_{\Delta m}^*)$ .

С учетом этих выводов для нечеткого описания результатов интегральной оценки остатков модельной регрессии удобно использовать пороговую функцию принадлежности (рис. 5, б), которая определяется согласно правилам:

$$\mu^e(\zeta^+) = \begin{cases} 0 & \text{при } (m_{\Delta} \leq I_{0,95}^0) \\ 1 & \text{при } (m_{\Delta} > I_{0,95}^0) \text{ и } (\zeta > 0,3766) \end{cases},$$

$$\mu^e(\zeta^-) = \begin{cases} 0 & \text{при } (m_{\Delta} \leq I_{0,95}^{\max}) \\ 1 & \text{при } (m_{\Delta} > I_{0,95}^{\max}) \text{ и } (\zeta < -0,3766) \end{cases}.$$

Таким образом, если эталонное состояние узла ОД описывается эталонной моделью с одномерным выходным вектором, его текущее состояние описывается трехмерным вектором диагностических признаков:

$$E^* = \{\mu^{e_m}(m_{\Delta m}^*), \mu^{e_m}(\zeta_m^{*+}), \mu^{e_m}(\zeta_m^{*-})\}. \quad (11)$$

Фаззификация результатов работы моделей на диагностической выборке открывает возможность создания унифицированных интеллектуальных классификаторов состояния сложных технических объектов на основе экспертных знаний [20].

## Заключение

В статье предложена методика синтеза регрессионных эталонных диагностических моделей сложных серийных технических объектов, учитывающая особенности их эксплуатации и технического обслуживания в условиях линейных транспортных предприятий.

Основные достоинства предлагаемой методики:

- относительная простота, хорошая интерпретируемость и высокое качество обучения моделей;
- унификация диагностического описания объектов с различными характеристиками и физическими принципами функционирования, что открывает возможность использования унифицированных классификаторов состояния и экспертных знаний для их построения;
- возможность использования обобщенных моделей для диагностирования однотипных объектов с разными эксплуатационными характеристиками без переобучения.

Предложенное авторами применение следящего контрольного сигнала Тригга для контроля остатков регрессии в процессе обучения улучшает качество обучения моделей и их обобщающую способность. Значение этого сигнала, определяемое в результате работы модели на диагностической выборке, представляет собой дополнительный информативный диагностический параметр, повышающий точность классификации состояния объекта диагностирования.

Применение предложенной методики на стадии проектирования сложных технических объектов позволяет оптимизировать вектор контролируемых параметров икратно увеличить эффективность использования диагностической информации, регистрируемой встроенными средствами диагностики и мониторинга.

### Библиографический список

1. *Майер-Шенбергер В.* Большие данные. Революция, которая изменит то, как мы живем, работаем и мыслим / В. Майер-Шенбергер, К. Кукьер. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2014. – 240 с.
2. *Shmueli G.* To Explain or to Predict? /G. Shmueli // *Statistical Science*. – 2010. – Vol. 25. – N 3. – P. 289–310. <https://doi.org/10.1214/10-STS330>
3. *Брендан Т.* Наука о данных: базовый курс / Т. Брендан, Д. Келлехер. – М.: Alpina Digital, 2020. – 220 с.
4. *Жернаков С. В.* Контроль и диагностика технического состояния масляной системы ГТД с использованием технологии нейронных сетей / С. В. Жернаков, Н. С. Иванова, Р. Ф. Равилов // *Вестник УГАТУ «Информатика и вычислительная техника»*. – 2012. – Т. 16. – № 2 (47). – С. 210–220.
5. *Рутковская Д.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: учебное пособие / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – 2-е изд. – М.: Горячая линия-Телеком, 2013. – 452 с.
6. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – 2-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1114 с.
7. *Vemhart M.* Artificial Neural Networks: Lecture Notes. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1901.05639.pdf> (дата обращения: 05.06.2020).
8. *Добродеев И. П.* Повышение эффективности нейросетевых моделей в системах диагностики технического состояния газотурбинных двигателей на основе функциональной адаптации: дис. ... канд. техн. наук, специальность: 05.13.01 / И. П. Добродеев. – Рыбинск: РГАТУ им. П. А. Соловьева, 2010. – 218 с.
9. *Грачев В. В.* Научные основы применения методов интеллектуального анализа данных для контроля технического состояния локомотивов: дис. ... докт. техн. наук, специальность: 05.22.07 / В. В. Грачев. – СПб.: ПГУПС, 2020. – 434 с.
10. *Джулли А.* Библиотека Keras – инструмент глубокого обучения. Реализация нейронных сетей с помощью библиотек Theano и TensorFlow / А. Джулли, С. Пал. – М.: ДМК Press, 2018. – 294 с.
11. *Minaee S.* 20 Popular Machine Learning Metrics. Part 1: Classification & Regression Evaluation Metrics. – URL: <https://towardsdatascience.com/20-popular-machine-learning-metrics-part-1-classification-regression-evaluation-metrics-1ca3e282a2ce> (дата обращения: 05.06.2020).

12. *Tiwari S.* Complete Guide to Machine Learning Evaluation Metrics. – URL: <https://medium.com/analytics-vidhya/complete-guide-to-machine-learning-evaluation-metrics-615c2864d916> (дата обращения: 05.06.2020).
13. *Лукашин Ю. П.* Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов: учебное пособие / Ю. П. Лукашин. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 416 с.
14. *Trigg D. W.* Monitoring a forecasting system / D. W. Trigg // *Operational Research Quarterly.* – 1964. – Vol. 15. – P. 271–274.
15. *Trigg D. W.* Exponential smoothing with an adaptive response rate / D. W. Trigg, A. G. Leach // *Operational Research Quarterly.* – 1967. – Vol. 18. – P. 53–59.
16. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. – Введен 01.03.2017. – М.: Стандартинформ, 2017. – 23 с.
17. *Курилкин Д. Н.* Анализ основных причин, влияющих на неравномерное распределение токов и вращающих моментов между тяговыми двигателями / Д. Н. Курилкин, С. М. Алигаджиев и др. // *Локомотивы. Электрический транспорт XXI век: сб. материалов VI международной научно-практической конференции.* – СПб., 2018. – Т. 1. – С. 218–223.
18. *Перминов В. А.* Влияние технического состояния вспомогательного оборудования тепловозов на их энергоэффективность в эксплуатации / В. А. Перминов, В. В. Грачев, И. Э. Нестеров, Д. Н. Курилкин // *Вестник научно-исследовательского и конструкторско-технологического института подвижного состава.* – 2015. – Вып. 97. – С. 45–58.
19. *Terano T.* Fuzzy Systems. Theory and its applications / T. Terano, K. Asai // Academic Press. – 1972. – 264 p.
20. *Грачев В. В.* Использование нейро-нечетких диагностических моделей при оценке технического состояния электрооборудования тепловоза / В. В. Грачев, А. В. Агунов, А. В. Грищенко, В. А. Кручек // *Электротехника.* – 2017. – № 10. – С. 14–18.

**V.V. Grachev**

**A.V. Grishchenko**

**V.A. Kruchek**

**F. Yu. Bazilevsky**

*The department of "Locomotives and Locomotive Facilities"*

*Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg*

**M. A. Schwartz**

*The department of "Higher Mathematics"*

*Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg*

**F. M. Schwartz**

*The department of "Engineering Chemistry and Natural Science"*

*Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg*

## **METHODOLOGY FOR SYNTHESIS OF NEURAL NETWORK DIAGNOSTIC MODELS OF COMPLEX TECHNICAL OBJECTS**

Despite the vast experience of using the neural networks for solving various machine learning problems, the numerous attempts to use them in technical diagnostics have not yet led to complete

solutions so far (with rare exceptions). The reason is the specific nature of technical diagnostics that distinguishes such tasks from traditional machine learning problems. Having analyzed these specific features, the authors propose an approach to diagnosing complex technical objects that is focused on the use in built-in diagnostics systems and is based on the neural network reference diagnostic models of functionally isolated nodes and assemblies. The article describes the methodology for the synthesis of such models, their training on the data obtained by monitoring the object being tested using built-in diagnostic tools, determining the permissible response errors, and adapting to the current status of the object. The fuzzification of the diagnostic model results using the test sample proposed in the article makes it possible to standardize the approach to diagnosing complex technical objects designed for various purposes. The use of D. Trigg's tracking control signal proposed by the authors to monitor regression residuals during the learning increases the training quality and generalization ability of models. The value of this signal determined by the model run on a test sample is an additional informative diagnostic parameter that increases the accuracy of classifying the status of the object under test. The proposed methodology applied at the complex technical object design stage allows optimizing the monitored parameters' array and multiplying the efficiency of the diagnostic information recorded by the built-in diagnostic and monitoring tools.

Technical diagnostics, neural network regression model, decomposition of a complex object, training sample, model response error, monitored parameters' array, diagnostic parameters' array, an alphabetic arrangement of object status classes, fuzzification, membership function

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-466-483

## References

1. *Mayer-Schönberger V. & Cukier K. (2014) Bol'shiye dannyye. Revolyutsiya, kotoraya izmenit to, kak my zhivem, rabotayem i myslim [Big Data: A Revolution That Will Transform How We Live, Work, and Think]. Moscow, Mann, Ivanov and Ferber Publ., 240 p. (In Russian)*
2. *Shmueli G. (2010) To Explain or to Predict? *Statistical Science*, vol. 25, no. 3, pp. 289–310. <https://doi.org/10.1214/10-STS330>*
3. *Brendan T. & Kelleher D. (2020) Nauka o dannyykh: bazovyy kurs [Data Science: MIT Press Essential Knowledge series]. Moscow, Alpina Digital Publ., 220 p. (In Russian)*
4. *Zhernakov S. V., Ivanova N. S. & Ravilov R. F. (2012) Kontrol' i diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya maslyanoy sistemy GTD s ispol'zovaniyem tekhnologii neyronnykh setey [Monitoring and diagnostics of the gas turbine engine oil system technical condition using neural network technology]. *Bulletin of USATU (Ufa State Aviation Technical University), Informatics and Computer Science*, vol. 16, no. 2 (47), pp. 210–220. (In Russian)*
5. *Rutkovskaya D., Pilin'skiy M. & Rutkovskiy L. (2013) Neyronnyye seti, geneticheskiye algoritmy i nechetkiye sistemy: uchebnoye posobiye [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems: Training manual]. Ed. 2. Moscow, Goryachaya liniya–Telekom Publ., 452 p. (In Russian)*
6. *Khaykin S. (2006) Neyronnyye seti: polnyy kurs [Neural networks: a complete book]. Ed. 2. Moscow, Williams Publishing House, 1114 p. (In Russian)*
7. *Berthelot M. *Artificial Neural Networks: Lecture Notes*. URL: <https://arxiv.org/pdf/1901.05639.pdf> (accessed: June 5, 2020).*
8. *Dobrodeyev I. P. (2010) Povysheniye effektivnosti neyrosetevykh modeley v sistemakh diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya gazoturbinnnykh dvigateley na osnove funktsional'noy adaptatsii [Improving the efficiency of neural network models in gas turbine engine technical diagnostic systems based on functional adaptation]: dis. ... kand. tekhn. nauk, spetsial'nost': 05.13.01 [Thesis of PhD in Engineering, specialty: 05.13.01] Rybinsk, P. P. A. Solovyov RSATU (Rybinsk State Aviation Technical University) Publ., 218 p. (In Russian)*

9. Grachev V. V. (2020) Nauchnyye osnovy primeneniya metodov intellektual'nogo analiza dannykh dlya kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov [Scientific foundations of the application of data mining methods for monitoring the technical condition of locomotives]: dis. ... dokt. tekhn. nauk, spetsial'nost': 05.22.07 [Thesis of Dr Sci in Engineering, specialty: 05.22.07]. St. Petersburg, PGUPS Publ., 434, pp. (In Russian)
10. Gulli A. & Pal S. (2018) Biblioteka Keras – instrument glubokogo obucheniya. Realizatsiya neyronnykh setey s pomoshch'yu bibliotek Theano i TensorFlow [Deep Learning with Keras. Implement neural networks with Keras on Theano and TensorFlow]. Moscow, DMK Press, 294 p. (In Russian)
11. Minaee S. 20 Popular Machine Learning Metrics. Part 1: Classification & Regression Evaluation Metrics. URL: <https://towardsdatascience.com/20-popular-machine-learning-metrics-part-1-classification-regression-evaluation-metrics-1ca3e282a2ce> (accessed: June 5, 2020).
12. Tiwari S. Complete Guide to Machine Learning Evaluation Metrics. URL: <https://medium.com/analytics-vidhya/complete-guide-to-machine-learning-evaluation-metrics-615-c2864d916> (accessed: June 5, 2020).
13. Lukashin Yu. P. (2003) Adaptivnyye metody kratkosrochnogo prognozirovaniya vremennykh ryadov: uchebnoye posobiye [Adaptive methods for short-term time series forecasting: Training manual]. Moscow, Finansy i Statistika Publ., 2003, 416 p. (In Russian)
14. Trigg D. W. (1964) Monitoring a forecasting system. *Operational Research Quarterly*, vol. 15, pp. 271–274.
15. Trigg D. W. & Leach A. G. (1967) Exponential smoothing with an adaptive response rate. *Operational Research Quarterly*, vol. 18, pp. 53–59.
16. (2017) GOST 27.002–2015. Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya [Dependability in technics. Terms and definitions]. Introduced as of March 1, 2017. Moscow, Standartinform Publ., 23 p. (In Russian)
17. Kurilkin D. N., Aligadzhiev S. M. et al. (2018) Analiz osnovnykh prichin, vliyayushchikh na neravnomernoye raspredeleniye tokov i vrashchayushchikh momentov mezhdru tyagovymi dvigatelyami [Analysis of the main reasons affecting the uneven currents and torques distribution between traction motors]. *Lokomotivy. Elektricheskiy transport XXI vek: sb. materialov VI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Locomotives. Electric transport in the XXI century: Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference]*. Saint Petersburg, vol. 1, pp. 218–223. (In Russian)
18. Perminov V. A., Grachev V. V., Nesterov I. E. & Kurilkin D. N. (2015) Vliyaniye tekhnicheskogo sostoyaniya vspomogatel'nogo oborudovaniya teplovozov na ikh energoeffektivnost' v ekspluatatsii [Influence of technical condition of diesel locomotives' auxiliary equipment on their energy efficiency in operation]. *Bulletin of Research, Design and Technology Institute of Rolling Stock*, iss. 97, pp. 45–58. (In Russian)
19. Terano T. & Asai K. (1972) Fuzzy Systems. Theory and its applications. *Academic Press*, 264 p.
20. Grachyov V. V., Agunov A. V., Grishchenko A. V. & Kruchek V. A. (2017) Ispol'zovaniye neyro-nechetkikh diagnosticheskikh modeley pri otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya teplovoza [The use of neuro-fuzzy diagnostic models in assessing the technical condition of electrical equipment of a diesel locomotive]. *Elektrotekhnika [Electrical Engineering]*, no. 10, pp. 14–18. (In Russian)

Статья представлена к публикации членом редколлегии В. А. Ходаковским  
Поступила в редакцию 29.06.2020, принята к публикации 02.07.2020

*ГРАЧЕВ Владимир Васильевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

e-mail: v\_grach@mail.ru

*ГРИЩЕНКО Александр Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

e-mail: sanklok@mail.ru

*КРУЧЕК Виктор Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

e-mail: victor.kruchek@mail.ru

*БАЗИЛЕВСКИЙ Федор Юрьевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

e-mail: f\_basilevski@mail.ru

*ШВАРЦ Михаил Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

e-mail: shvarts4545@mail.ru

*ШВАРЦ Филипп Михайлович* – аспирант кафедры «Инженерная химия и естествознание» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

e-mail: shvarts4545@mail.ru

© Грачев В. В., Грищенко А. В., Кручек В. А., Базилевский Ф. Ю., Шварц М. А., Шварц Ф. М., 2020

УДК 681.518.5+656

**Г. В. Осадчий**

ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга», Санкт-Петербург

**А. В. Шинкаренко**

ООО «Робо-Тек», Санкт-Петербург

**Д. Г. Плотников, канд. техн. наук**

**А. В. Баните**

Высшая школа транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,  
Санкт-Петербург

## **ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Статья посвящена развитию технологий мониторинга объектов инфраструктуры промышленности и транспорта. Отмечается важность систем мониторинга для совершенствования технологий обслуживания технических объектов, а также возможностей определения предотказных состояний, прогнозирования дальнейших изменений и определения остаточного ресурса. Дается анализ подходов к реализации систем мониторинга с точки зрения обеспечения оптимальной компоновки. Имеется перечень критериев для оценки эффективности рассмотренных подходов к проектированию. Приведены рекомендации по рациональному подходу к проектированию систем мониторинга и определена оптимальная последовательность действий для создания универсальной платформы непрерывного мониторинга состояния технических объектов. Предложена концепция универсальной платформы непрерывного мониторинга для инфраструктурных объектов строительной отрасли, транспорта и промышленности.

Техническая диагностика, система мониторинга, непрерывный мониторинг, техническое состояние, инфраструктурные объекты

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-484-498

### **Введение**

Обеспечение безопасной эксплуатации сложных технических систем — одна из приоритетных задач современной промышленности и транспорта [1–3]. Существенным ее аспектом является обеспечение прочности металлических конструкций крупных машин, строительных и технологических сооружений [4]. При существующем уровне развития технологии не представляется возможным обеспечить безусловную надежность конструкции на этапе проектирования. При моделировании несущей способности конструкций нельзя учесть влияние всех внешних воздействий, а также накопленных повреждений, возникающих

при длительной эксплуатации. Поэтому для обеспечения безопасности ответственных объектов используются возможности мониторинга технического состояния конструкции [5–8].

Под мониторингом понимается непрерывный процесс наблюдения, систематическая регистрация параметров и обработка информации об объекте или процессе с целью изучения его динамики и проверки его соответствия заданным критериям. Мониторинг технического состояния — наблюдение за состоянием объекта для определения и предсказания момента перехода в неработоспособное или предельное состояние [4, 9]. Полученные данные позволяют сформировать оценку текущего технического состояния объекта (технический диагноз) и на основании полученной и априорной информации оценить возможность его дальнейшей безопасной эксплуатации. Результаты мониторинга дают основания для оценки остаточного ресурса конструкции, назначения внепланового технического обследования, обслуживания или ремонта, указания на неотложные действия персонала и т. д. [10–14]

Система мониторинга — это совокупность процедур, процессов и ресурсов, необходимых для его проведения. Рассмотрим ряд подходов к созданию системы, отличающихся по сложности технической реализации.

1. Непосредственное измерение критических параметров (характеризующих состояние конструкции) и сопоставление их с пороговыми значениями, установленными при проектировании [15]. При низкой стоимости реализации этот метод имеет следующие ключевые недостатки:

— негативное событие фиксируется по факту его наступления, поэтому необходим дополнительный анализ для контроля приближения измеряемых значений к пороговым. Для оценки состояния объекта в целом, контроля всех узлов и элементов сооружения требуется большое количество датчиков. Во многих случаях проблемой становится определение исходного нулевого отсчета датчика, соответствующего исходному состоянию ненагруженной конструкции. Далеко не всегда удается найти параметр, непосредственно характеризующий состояние конструкции. Например, таким образом невозможно контролировать усталостное повреждение элементов.

2. Расширением предыдущего подхода можно считать анализ трендов снимаемых показаний для прогнозирования времени критического ухудшения состояния в точках непосредственных измерений [16–18]. Этот метод дает информацию для корректировки плана технического обслуживания и ремонта объекта. Остальные недостатки сохраняются.

Реализация систем мониторинга должна строиться на универсальной платформе.

При проектировании универсальной программно-аппаратной платформы необходимо максимально полно охватить исследуемую область:

— определить специфические задачи и требования в различных сферах, где необходим мониторинг;

— выявить ключевые особенности существующих систем;  
— структурировать текущие задачи и имеющиеся на данный момент возможности для определения общих, универсальных способов решения проблем.

Далее будет продемонстрировано, как:

- повышение уровня абстракции входящих в систему элементов;
  - унификация компонентов;
  - разделение системы на интеллектуальные микросервисы
- позволяют:
- расширить возможности и сферы применения разрабатываемого комплекса;
  - упростить его состав за счет возможности решения дополнительных задач переконфигурацией имеющихся составных частей без разработки новых;
  - стандартизировать и унифицировать подход к решению широкого класса задач.

## 1. Задачи, виды и состав систем мониторинга

Мониторинг требуется во множестве областей. В их числе контроль как над параметрами конструкций и активных механизмов, так и над пользователями (персоналом); наблюдение за состоянием человеческого организма; за окружающей средой (например, с целью сохранения природы или для предупреждения и предотвращения стихийных бедствий); за протеканием физических и химических реакций и т. д.

Несмотря на существенные отличия в этих сферах, сам процесс построения систем мониторинга, их архитектура и составные части практически идентичны вне зависимости от объекта контроля [19, 20].

С наступлением цифровой эры и развитием вычислительной техники и полупроводниковой электроники основой любых современных систем мониторинга (СМ) стал набор решений, приведенный в таблице.

Анализируя многообразие уже существующих СМ и областей, где они необходимы, можно заметить, что всем системам свойственны одни и те же элементы.

Чем более масштабна система мониторинга, тем полнее в ней проявляются все пункты: большой объем разнообразных датчиков, множество систем оцифровки и сбора данных, протяженные сети передачи, многоуровневое накопление и обработка измерений, наличие корневых серверов.

В системах малого размера (полуавтономные системы, мониторинг малого числа параметров, локальные системы) отдельные составляющие могут объединяться в пределах одного устройства. Например, автономная система измерения температуры: сигнал с датчика поступает сразу на АЦП ПЛК (аналогово-цифровой преобразователь программируемого логического контроллера), который одновременно является устройством сбора и обработки информации.

Типовые элементы систем мониторинга и их задачи

№	Элемент	Задача
1	Датчики	Прямое или косвенное измерение требуемых параметров с помощью оптимальных в данных условиях датчиков (с учетом среды функционирования, характеристик устройства и экономического фактора).
2	Преобразователи	Наиболее ранняя оцифровка измеренных датчиком значений для передачи сигнала в виде определенного цифрового кода с возможностью предварительной обработки (усреднения), распознавания ошибок в линии связи, обеспечения помехозащиты, восстановления значений.
3	Сеть	Передача оцифрованного сигнала в верхний уровень по оптимальным в заданных условиях каналам связи.
4	УСОД (устройства сбора и обработки данных)	Сбор и обработка данных со всех узлов в хранилище верхнего уровня*.
5	ПО	Программа или набор взаимосвязанных программных модулей, обеспечивающие обработку, накопление и передачу в интерфейс собираемой с датчиков информации, а также выполнение сопутствующих сервисно-административных задач (архивирование, резервирование, разграничение прав доступа)**.
6	Интерфейс	Выдача обработанной информации: — операторам — в виде значений/таблиц/графиков/интегральных сигналов; — системам верхних и смежных уровней — в запрашиваемом формате; — исполнительным механизмам в автоматическом или автоматизированном режиме — в виде управляющих воздействий.

\* Обычно между устройствами оцифровки сигнала и конечными серверами существуют промежуточные устройства сбора данных (несколько последовательных верхних уровней), а сами серверы четко выражены и являются вершиной структуры системы. Однако возможны и ситуации, когда средние уровни отсутствуют.

\*\* Совокупность программ зачастую распределена по нескольким устройствам (УСОДы нижнего и верхнего уровней, АРМы операторов).

Однако и в этом случае при ближайшем рассмотрении присутствуют все обозначенные выше черты — АЦП соединен с микроконтроллером (МК) внутренней цифровой шиной (I<sup>2</sup>C, ISP), разделение на уровни выполнено в пределах единого программного обеспечения (ПО) устройства. Программная функция обработки измерения играет роль устройства сбора данных, а функция сохранения результата в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) — корневого хранилища.

Что касается систем наблюдения за значимыми объектами, помимо центральных серверов, относящихся к СМ самого объекта, обычно существуют еще и системы регионального масштаба, куда должен передаваться сигнал со всех подконтрольных СМ.

И так вплоть до систем государственного уровня или мирового масштаба (при их наличии).

Существуют автономные/полуавтономные СМ, накапливающие информацию во внутренней памяти устройств. Зачастую они не имеют постоянной устойчивой связи с центральным хранилищем (из-за неблагоприятной для распространения сигнала среды, удаленности от корневого поста, для минимизации энергопотребления).

Но периодически выполняется считывание накопленных значений (оператором при подключении к блоку или после транспортировки блока на центральный пост и подключения на месте). Здесь также наблюдается разделение на уровни с наличием корневого центра, а канал связи характеризуется большой дискретностью снятия информации и необходимостью перемещения устройств, но он существует.

Оптические системы измерений протяженностью от 100 до 1000 м, несмотря на значительные покрываемые расстояния, не противоречат пункту о «ранней оцифровке», т. к. рассматриваются как единый датчик, на входе которого уже непосредственно размещен цифровой блок.

Проиллюстрируем структуру СМ на примере системы мониторинга искусственных конструкций (зданий и сооружений).

а) *Датчики*: акселерометры, датчики усилий и перемещений, инклинометры, прогибомеры, тензодатчики.

б) *Преобразователи*: АЦП на выходе аналоговых датчиков, преобразователи интерфейсов на выходе цифровых датчиков.

в) *Сеть*: промышленные сети и протоколы для объединения показаний со всех преобразователей и датчиков прямого подключения: 1-wire, CAN/CANopen, Ethernet (EtherCAT, IP, Modbus TCP), GSM/GPRS, LONworks, PLC, RS-232/422/485 (Modbus RTU/ASCII), Wi-Fi.

г) *УСОД*:

- промышленные устройства сбора данных (концентраторы);
- промежуточные и корневые серверы сбора и обработки данных.

д) *ПО*:

— ПО на промежуточных компьютерах, серверах (ядро) и автоматизированных рабочих местах (оператора) АРМх (интерфейс).

е) *Интерфейс*:

- АРМы с нативными приложениями либо web-интерфейсом;
- связь с региональными системами мониторинга верхнего уровня;
- sms- и e-mail-информаторы операторов, сообщающие о внештатных ситуациях.

## 2. Анализ подходов к построению систем мониторинга

При анализе практической реализации систем мониторинга конструкций можно выделить два диаметрально противоположных подхода к построению указанных систем.

Первый основывается на *интеграции множества решений различных производителей*.

Например, можно использовать датчики и устройства сбора данных разных производителей. Зачастую устройства сбора измерений с датчиков, сделанные разными фирмами, нельзя напрямую объединить в промышленную сеть и подключить к устройствам накопления. Необходимо использовать альтернативные пути (RS-485, Ethernet, Wi-Fi, GSM) либо дополнительные преобразователи с интерфейсом для единой сети.

На многих объектах наблюдается также комбинирование различного ПО для выполнения итоговой задачи — сбора, накопления, обработки и визуализации показаний датчиков.

Чаще всего используется заводское ПО либо драйверы производителя для опроса промежуточных устройств, т. к. протокол обмена с оборудованием может быть закрыт либо труднореализуем.

Второй подход базируется на *использовании решений одного производителя*.

Для построения масштабных систем мониторинга необходимо рационально выбрать компоненты системы. Предлагается использовать следующие критерии оценки:

- ремонтпригодность и возможность модернизации;
- оптимальность компоновки;
- оптимальность стоимости;
- оптимальность межкомпонентного взаимодействия.

Проведем анализ вышеописанных подходов к построению систем мониторинга по данным критериям.

### 1. Ремонтпригодность и возможность модернизации

**Подход 1.** Когда система изначально собирается из разрозненных компонентов, предполагается возможность замены некоторых частей на альтернативные. Например, в процессе ремонта и модернизации системы (или если какое-либо оборудование/ПО сняты с производства). На практике далеко не все системы позволяют подключать дополнительные компоненты других производителей. Такое возможно в том случае, если серверное ПО построено на базе SCADA-системы с расширенной поддержкой различных промышленных протоколов, а планируемые к использованию блоки выполнены с использованием одного из этих интерфейсов.

**Подход 2.** Модернизация затруднена вследствие фиксированной компоновки системы. Крайне ограничена вариативность в перечне оборудования, в основном определяющемся производителем системы.

## **2. Оптимальность компоновки**

**Подход 1.** Возможность применения в каждой составной части СМ лучших решений на рынке — наиболее точных датчиков, лучших АЦП, оптимальных промышленных сетей, стабильного ПО, передовых технологий постобработки информации.

**Подход 2.** Компоновка системы жестко фиксирована.

## **3. Оптимизация стоимости**

**Подход 1.** В условиях ограниченного бюджета возможность подключить и использовать более дешевые элементы там, где это не столь критически важно, позволяет вложить сэкономленные средства в основные компоненты СМ. Отрицательной стороной подобных составных систем обычно становится проблема с запуском и корректной работой всего комплекса в целом.

**Подход 2.** Стоимость практически полностью определяется производителем. Если нет возможности выбрать оборудование или ПО, итоговая стоимость проекта может оказаться завышенной. Ведь почти всегда на рынке присутствует более выгодное альтернативное решение, но его нельзя использовать в условиях системы единого производителя.

## **4. Оптимальность межкомпонентного взаимодействия**

**Подход 1.** Реализованные разными производителями составные части не тестируются в заводских условиях на возможность полноценной и бесперебойной совместной работы.

Наладка, сбор системы воедино и устранение проблем (конфликт устройств на шине, сопряжение драйверов, организация обмена между программными частями) полностью производится разработчиками итоговой системы и службы ввода в эксплуатацию с дальнейшей поддержкой. Зачастую можно объединить в одну систему практически любые аппаратные и программные решения независимых производителей. Но если изготовитель не предусмотрел интерфейсы для взаимодействия с внешними компонентами, то дальнейшая интеграция может быть выполнена избыточными средствами. Например, использование неподходящего/устаревшего интерфейса в промышленном оборудовании приводит к необходимости установки дополнительных преобразователей. Отсутствие в ПО средств для межпроцессного взаимодействия или использование специфичных технологий ведет к созданию различных дополнительных программных прослоек.

Здесь каждый дополнительный элемент (оборудование/программный модуль) привносит в общую систему негативные факторы.

Среди них:

- удорожание итоговой системы;
- увеличение стоимости поддержки;
- повышение риска отказа системы (поломка оборудования, сбой в ПО);
- внесение дополнительных источников ошибок в систему (сбой в оборудовании, ошибки в ПО).

Полноценным SCADA-системам верхнего уровня эти недостатки свойственны в меньшей степени, т. к. за годы развития они обычно дополняются большим количеством модулей обмена с широким классом оборудования.

**Подход 2.** Обеспечивается слаженная работа компонентов за счет тестирования в заводских условиях.

Не ожидается значительных трудностей при развертывании системы, что, впрочем, не гарантирует отсутствия проблем при неудачной архитектуре системы или при использовании в неблагоприятных условиях (промышленные радиоэлектронные помехи, нестабильность питания, повышенная влажность, критический диапазон температур). Имеется согласованная документация по всем элементам системы, есть возможность получить консультацию по любому аспекту у единого производителя. Однако на практике нередки случаи, когда сотрудникам местных филиалов компании не хватает компетентности для решения возникших у заказчика проблем; документация недостаточно полна либо местами противоречива.

### **3. Рекомендации по рациональному подходу к проектированию систем мониторинга**

При проектировании новой системы необходимо учитывать вышеописанные аспекты.

Разработка всех уровней (серверное ПО — УСОД — преобразователи — датчики) дает преимущество на конечном этапе, позволяя получить стабильную согласованную систему. При этом нужно принять во внимание, что стоимость разработки и последующего доведения системы до рабочего состояния существенно возрастает с каждым реализуемым уровнем.

Для начального этапа характерна также высокая сложность поддержки, т. к. нужно подготовить документацию на все компоненты системы. Чем больше элементов, тем выше нагрузка на технических писателей и отдел техподдержки пользователей.

Всегда есть вероятность, что на рынке появится устройство или ПО, которое превосходит аналогичный фрагмент разрабатываемой системы. Например, лучшие преобразователи, более эффективная сеть, усовершенствованные УСОД, более функциональное ПО. Подобные преимущества могут заставить отказаться от использования системы в пользу универсальной SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition — система диспетчерского управления и сбора данных).

С другой стороны, возможна разработка не замкнутой (полностью проприетарной) системы, а более универсальной открытой платформы, обеспечивающей подключение к серверному ПО открытых библиотек, реализующих основные промышленные протоколы, и драйверов устройств сбора. Это позволит подключать оборудование сторонних производителей.

Чем ближе система по возможностям к SCADA, тем выше ее конкурентные преимущества.

1. На уже существующих объектах мониторинга со временем возникает необходимость модернизации системы для удовлетворения новых требований и решения новых задач. Используемое оборудование в большинстве своем (особенно датчики) еще находится в рабочем состоянии и если и требует ремонта, то небольшого. Более того, сами датчики, преобразователи и устройства сбора технологически не устаревают. Если они уже установлены, то свою функцию — измерение/преобразование/передачу данных — выполняют одинаково и в момент установки и через несколько лет эксплуатации (при отсутствии поломок).

2. Сети передачи данных проложены, точки измерений определены, датчики смонтированы, устройства сбора сопряжены с сервером. Если нет потребности в дополнительных измерениях и условия эксплуатации не меняются, созданная измерительная сеть может существовать годами (при надлежащем контроле — десятилетиями). И если к аппаратной части новых требований зачастую не предъявляется, то программная, напротив, должна покрывать всё больший класс задач. Могут потребоваться новые типы выгрузок и форматы экспорта данных, иная форма представления и визуализации работы системы (2D- и 3D-схемы), возможность прогнозирования или расширенного и перекрёстного анализа трендов.

В этих условиях создание SCADA-подобной системы с возможностью подключения стороннего оборудования представляется оптимальной задачей: открывается перспектива замены ПО на существующих объектах новым.

3. С другой стороны, постоянно вводятся в эксплуатацию новые объекты. Существует потребность в разворачивании систем мониторинга с нуля. Здесь создание универсальной платформы позволяет внедрить систему, даже если какой-либо из других уровней архитектуры (датчики, преобразователи, сеть, УСОД) лучше у других производителей.

Таким образом, оптимальным вариантом системы будет комплекс, максимально приближенный к SCADA-системе:

В первую очередь разрабатывается ПО верхнего уровня с возможностью подключения стороннего оборудования. Это открывает доступ и к существующим объектам (в рамках модернизации), и к новым, но уже либо с проектируемым оборудованием, либо с приборами других производителей.

УСОД также нужно проектировать с учетом возможности коммуникации со сторонними компонентами. Но поскольку УСОД является промежуточным компонентом между ПО/интерфейсом и сетью/преобразователями, он должен обладать широким набором интерфейсов на входе и выходе.

Преобразователи и сеть при создании системы удобно рассматривать в совокупности. Преобразователи не являются полноценными промышленными компьютерами, поэтому не имеют большого количества интерфейсов, обычно ограничиваясь одним.

При проектировании сеть и преобразователь прорабатываются совместно. Для этого выбирается оптимальный тип промышленной сети и соответствующий интерфейс преобразователя.

#### **4. Концепция универсальной платформы непрерывного мониторинга**

На основании анализа определена оптимальная концепция проектирования системы непрерывного мониторинга состояния технических объектов.

1) Проектирование цифрового программно-аппаратного комплекса: разрабатываются исключительно цифровые программно-аппаратные средства — преобразователи, сеть, УСОД, серверное ПО, интерфейсы. Уровень датчиков как устройств, содержащих аналоговые элементы, в достаточном количестве представленных на рынке и не подверженных быстрому устареванию, исключается из процесса разработки.

2) Обеспечение универсальности и расширяемости проектируемых компонентов:

— необходима поддержка работы со сторонними изделиями для возможности интегрирования изобретений в существующие системы или оптимизации расходов при создании новых систем;

— расширение функциональности системы происходит за счет подключения сторонних решений, разрабатывать которые собственными силами не планируется.

3) создание трех основных макроблоков системы (преобразователи, УСОД, ПО) должно производиться совместно. При этом необходимо соблюдать базовые принципы:

— требуется постоянное координирование действий при создании основных компонентов системы;

— приоритет при распределении ресурсов отдается ПО как наиболее универсальному элементу комплекса, позволяющему осуществить раннее внедрение за счет интеграции с уже созданными системами.

4) Использование Ethernet в качестве промышленной сети целесообразно в силу следующих преимуществ:

— широкого распространения технологии и оборудования;

— недорогих промышленных микросхем;

— обширного ассортимента повторителей;

— наличия активных коммутаторов и разветвителей для построения шин типа «звезда»;

— наличия преобразователей для всех видов интерфейсов — RS232/422/485-Ethernet, USB-Ethernet, «Оптоволокно-Ethernet» и др.;

— высокой помехоустойчивости и скорости передачи данных;

— возможности передавать произвольный поток данных.

Разработка и внедрение систем согласно описанной концепции позволит значительно повысить эффективность мониторинга инфраструктурных объектов и качество технического обслуживания.

### Заключение

Безопасность эксплуатации сложных технических систем во многом определяется качеством прогнозов, построенных на основе диагностической информации о состоянии объекта. Информация, получаемая на основании периодической диагностики, не дает возможности предупреждать развитие опасных негативных процессов, которые приведут к отказу. Развитие средств и методов диагностики позволило перейти к следующему уровню системы контроля — системам непрерывного мониторинга технического состояния объекта.

Такие системы являются источниками наиболее полной диагностической информации. Качество и достоверность получаемых данных напрямую зависят от структуры системы мониторинга и применяемых технических решений, которые должны соответствовать задачам.

Предложенная концепция позволяет создать универсальную платформу для осуществления мониторинга инфраструктурных объектов, отвечающую современным требованиям рынка, с возможностью ее масштабирования вплоть до применения на крупнейших уникальных сооружениях городской, промышленной и транспортной инфраструктуры.

### Библиографический список

1. *Ефанов Д. В.* Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : монография / Д. В. Ефанов. – СПб. : ПГУПС, 2016. – 171 с.
2. *Belyi A. A.* Structural Health and Geotechnical Monitoring During Transport Objects Construction and Maintenance / A. A. Belyi, E. S. Karapetov, Yu. I. Efimenko // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 189. – P. 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.024>
3. *Smarsly K.* Autonomous Monitoring of Masonry Dams Based on Multi-Agent Technology / K. Smarsly, D. Hartmann // *The 4th Congress on Dams, Struga, Republic of Macedonia*, 28–30 September 2017. – 2017. – P. 1–10.
4. *Соколов С. А.* Методика прогнозирования разрушения сварных металлических конструкций подъемно-транспортных машин / С. А. Соколов, Д. Г. Плотников // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. – 2015. – № 12. – С. 22–28.
5. *Sokolov S.* Analysis of the Fatigue Strength of Welds in Terms of Local Stress / S. Sokolov // *Russian Engineering Research*. – 2018. – Vol. 38. – № 3. – P. 151–156. <https://doi.org/10.3103/S1068798X18030218>
6. *Sokolov S.* Local criterion for strength of elements of steel-work. *Mechanical Engineering Research and Education* / S. Sokolov, A. Grachev // *International Review of Mechanical Engineering*. – 2018. – Vol. 12. – № 5. – P. 448–453.
7. *Shlepetinsky A. Yu.* Trajectory and growth speed of fatigue cracks due to poor weld fusion in a weld joint / A. Yu. Shlepetinsky, K. P. Manzhula, A. G. Savelyev // *Transport Engineering and Technology*. – 2019. – № 13. – P. 46.

8. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2016. – 28 с.
9. Сапожников В. В. Основы теории надежности и технической диагностики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. – СПб. : Издательство «Лань», 2019. – 588 с.
10. Efanov D. Monitoring System of Vibration Impacts on the Structure of Overhead Catenary of High-Speed Railway Lines / D. Efanov, G. Osadchy, D. Sedykh, D. Pristensky, D. Barch // Proceedings of 14<sup>th</sup> IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, October 14–17. – 2016. – P. 201–208. <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2016.7807691>
11. Efanov D. Development of Rail Roads Health Monitoring Technology Regarding Stressing of Contact-Wire Catenary System / D. Efanov, G. Osadchy, D. Sedykh // Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, Russia, May 19–20. – 2016. – P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911431>
12. Belyi A. Development of Automation Systems at Transport Objects of MegaCity / A. Belyi, D. Shestovitskii, V. Myachin, D. Sedykh // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, Georgia, September 13–16. – 2019. – P. 201–206. <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2019.8884382>
13. Belyi A. Main Solutions of Structural Health Monitoring in Managing the Technical Condition of Transport Objects / A. Belyi, D. Shestovitskii, E. Karapetov, D. Sedykh, V. Linkov // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, Georgia, September 13–16. – 2019. – P. 213–218. <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2019.8884435>.
14. Efanov D. V. Permanent Monitoring Systems of the Contact-Wire of Railroad Catenary : the Main Tasks of Implementation / D. V. Efanov, G. V. Osadchy, D. V. Barch, A. Belyi // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, Georgia, September 13–16. – 2019. – P. 484–487. <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2019.8884442>.
15. Осадчий Г. В. Мониторинг технического состояния раздвижной крыши стадиона «Санкт-Петербург Арена» / Г. В. Осадчий, А. А. Белый, Д. В. Ефанов, Д. А. Шестовицкий // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2018. – № 6. – С. 10–24. – <https://doi.org/10.18720/CUBS.69.2>.
16. Smarsly K. Artificial Intelligence in Structural Health Monitoring International Workshop on Computing in Civil Engineering / K. Smarsly, K. Lehner, D. Hartmann. – 2017. – P. 111–118.
17. Heidmann L. Smart Point Machines: Paving the Way for Predictive Maintenance / L. Heidmann // Signal+Draht. – 2018. – Iss. 9. – P. 70–75.
18. Luckey D. Artificial intelligence techniques for smart city applications / D. Luckey, H. Fritz, D. Legatiuk, K. Dragos, K. Smarsly // Proceedings of the International ICCCBE and CIB W78 Joint Conference on Computing in Civil and Building Engineering 2020, Sao Paulo, Brazil, 06.02.2020. – 2020. – P. 1–14.
19. Белый А. А. Концепция мониторинга искусственных сооружений Санкт-Петербурга / А. А. Белый, А. А. Белов, Г. В. Осадчий, К. Ю. Долинский // Дороги : инновации в строительстве. – 2018. – № 71. – С. 58–62.
20. Белый А. А. Концепция мониторинга искусственных сооружений Санкт-Петербурга (окончание) / А. А. Белый, А. А. Белов, Г. В. Осадчий, К. Ю. Долинский // Дороги : инновации в строительстве. – 2018. – № 72. – С. 58–62.

**G.V. Osadchiy**

ООО NTTs "Kompleksnyye sistemy monitoringa" [Integrated Monitoring Systems], Saint Petersburg

**A.V. Shinkarenko**

ООО RoboTeC, Saint Petersburg

**D.G. Plotnikov****A.V. Banite**

Higher School of Transport

Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg

## **STRUCTURAL PRINCIPLES OF A UNIVERSAL PLATFORM FOR CONTINUOUS MONITORING OF THE TECHNICAL CONDITION OF INFRASTRUCTURE FACILITIES**

The article discusses the development of monitoring technologies for industrial and transport infrastructure facilities. The importance of monitoring systems for improving the engineering facility maintenance technologies, as well as the ability to determine pre-failure conditions, predict further changes, and determine the residual operating life, is noted. The authors analyze approaches to the implementation of monitoring systems from the point of view of an optimum configuration. A list of criteria for evaluating the efficacy of the considered design approaches is provided. Recommendations are given for rational designing of monitoring systems and the optimal sequence of actions is determined for creating a universal platform for continuous monitoring of the condition of engineering facilities. The concept of a universal platform for continuous monitoring for infrastructure facilities in the construction, transport and industry is proposed.

Technical diagnostics, monitoring system, continuous monitoring, technical condition, infrastructure facilities

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-484-498

### **References**

1. *Efanov D. V.* (2016) Funktsional'nyy kontrol' i monitoring ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: monografiya [Functional control and monitoring of railway automation and remote control devices: monograph]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 171, pp. (In Russian)
2. *Belyi A. A., Karapetov E. S. & Efimenko Yu. I.* (2017) Structural Health and Geotechnical Monitoring During Transport Objects Construction and Maintenance. *Procedia Engineering*, vol. 189, pp. 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.024>
3. *Smarsly K. & Hartmann D.* (2017) Autonomous Monitoring of Masonry Dams Based on Multi-Agent Technology. The 4th Congress on Dams, Struga, Republic of Macedonia, 28–30 September 2017, pp. 1–10.
4. *Sokolov S. A. & Plotnikov D. G.* (2015) Metodika prognozirovaniya razrusheniya svarnykh metallicheskih konstruktsiy pod'yemno-transportnykh mashin [Methodology for predicting the destruction of welded metal structures of handling machines]. *Remont. Vostanovlenie. Modernizatsiya* [Repair, Reconditioning, Modernization], no. 12, pp. 22–28. (In Russian)

5. Sokolov S. (2018) Analysis of the Fatigue Strength of Welds in Terms of Local Stress. *Russian Engineering Research*, vol. 38, no. 3, pp. 151–156. [https://doi.org: 10.3103/S1068798X18030218](https://doi.org/10.3103/S1068798X18030218)
6. Sokolov S. & Grachev A. (2018) Local criterion for strength of elements of steel-work. Mechanical Engineering Research and Education. *International Review of Mechanical Engineering*, vol. 12, no. 5, pp. 448–453.
7. Shlepetinsky A. Yu., Manzhula K. P. & Savelyev A. G. (2019) Trajectory and growth speed of fatigue cracks due to poor weld fusion in a weld joint. *Transport Engineering and Technology*, no. S13, pp. 46.
8. (2016) GOST 27.002–2015 Nadezhnost' v tekhnike (SSNT). Terminy i opredeleniya [Dependability in technics. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 28 p. (In Russian)
9. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. & Efanov D. V. (2019) Osnovy teorii nadezhnosti i tekhnicheskoy diagnostiki [Reliability and technical diagnostics theory fundamentals]. Saint Petersburg, Lan' Publishing House, 588 p. (In Russian)
10. Efanov D., Osadchy G., Sedykh D., Pristensky D. & Barch D. (2016) Monitoring System of Vibration Impacts on the Structure of Overhead Catenary of High-Speed Railway Lines. *Proceedings of 14<sup>th</sup> IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016)*, Yerevan, Armenia, October 14–17, pp. 201–208. [https://doi.org: 10.1109/EWDTS.2016.7807691](https://doi.org/10.1109/EWDTS.2016.7807691)
11. Efanov D., Osadchy G. & Sedykh D. (2016) Development of Rail Roads Health Monitoring Technology Regarding Stressing of Contact-Wire Catenary System. *Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Chelyabinsk, Russia, May 19–20, pp. 1–5. [https://doi.org: 10.1109/ICIEAM.2016.7911431](https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911431)
12. Belyi A., Shestovitskii D., Myachin V. & Sedykh D. (2019) Development of Automation Systems at Transport Objects of MegaCity. *Proceedings of 17<sup>th</sup> IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019)*, Batumi, Georgia, September 13–16, pp. 201–206. [https://doi.org: 10.1109/EWDTS.2019.8884382](https://doi.org/10.1109/EWDTS.2019.8884382)
13. Belyi A., Shestovitskii D., Karapetov E., Sedykh D. & Linkov V. (2019) Main Solutions of Structural Health Monitoring in Managing the Technical Condition of Transport Objects. *Proceedings of 17<sup>th</sup> IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019)*, Batumi, Georgia, September 13–16, pp. 213–218. [https://doi.org: 10.1109/EWDTS.2019.8884435](https://doi.org/10.1109/EWDTS.2019.8884435)
14. Efanov D. V., Osadchy G., Barch D. V. & Belyi A. (2019) Permanent Monitoring Systems of the Contact-Wire of Railroad Catenary: the Main Tasks of Implementation. *Proceedings of 17<sup>th</sup> IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019)*, Batumi, Georgia, September 13–16, pp. 484–487. [https://doi.org: 10.1109/EWDTS.2019.8884442](https://doi.org/10.1109/EWDTS.2019.8884442)
15. Osadchy G. V., Belyi A. A., Efanov D. V. & Shestovitskiy D. A. (2018) Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya razdvizhnoy kryshi stadiona "Sankt-Peterburg Arena" [Monitoring of technical condition of the St. Petersburg Arena Stadium Sliding Roof]. *Construction of Unique Buildings and Structures*, no. 6, pp. 10–24. [https://doi.org: 10.18720/CUBS.69.2](https://doi.org/10.18720/CUBS.69.2). (In Russian)
16. Smarsly K., Lehner K. & Hartmann D. (2017) Artificial Intelligence in Structural Health Monitoring International Workshop on Computing in Civil Engineering, pp. 111–118.
17. Heidmann L. (2018) Smart Point Machines: Paving the Way for Predictive Maintenance. *Signal+ Draht*, iss. 9, pp. 70–75.
18. Luckey D., Fritz H., Legatiuk D., Dragos K. & Smarsly K. (2020) Artificial intelligence techniques for smart city applications. *Proceedings of the International ICCCB E and CIB W78 Joint Conference on Computing in Civil and Building Engineering 2020*, Sao Paulo, Brazil, 06.02.2020, pp. 1–14.

19. *Belyi A. A., Belov A. A., Osadchy G. V. & Dolinskiy K. Yu.* (2018) Kontseptsiya monitoringa iskusstvennykh sooruzheniy Sankt-Peterburga [Monitoring concept for artificial structures in Saint Petersburg]. *Dorogi: innovatsii v stroitel'stve* [Roads: Innovation in Construction], no. 71, pp. 58–62. (In Russian)
20. *Belyi A. A., Belov A. A., Osadchy G. V. & Dolinskiy K. Yu.* (2018) Kontseptsiya monitoringa iskusstvennykh sooruzheniy Sankt-Peterburga (okonchaniye) [Monitoring concept for artificial structures in Saint Petersburg (end)]. *Dorogi: innovatsii v stroitel'stve* [Roads: Innovation in Construction], no. 72, pp. 58–62. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Д. В. Ефановым  
Поступила в редакцию 30.03.2020, принята к публикации 17.08.2020*

*ОСАДЧИЙ Герман Владимирович* — технический директор ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга»

e-mail: osgerman@mail.ru

*ШИНКАРЕНКО Алексей Владимирович* — ведущий инженер-программист ООО «Робо-Тек»

e-mail: av-shinkarenko@robo-tec.ru

*ПЛОТНИКОВ Дмитрий Георгиевич* — кандидат технических наук, доцент Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

e-mail: plotnikov\_dg@spbstu.ru

*БАНИТЕ Аушра Владовна* — аспирант Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

e-mail: banite\_av@spbstu.ru

© Осадчий Г. В., Шинкаренко А. В., Плотников Д. Г., Баните А. В., 2020

УДК 656.022.5

**А. М. Горбачев, канд. техн. наук**

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

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АПЕРИОДИЧЕСКИХ МАРШРУТНЫХ РАСПИСАНИЙ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА**

Приведен анализ научных работ и моделей маршрутных расписаний движения. На основе существующих работ составлена классификация расписаний движения по признаку повторяемости значений времени. Представлено описание сети городского транспорта в виде мультиграфа. Рассмотрен переход от мультиграфа сети городского транспорта к сети событий, характеризующих процесс движения. Формализованы ограничения на значения времени для решения основной задачи теории расписаний. Предложенная формализация учитывает особенности планирования организации движения в России и других странах на постсоветском пространстве. Представлена математическая модель аperiodических маршрутных расписаний движения наземного городского электрического транспорта на основе теории линейного программирования. Обоснован выбор критерия оптимизации при решении основной задачи теории расписаний. В качестве критерия оптимизации при решении основной задачи теории расписаний используется равномерность интервалов движения. В статье имеется табличная форма расписаний, принятая в городском транспорте для описания процессе движения при отсутствии значимых событий на линии. Приведен пример внедрения представленной в данной работе модели в программном обеспечении системы автоматизированного проектирования расписаний движения трамваев и троллейбусов в составе автоматизированной системы управления городским электрическим транспортом, используемой в настоящее время в Санкт-Петербурге для построения расписаний трамваев и троллейбусов. Продемонстрированы примеры расчета диаграмм интервалов по отправлению транспортных средств для демонстрации функции выравнивания интервалов движения. В заключении перечислены достоинства предложенной модели аperiodических маршрутных расписаний движения наземного городского электрического транспорта и дальнейшие пути ее развития.

Городской транспорт, наземный электрический транспорт, маршрутное расписание, аperiodическое расписание, линейная комбинация, система автоматизированного проектирования расписаний движения трамваев и троллейбусов, автоматизированная система управления городским электрическим транспортом

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-499-517

### **Введение**

Современный городской электрический транспорт обеспечивает перевозки большого объема пассажиропотоков экологичным способом. Основной доку-

мент, регламентирующий движение, — маршрутное расписание. Составление его — трудоемкий процесс, на который существенное влияние оказывает человеческий фактор. А конкретно — уровень подготовки инженера — составителя расписания.

В зависимости от наличия или отсутствия заданного интервала времени *Period*, через который события внутри расписания повторяются, можно ввести классификацию расписаний движения, разделив их на две группы: периодические (циклические) и аperiodические.

Периодические (они же циклические, ритмические) расписания — это такие расписания движения, события в которых повторяются через заданный промежуток времени *Period*. Под событиями в данном случае понимается время прибытия ( $T_{Arr}$ ) и отправления с контрольных точек ( $T_{Dep}$ ). В качестве контрольных точек в общем случае могут выступать остановки, узловые точки (например перекрестки) и конечные станции. Математические модели, положенные в основу построения периодических расписаний движения в Европе и США, подробно рассмотрены в различных работах для городского [1–4], железнодорожного [5–6] и авиатранспорта [7–8], обзор которых приведен в [9].

Аperiodические расписания не имеют заданного промежутка времени *Period*, через который повторяются события, происходящие в расписании.

Соответственно, для последних интервал между отправлениями транспортных средств является величиной расчетной, а не заданной. Общий обзор математических моделей расписаний приведен в [9].

В большинстве моделей расписаний движения время — величина дискретная [10]. В России, как правило, дискретой считается одна минута. Ниже рассматриваются только целочисленные модели.

Однако рассмотренные авторами модели не учитывают некоторые исторически сложившиеся особенности организации движения на территории России и стран ближнего зарубежья.

## **1. Особенности организации движения наземного городского электрического транспорта в России и странах ближнего зарубежья**

Важнейшей особенностью организации работы наземного городского транспорта в большинстве городов России является движение в общем потоке с автомобильным транспортом (при отсутствии выделенных полос на большинстве участков), а также наличие пересечений в одном уровне с автомобильным транспортом даже при наличии выделенных полос. Соответственно, время пробега городского транспорта по трассе маршрута в общем случае существенно колеблется в зависимости от периода суток, прежде всего из-за многочисленных заторов в движении. При этом в большинстве случаев технология построения расписаний предполагает дискретное изменение времени пробега по периодам суток [10]. При решении задачи синтеза расписаний эти технологические

особенности приводят к невозможности решения задачи обратного отсчета для случая, когда граница периода суток (переходное время) находится внутри рейса. Под задачей обратного отсчета понимается задача расчета времени прибытия по времени отправления.

Учитывая большое влияние на время пробега, которое оказывают заторы в движении, зависящие от времени суток, время торможения и разгона играет несущественную роль и входит в общее время пробега по перегону в качестве константы.

Как правило, по условиям технологии организации движения на городском транспорте водитель не может самостоятельно принимать решение об изменении скорости и должен стремиться к полному соблюдению регламентированных значений. Время хода задается при составлении маршрутного расписания.

Следующая важная особенность — возможность закрепления транспортных средств за бригадами водителей и кондукторов. Это вызвано как особенностями зачастую устаревшего подвижного состава, работающего на линии, так и деталями организации движения на маршруте. Соответственно, возникает простой трамвая, троллейбуса или автобуса во время обеденного перерыва водителя и кондуктора. Существование длительных обеденных стоянок делает применение периодических расписаний неоправданным из-за невозможности сократить длительность обычных (не связанных с перерывом на обед) стоянок. А при задании одинаковой длительности большая продолжительность стоянок на конечных станциях привела бы к сокращению времени полезной работы транспортных средств непосредственно на линии.

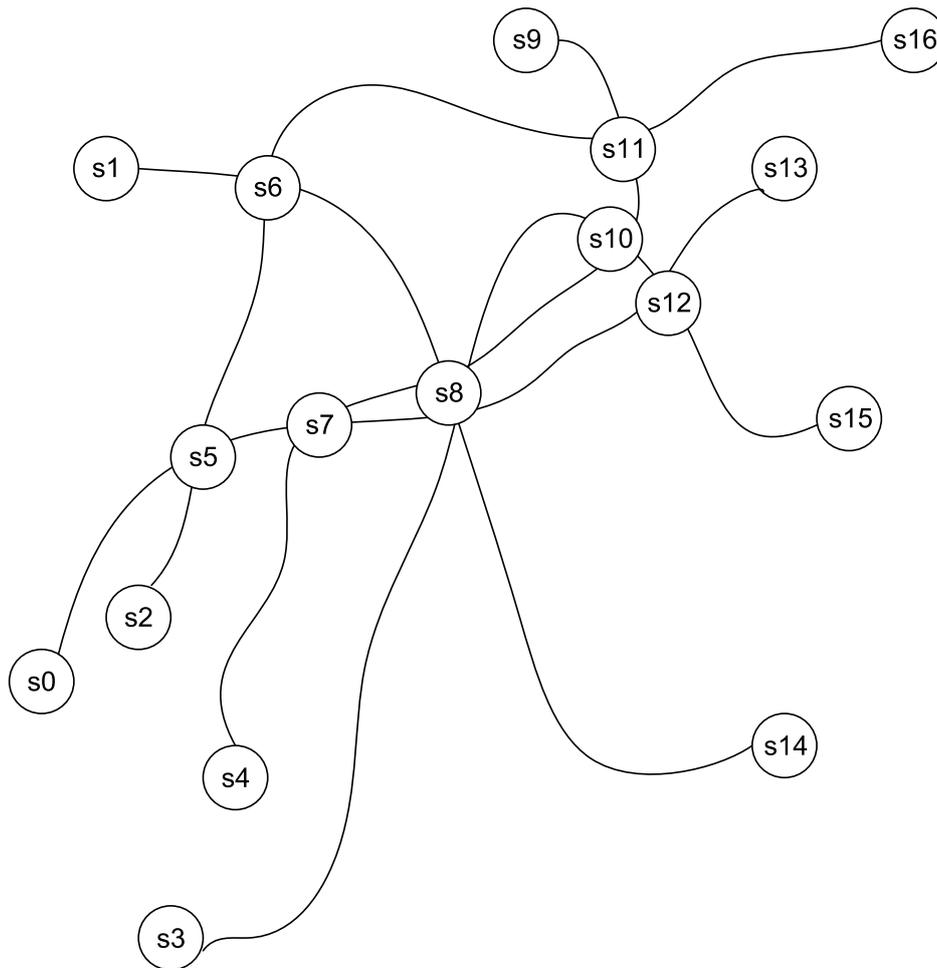
Сеть городского транспорта (public transport network) может быть представлена в виде мультиграфа  $PTN = (CP; P)$ . Он состоит из конечного множества контрольных точек,  $cp_i \in \{CP\}$ , и конечного множества отрезков, соединяющих эти контрольные точки  $p \in \{P\}$ , где  $p_i \in \{cp_p, cp_{i+p}\}$ , т.е. каждый отрезок соединяет две соседние точки, между которыми возможно движение транспорта по трассе (см. рис. 1).

Дополнительной особенностью организации движения в России можно считать принятие стоянок на промежуточных остановках за константы и включение длительности этих стоянок во время хода по трассе маршрута. Это приводит к возможности выравнивания интервалов только с помощью регулирования стоянок на конечных пунктах (конечных станциях).

С учетом этой особенности граф  $PTN = (CP; P)$  может быть представлен как граф  $PTN = (EndSt; P)$ , что подробно рассмотрено в [12].

## 2. Основная задача теории расписаний движения

Под основной в теории расписаний движения понимается задача определения значений времени при известной структуре маршрутного расписания. Это значит, что на основе известного числа рейсов для каждой части наряда (выхода на линию) рассчитываются значения времени с учетом набора ограничений.



**Рис. 1.** Пример мультиграфа сети городского транспорта PTN

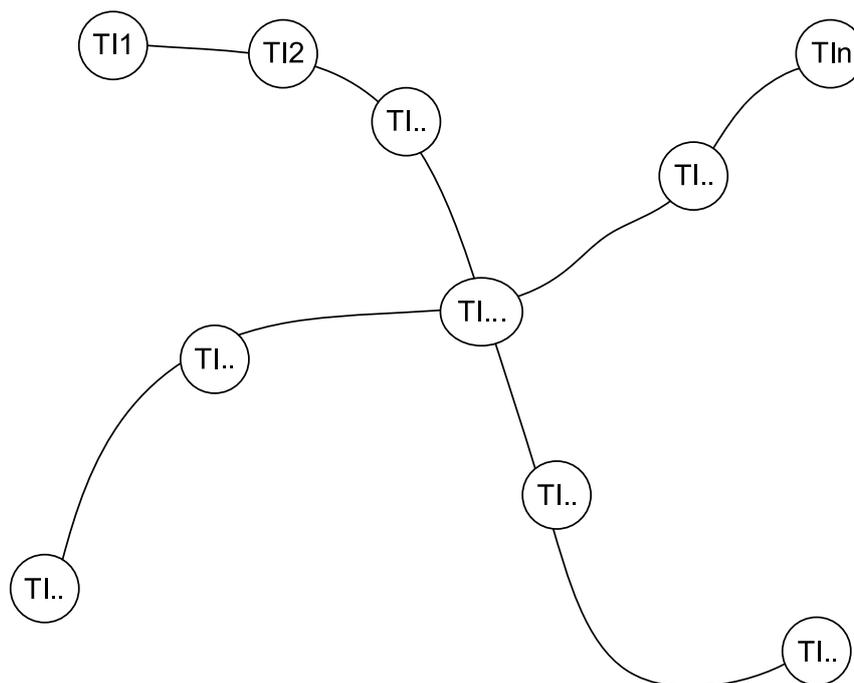
Возможная формализация постановки основной задачи для аperiodических расписаний с учетом ранее приведенных особенностей организации движения приведена в [9].

Для формализации выполнен переход от мультиграфа сети городского транспорта к сети событий (EAN — Event Activity Network). Для EAN каждый из узлов представлен одним независимым значением времени (см. рис. 2).

Для такой сети событий введены следующие обозначения:

$$EAN = \{TI, [U, V]\}, \quad (1)$$

где  $\{TI\}$  — множество элементов  $TI_i$ , каждый элемент — независимо изменяемое значение времени;  $i = 1..n$  — порядковый номер независимо изменяемого значения времени, который изменяется от 1 до  $n$ , где  $n$  — число независимых параметров (отправлений с диспетчерских станций);  $\{U\}$ :  $U_i = D_{\min(i, i+1)}$  — минимальный промежуток времени, необходимый для перехода из состояния  $i$  в состояние  $i+1$  (ограничение снизу на переход в новое состоя-



**Рис. 2.** Пример графа сети событий EAN

ние);  $\{V\}$ :  $V_i = D_{\max(i, i+1)}$  — максимальный промежуток времени, в течение которого возможен переход из состояния  $i$  в состояние  $i+1$  (ограничение сверху на переход в новое состояние).

Учитывая, что длительности пребывания транспортных средств на остановках общественного транспорта согласно действующей технологии не подлежат регулированию, в качестве независимых значений времени, которые должны быть рассчитаны по условиям задачи, могут выступать прибытия или отправления с конечных станций, между которыми осуществляется движение.

Движение по маршруту в абсолютном большинстве случаев осуществляется между двумя конечными станциями. Тогда возможны два случая. Интервалы движения могут быть отрегулированы за счет одной из станций (одна станция диспетчерская (распорядительная), другая обратная, т. е. контрольный пункт без стоянки или с жестко фиксированной длительностью стоянки). Либо интервалы движения могут быть отрегулированы за счет стоянок на обеих конечных станциях (обе станции являются диспетчерскими). В связи с популярностью первого варианта рассмотрим случай с одной диспетчерской станцией. Модель, представленная в [3], не предполагает возможности оптимизации маршрутного расписания и не учитывает факта деления стоянок на конечных станциях на типы по признаку зависимости от других параметров.

Здесь предлагается изменить модель представления EAN, предложенную в [11], для учета особенностей организации движения на городском транспорте, приведенных выше.

### **3. Обоснование выбора критерия эффективности маршрутного расписания**

В большинстве существующих теоретических моделей расчета расписаний в качестве критерия качества расписаний принимается минимизация суммарного времени всех пассажиров, затрачиваемого на перемещение в транспорте внутри по транспортной сети *PTN*. В общем случае это будет верным критерием.

Сегодня разработаны многочисленные модели оптимизации аperiodических расписаний, основанные на использовании этого критерия.

Однако для решения задачи минимизации суммарного времени, затрачиваемого на перемещение всеми пассажирами, необходимо знать точные матрицы корреспонденций для учета перемещения людей внутри *PTN*.

В отечественной практике актуальная информация в большинстве случаев отсутствует, поскольку подвижной состав не оборудован датчиками подсчета пассажиропотока, а предприятия-перевозчики не имеют возможности часто проводить натурные обследования. Поэтому в качестве критерия качества аperiodических маршрутных расписаний выбирается другой, более доступный для расчета на практике. За него принимается равномерность изменения интервалов отправления транспортных средств. Так обеспечивается приближение аperiodических расписаний к периодическим, более удобным для пассажиров.

С учетом приведенных выше особенностей, в т. ч. связанных с необходимостью использования критерия равномерности изменения интервалов, можно сделать вывод: многочисленные существующие модели аperiodических расписаний не учитывают практических особенностей организации движения в России. Требуется разработка отдельной модели аperiodических маршрутных расписаний движения.

### **4. Классификация значений времени для модели аperiodических расписаний движения**

Традиционно расписания движения, в которых отсутствуют события на линии (время остановок входит в пробеги по трассе, а скорости однозначно определяются матрицей времен хода), представляет собой таблицу с данными о прибытии и отправлении транспортных средств на линии, а также о выходе транспортных средств на линию из парков (депо) и возвращении в них. Данные таблиц 1 и 2, как и на рисунке 3, — примеры таких расписаний.

Рассмотрим расписания с одной диспетчерской (распорядительной) станцией. В таких расписаниях стоянка на одной конечной станции, называемой оборотной (или контрольным пунктом), жестко фиксирована в исходных данных. Стоянка на другой конечной станции, называемой диспетчерской (или оборотной), — величина расчетная.

Для задачи построения модели аperiodических расписаний движения с учетом равномерности интервалов отправления транспортных средств нужно классифицировать множество значений времени, определенное выше по признаку независимости изменения времени.

В качестве независимо изменяемых значений времени выделим несвязанные между собой значения времени (вектор  $[TI]$ ), на которые влияют только ограничения  $\{V\}$  и  $\{U\}$ .

При выравнивании интервалов по времени отправления с конечных станций такими значениями будут времена отправления с диспетчерской конечной станции  $[T_{DepDisp}]$ .

Остальные значения времени будут зависимыми параметрами.

К зависимым значениям времени первого порядка отнесем множество значений времени, характеризующее остальные события, происходящие на линии. В него будут входить время прибытия на обе конечные станции и время отправления с оборотной конечной станции.

К зависимым значениям времени второго порядка будут относиться прибытия в парк (депо) и отправления из парка (депо). Эти значения времени характеризуют события, происходящие вне движения на линии.

## 5. Формирование списков ограничений

Рассмотрим формирование множества ограничений. В рассматриваемой модели множества ограничений  $\{V\}$  и  $\{U\}$  будут однозначно определяться векторами  $[TI_{min}]$  и  $[TI_{max}]$ , обозначающими минимальные и максимальные значения времени для каждого значения  $[TI]$ .

Каждому элементу  $[TI]$  соответствует по одному элементу из  $[TI_{min}]$  и  $[TI_{max}]$ . Все элементы  $[TI_{min}]$  и  $[TI_{max}]$  являются значениями времени.

Таким образом, для каждого значения  $TI_i$  из  $[TI]$  будет справедливо (2):

$$TI_{imin} \leq TI_i \leq TI_{imax}, \quad (2)$$

где  $i$  — целое число от 1 до  $n$ ;  $n$  — число элементов в векторе  $[TI]$  (равно числу элементов в  $[TI_{min}]$  и  $[TI_{max}]$ ).

Для случая с одной диспетчерской станцией ограничения снизу будут присутствовать, когда в составе данной части наряда уже есть рейсы с диспетчерской конечной станции.

Необходимо сформировать два набора ограничений — по предыдущим рейсам и по следующим.

Рассмотрим набор ограничений по предыдущим рейсам. Учитывая, что только одна конечная станция является диспетчерской, предыдущие значения времени до момента отправления с предыдущей конечной диспетчерской станции будут зависимыми значениями времени. Соответственно, векторы ограничений

по предыдущим рейсам  $[TI_{min\_Prev}]$  и  $[TI_{max\_Prev}]$  можно вычислить по формулам (3) и (4):

$$TI_{imin\_Prev} = TI_i - T_{MinS} - \Delta_{i,i-1} - T'_{MinS} - \Delta'_{(i,i-1)}, \quad (3)$$

$$TI_{imax\_Prev} = TI_i - T_{MaxS} - \Delta_{i,i-1} - T'_{MaxS} - \Delta'_{(i,i-1)}, \quad (4)$$

где  $\Delta_{\min(i,i-1)}$  — продолжительность рейса с предыдущей конечной станции (контрольного пункта) до данной (один рейс в обратном направлении);  $\Delta'_{\min(i,i-1)}$  — продолжительность предыдущего рейса с диспетчерской конечной станции до контрольного пункта (два рейса в обратном направлении);  $T_{MinS}$  — длительность минимальной стоянки на диспетчерской конечной станции;  $T'_{MinS}$  — длительность минимальной стоянки на контрольном пункте;  $T_{MaxS}$  — длительность максимальной стоянки на диспетчерской конечной станции;  $T'_{MaxS}$  — длительность максимальной стоянки на контрольном пункте.

Время рейса на данную диспетчерскую станцию из контрольного пункта можно рассчитать по формуле с использованием функции обратного отсчета времени *RunTimeBack* (подробнее [11, 12]):

$$\Delta_{i,i-1} = RunTimeBack(TI_p, Matr(TI_{iArrMin})), \quad (5)$$

где  $Matr(TI_i - T_{MinS})$  — матрица времен хода по периодам суток для движения в обратном направлении для времени прибытия на эту диспетчерскую станцию;  $TI_{iArrMin} = TI_i - T_{MinS}$  — время прибытия на диспетчерскую станцию, рассчитанное для случая минимальной стоянки.

По аналогии набор ограничений по следующим рейсам может быть рассчитан по формулам (6) и (7):

$$TI_{imin\_Next} = TI_i + \Delta_{i,i+1} + T'_{MinS}, \quad (6)$$

$$TI_{imax\_Next} = TI_i + \Delta_{i,i+1} + T'_{MaxS}, \quad (7)$$

где  $\Delta_{\min(i,i+1)}$  — продолжительность рейса с диспетчерской конечной станции до контрольного пункта (один рейс в прямом направлении), может рассчитываться по формуле (8).

$$\Delta_{\min(i,i+1)} = RunTime(TI_p, Matr(TI_p)), \quad (8)$$

где  $RunTime(TI_p, Matr(TI_p, Dir))$  — функция прямого отсчета времени (подробнее [11, 12]).

Если предыдущий (или следующий) рейс отсутствует (такое возможно, например, при формировании ограничений для первых и последних рейсов в наряде), то соответствующее слагаемое принимается равным нулю.

Объединяя оба набора ограничений, получим (9) и (10):

$$TI_{imin} = \text{Max} (TI_{imin\_Prev}, TI_{imin\_Next}), \quad (9)$$

$$TI_{imax} = \text{Min} (TI_{imax\_Prev}, TI_{imax\_Next}). \quad (10)$$

## 6. Генерация стандартной временной сетки

В качестве стандартной сетки примем вектор  $[TIn]$ , имеющий такое же число элементов, как и  $[TI]$ , и представляющий собой равномерное распределение значений времени внутри закрытого промежутка  $[TI_0; TI_k]$ , где  $k$  — число элементов в  $[TI]$ . Значения для  $i$ -го элемента в векторе  $[TIn]$  будут рассчитываться по формуле (11):

$$TIn_i = \text{Round}(TI_0 + \frac{TI_k - TI_0}{k \cdot i}), \quad (11)$$

где  $\text{Round}$  — функция математического округления до ближайшего целого (с учетом значения дискретности).

Вектор будет являться идеальным расписанием (в смысле соблюдения критерия равномерности интервалов) движения без учета влияния ограничений  $\{U\}$  и  $V\}$ .

## 7. Модель аperiodических расписаний движения

Новые значения вектора  $[TI]$  могут быть рассчитаны на основе линейной комбинации старых значений  $[TI]$  и  $[TIn]$ , где  $s$  — коэффициент этой линейной комбинации векторов.

Коэффициент линейной комбинации можно рассчитать в цикле от 1 до  $n$ , где на каждом шаге рассчитывается коэффициент по формуле (12):

$$s = \text{Min}(s, \left\{ \begin{array}{l} \frac{V_i - TIn_i}{TI_i - TIn_i}, \text{ при } TI > TIn_i \\ \frac{U_i - TIn_i}{TI_i - TIn_i}, \text{ при } TI < TIn_i \end{array} \right\}). \quad (12)$$

После нахождения коэффициента линейной комбинации по формуле (12) можно рассчитать вектор  $[TI]$  согласно (13):

$$[TI] = s[TI] + (1 - s)[TIn]. \quad (13)$$

На основе рассчитанных значений вектора можно определить полный набор зависимых значений времени. Сначала рассчитываются зависимые значения времени первого порядка, затем значения времени второго порядка.

Предложенная модель расчета  $[TI]$  обеспечивает максимально возможную близость к идеальному расписанию по равномерности интервалов  $[TIn]$  с учетом множеств ограничений  $\{U\}$  и  $\{V\}$ .

Приведенная модель обеспечивает полиномиальную сложность решения задачи, что позволяет говорить о возможности практического применения модели при решении задач выравнивания интервалов.

## 8. Практическое применение разработанной модели аperiodических маршрутных расписаний

Предложенная модель аperiodических расписаний движения реализована в Системе автоматизированного проектирования расписаний движения трамваев и троллейбусов (САПР РДТТ), используемой в Санкт-Петербурге для планирования организации трамвайного и троллейбусного движения (см. рис. 3). На рисунке 3 в главном окне программы изображен фрагмент расписания выходного дня в табличной форме для троллейбусного маршрута № 17 в программе САПР РДТТ.

В терминах программного обеспечения САПР РДТТ решение основной задачи теории расписаний называется выравниванием интервалов. Согласно рассмотренным выше условиям постановки задачи, это отражает для данной модели суть получаемого результата, когда в итоге работы алгоритма пользователь формирует расписание движения с максимально возможным ровным изменением интервалов с учетом наложенных ограничений.

Система автоматизированного проектирования расписаний движения трамваев и троллейбусов в составе Автоматизированной системы управления городским электрическим транспортом обеспечивает ручное и автоматическое формирование начального варианта расписаний. Вопросы генерации структуры расписания выходят за рамки рассмотрения данной статьи. После создания начального варианта расписания в ручном режиме фрагменты расписания, содержащие увеличенные стоянки (например, обеденные перерывы) не будут выровнены.

Ниже представлен пример фрагмента расписания рабочего дня для маршрута № 3 в виде таблицы (см. табл. 1).

Каждые две строки таблицы маршрутного расписания — это описание движения одного транспортного средства.

Например, «0604» — время выхода первого транспортного средства на линию, «0645» — прибытие на конечную станцию «Площадь Репина» (столбец «Реп.»), «0650» — отправление с нее на станцию «Сенная площадь» (столбец «Сенн») и т. д.



Таблица 1. Фрагмент начального варианта расписания рабочего дня маршрута № 3, созданный в САПР РДТТ

Вып.	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Из	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн
0604	0645	0705	0724	0744	0803	0823	0842	0902	0921	0943	1002x	1024	1045	1107
	50	09	29	48	08	27	47	06	28	47	07	28	50	11
0649		0715	0730	0750	0809	0829	0848	0908	0927	0950	1009x	1031	1052	1114
			35	54	14	33	53	12	35	54	14	35	57	18
0617	0658	0718	0737	0757	0816	0836	0855	0915	0934	0957	1018x	1040	1101	1123
	0703	22	42	0801	21	40	0900	19	42	1001	23	44	06	27
0658		0724	0739	0803	0822	0842	0901	0922	0941 т	1005	1026x	1048	1109	1131
			48	07	27	46	07	26	50	09	31	52	14	35
0630	0711	0731	0746	0809	0828	0848	0907	0929	0948 т	1013	1034x	1056	1117	1139
	16		54	13	33	52	14	33	58	17	39	1100	22	43
0711		0739	0754	0816	0835	0855	0914	0936	0955 т	1023	1044x	1106	1127	1149
			0801	20	40	59	21	40	1006	27	49	10	32	53

Таблица 2. Фрагмент расписания рабочего дня маршрута № 3 после выполнения выравнивания

Вып.	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Из	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн	Реп.	Сенн
0604	0645	0705	0724	0744	0803	0823	0842	0902	0921	0943	1002x	1031	1052 т	1120
	50	09	29	48	08	27	47	06	28	47	14	35	1103	24
0649		0715	0730	0750	0809	0829	0848	0908	0927	0950	1009x	1039	1100 т	1127
			35	54	14	33	53	12	35	54	22	43	10	31
0617	0658	0718	0737	0757	0816	0836	0855	0915	0934	0957	1018x	1047	1108 т	1135
	0703	22	42	0801	21	40	0900	19	42	1001	30	51	18	39
0658		0724	0739	0803	0822	0842	0901	0922	0941 т	1005	1026x	1055	1116	1142
			48	07	27	46	07	26	50	09	38	59	25	46
0630	0711	0731	0746	0809	0828	0848	0907	0929	0948 т	1013	1034x	1104	1125	1149
	16		54	13	33	52	14	33	58	17	47	08	32	53
0711		0739	0754	0816	0835	0855	0914	0936	0955 т	1023	1044x	1113	1134	1156
			0801	20	40	59	21	40	1006	27	56	17	39	1200

Рассмотрим такой фрагмент для демонстрации работы функции выравнивания и верификации предложенного ранее алгоритма.

В таблицах 1 и 2 представлен один и тот же фрагмент маршрутного расписания до и после операции выравнивания.

В качестве наглядного отображения равномерности интервалов будем использовать диаграмму интервалов по часам суток, сформированную в Системе автоматизированного проектирования расписаний движения трамваев и троллейбусов (рис. 4 и 5).

По результатам выравнивания, выполненного для промежутка времени с 8.00 до 11.00, видно, что произошло усреднение интервала времени (см. рис. 5), что наиболее заметно по интервалу с 9.00 до 10.00.

Внедрение Системы автоматизированного проектирования расписаний движения трамваев и троллейбусов в составе Автоматизированной системы управления городским электрическим транспортом в постоянную эксплуатацию позволило сократить затраты времени на построение маршрутных расписаний (по данным экспериментов, проведенных в СПб ГУП «Горэлектротранс») в 7–8 раз по сравнению с построением расписаний на бумаге, сделанным до программного обеспечения. Однако выравнивание — лишь одна из функций

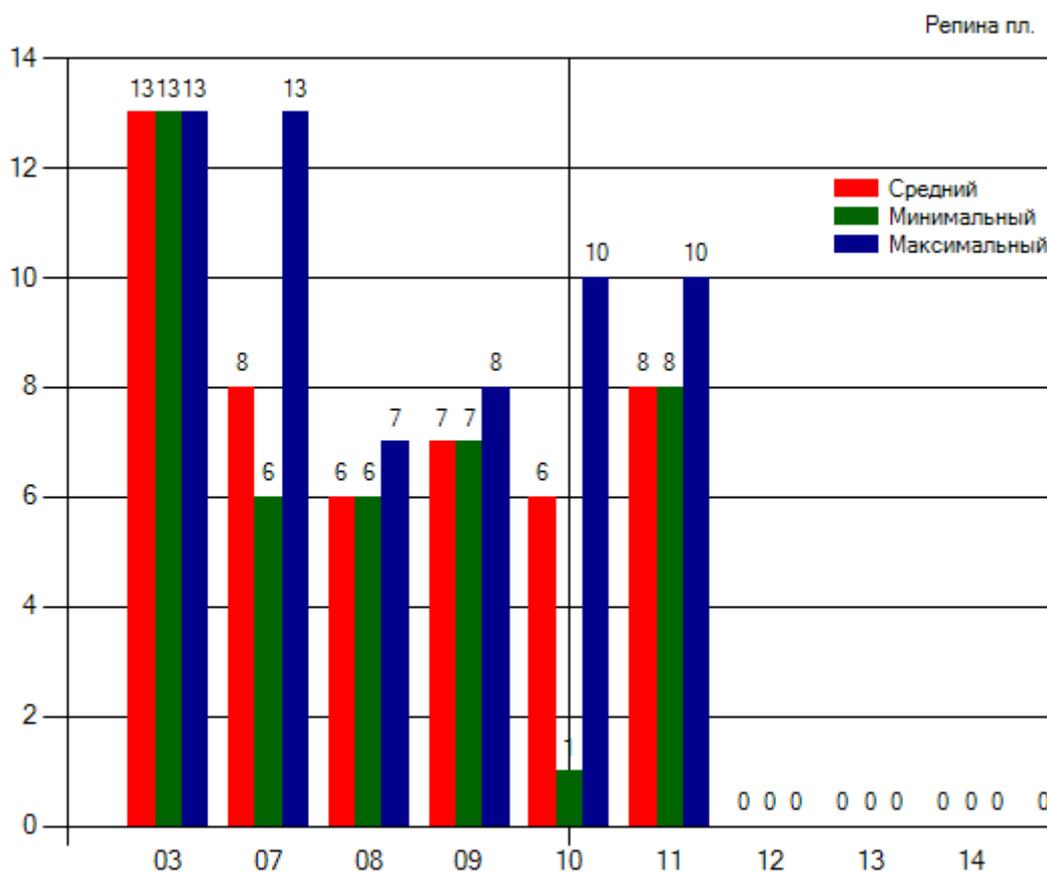


Рис. 4. Интервалы до выравнивания

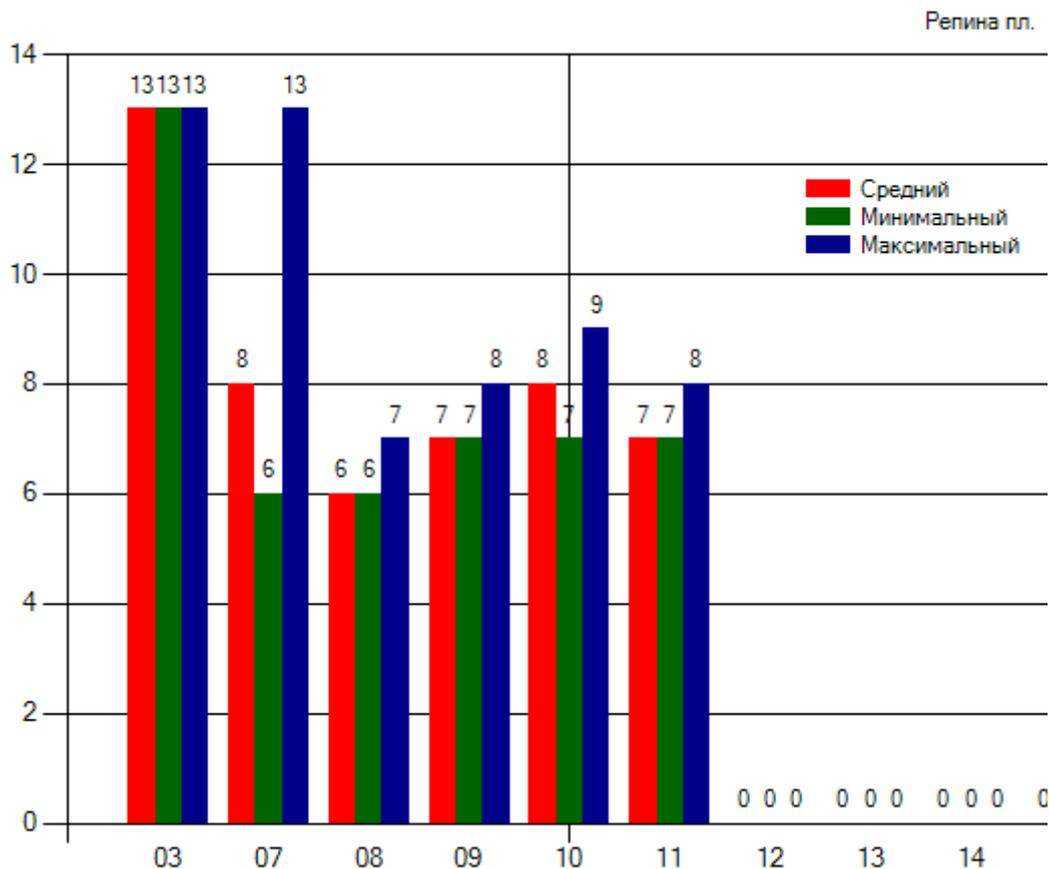


Рис. 5. Интервалы после выравнивания в промежутке с 8.00 до 11.00

информационной системы, обеспечивающих повышение производительности труда.

### Заключение

В начале статьи приведена общепринятая классификация расписаний движения маршрутного транспорта. Рассмотренные аperiодические дискретные расписания являются наиболее популярным типом расписаний из числа тех, что используются в отечественной практике. Далее приводятся основные технологические особенности планирования организации движения на городском транспорте в странах постсоветского пространства.

Приведенная в статье математическая модель позволяет решить основную задачу теории расписаний для самого популярного в России класса аperiодических расписаний — с учетом рассмотренных особенностей в организации движения городского наземного транспорта.

Обоснован выбор критерия оптимизации при решении основной задачи теории расписаний. В качестве такового взята равномерность интервалов движения. Приведенный критерий чаще прочих применяется на практике. Это

связано с отсутствием у предприятия-перевозчика актуальной информации о пассажиропотоках по всей городской транспортной сети. Для иллюстрации работы модели выбрана табличная форма представления маршрутных расписаний, принятая на городском транспорте для описания процесса движения. Это форма удобна при отсутствии плановых задержек на линии, когда время стоянок входит в пробеги трасс. Чтобы продемонстрировать, как работает функция выравнивания интервалов движения, в разделе о практическом применении приведены примеры расчета диаграмм интервалов между временем отправления транспортных средств с конечных станций.

Данный метод решения задачи не единственно возможный и предположительно не оптимальный с точки зрения затрат вычислительных мощностей. Но полиномиальная сложность алгоритма и опыт внедрения в Системе автоматизированного проектирования расписаний движения трамваев и троллейбусов, используемой в настоящее время в Санкт-Петербурге для построения расписаний трамваев и троллейбусов, позволяют с уверенностью говорить о положительном эффекте от внедрения в виде повышения производительности труда. Проблемы разработки более эффективных алгоритмов, сравнение их с приведенными, а также оценки сложности и повышения скорости расчетов могут стать предметом дальнейших исследований.

### Библиографический список

1. *Kocheurova E.* Optimizing Urban Public Transportation with Ant Colony Algorithm / E. Kocheurova, E. Gorokhova // 8th International Conference on Computational Collective Intelligence. – Greece : Halkidiki, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-45243-2-45>
2. *Liebchen C.* Periodic Timetable Optimization in Public Transport. PhD thesis / C. Liebchen. – Berlin : Technische University Berlin, 2006. – 156 p.
3. *Palmqvist C-W.* Delays and Timetabling for Passenger Trains. PhD thesis / C-W. Palmqvist. – Sweden, Lund : Lund University, 2019. – 107 p.
4. *Liebchen C.* Computer-aided Systems in Public Transport. Springer. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems / C. Liebchen, M. Proksch, F. H. Wagner // Performance of algorithms for periodic timetable optimization. – Berlin : Heidelberg, 2008. – Vol. 600. – P. 151–180.
5. *Vautard F.* Improvement of departure time suitability for interregional rail timetables. PhD thesis / F. Vautard. – Sweden, Stockholm : KTH Royal Institute of Technology, 2020. – 37 p.
6. *Cacchiani V.* Non-cyclic train timetabling and comparability graphs / V. Cacchiani, A. Caprara, P. Toth // Operations Research Letters. – 2010. – N 38 (3). – P. 179–184.
7. *Geng X.* Simulated Annealing Method-Based Flight Schedule Optimization in Multi-airport Systems / X. Geng, M. Hu // Mathematical Problems in Engineering. – 2020 – N 3. – P. 1–8. <https://doi.org/10.1155/2020/4731918>
8. *Lei L.* Flight Schedule Strategy of Airport Group / L. Lei, D. Zhao, H. Liu, D. Guo // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – UK : IOP Publishing, 2020. – Vol. 790 012102. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/790/1/012102>

9. Горбачев А. М. Обзор математических моделей расписаний маршрутного городского транспорта / А. М. Горбачев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2018. – Т. 15. – № 3. – С. 366–370.
10. Горбачев А. М. Автоматизация синтеза расписаний городского электрического транспорта / А. М. Горбачев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб. : ПГУПС, 2014. – № 4. – С. 27–32.
11. Горбачев А. М. Формализация представления аperiodических маршрутных расписаний наземного городского электрического транспорта / А. М. Горбачев // «Транспортные интеллектуальные системы-2017»: сб. материалов I международной научно-практической конференции. – СПб. : ПГУПС, 2017. – С. 74–81.
12. Schmidt M. E. Integrating Routing Decisions in Public Transport Problems / M. E. Schmidt // Springer Optimization and Its Applications 89. – New York : Springer Science + Business Media, 2014. – 386 p. [https://doi:10.1007/978-1-4614-9566-6-2](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9566-6-2)
13. Herrigel-Wiedersheim S. Algorithmic Decision support for the construction of periodic railway timetables / S. Herrigel-Wiedersheim. – Zurich : ETH Zurich, 2015. – 167 p.
14. Illes B. Periodic timetable optimization in the public road transport services / B. Illes, R. Ladanyi, G. Sarkozi // Advances Logistics Systems. – 2009. – Vol. 3 (1). – P. 219–225.
15. Schöbel A. The Complexity of Integrating Routing Decisions in Public Transportation Models / A. Schöbel, M. Schmidt // 10th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS '10). – 2010. – P. 156–169.

### **A. M. Gorbachev**

*The department of "Automation and Telemechanics on Railways"  
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg*

## **MATHEMATICAL MODEL OF APERIODIC TIMETABLES OF URBAN ELECTRIC TRANSPORT**

The analysis of scientific publications and timetable models is given. Existing works have been used as a basis of a classification of timetables by the frequency of time values. The urban transport network is presented in the form of a multigraph. The transition from a multigraph of the urban transport network to a network of events characterizing the traffic process is considered. Constraints on time values have been formalized to solve the main problem of the scheduling theory. The proposed formalization factors in the specifics of traffic management planning in Russia and other post-Soviet countries. A mathematical model of aperiodic timetables for the ground urban electric transport traffic based on the theory of linear programming is presented. The optimization criterion for solving the main problem of the scheduling theory has been substantiated. The uniformity of traffic intervals is used as an optimization criterion for solving the main problem of the scheduling theory. The article provides tabular timetables used in urban transport to describe the traffic process in the absence of significant events on the line. The implementation of the model presented in this article is exemplified by the automated tram and trolleybus timetable design software being part of the automated urban electric transport control system currently used in Saint Petersburg to form tram and trolleybus timetables. The examples of calculating the vehicle departure interval diagrams have been used to demonstrate the function of aligning the traffic intervals. In conclusion, the advantages and development paths of the proposed model of aperiodic timetables for the ground urban electric transport traffic are listed.

Urban transport, ground electric transport, timetable, aperiodic timetable, linear combination, automated tram and trolleybus timetable design system, automated urban electric transport control system

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-499-517

## References

1. Kochegurova E. & Gorokhova E. (2016) Optimizing Urban Public Transportation with Ant Colony Algorithm. *8th International Conference on Computational Collective Intelligence*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-45243-2-45>.
2. Liebchen C. (2006) Periodic Timetable Optimization in Public Transport. PhD thesis. Berlin, Technische Universität Berlin Press, 156 p.
3. Palmqvist C-W. (2019) Delays and Timetabling for Passenger Trains. PhD thesis. Sweden, Lund: Lund University Press, 107 p.
4. Liebchen C., Proksch M. & Wagner F. H. (2008) Computer-aided Systems in Public Transport. Springer. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Performance of algorithms for periodic timetable optimization. Berlin, Heidelberg Press, vol. 600, pp. 151–180.
5. Vautard F. (2020) Improvement of departure time suitability for interregional rail timetables. PhD thesis. Sweden, Stockholm, KTH Royal Institute of Technology Press, 37 p.
6. Cacchiani V., Caprara A. & Toth P. (2010) Non-cyclic train timetabling and comparability graphs. *Operations Research Letters*, no. 38 (3), pp. 179–184.
7. Geng X. & Hu M. (2020) Simulated Annealing Method-Based Flight Schedule Optimization in Multi-airport Systems. *Mathematical Problems in Engineering*, no. 3, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1155/2020/4731918>
8. Lei L., Zhao D., Liu H. & Guo D. (2020) Flight Schedule Strategy of Airport Group. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. UK, IOP Publishing, vol. 790 12102. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/790/1/012102>.
9. Gorbachev A. M. (2018) Obzor matematicheskikh modeley raspisaniy marshrutnogo gorodskogo transporta [Overview of mathematical models of urban fixed-route transport timetables]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, no. 3, pp. 366–370. (In Russian)
10. Gorbachev A. M. (2014) Avtomatizatsiya sinteza raspisaniy gorodskogo elektricheskogo transporta [Automation of urban electric transport timetable synthesis]. *Proceedings of Petersburg Transport University*, no. 4 (41), pp. 27–32. (In Russian)
11. Gorbachev A. M. (2017) Formalizatsiya predstavleniya aperiodicheskikh marshrutnykh raspisaniy nazemnogo gorodskogo elektricheskogo transporta [Formalization of presentation of aperiodic timetables for the ground urban electric transport]. *Sbornik materialov I mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Transportnyye intellektual'nyye sistemy–2017"* [Proceedings of the I International Scientific and Practical Conference "Transport Intelligent Systems – 2017"]. Saint Petersburg, PGUPS [Petersburg State Transport University] Publ., pp. 74–81. (In Russian)
12. Schmidt M. E. (2014) Integrating Routing Decisions in Public Transport Problems. *Springer Optimization and Its Applications 89*. New York, Springer Science + Business Media, 386 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9566-6-2>
13. Herrigel-Wiedersheim S. (2015) Algorithmic Decision support for the construction of periodic railway timetables. Zurich, ETH Zurich Press, 167 p.
14. Illes B., Ladanyi R. & Sarkozi G. (2009) Periodic timetable optimization in the public road transport services. *Advances Logistics Systems*, vol. 3 (1), pp. 219–225.

15. *Schöbel A. & Schmidt M. (2010) The Complexity of Integrating Routing Decisions in Public Transportation Models. 10th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS '10), pp. 156–169.*

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Д. С. Марковым*

*Поступила в редакцию 22.06.2020, принята к публикации 27.07.2020*

*ГОРБАЧЕВ Алексей Михайлович* — кандидат технических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

e-mail: [ag@agpage.ru](mailto:ag@agpage.ru)

© Горбачев А. М., 2020

# ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 681.518

**Д. В. Сперанский, д-р техн. наук**

**А. В. Горелик, д-р техн. наук**

**И. А. Журавлев, канд. техн. наук**

**А. В. Орлов, канд. техн. наук**

*Кафедра «Системы управления транспортной инфраструктурой»  
Российский университет транспорта (МИИТ), Москва*

## ТЕСТИРОВАНИЕ СИСТЕМ С НЕЧЕТКИМИ ДИСКРЕТНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ

Современные сложные системы характеризуются наличием разнородных компонентов с различными взаимосвязями, нечеткостью и неопределенностью законов функционирования компонентов и системы в целом. К важному классу таких систем относятся гибридные интеллектуальные системы. В них компоненты представлены аналитическими моделями нечетких объектов, искусственных нейронных сетей, экспертных систем и др. Объектами рассмотрения в статье служат нечеткие дискретные устройства, входящие, например, в состав гибридных систем. В качестве математической модели таких компонентов используются введенные в статье нечеткие линейные автоматы (НЛА). Рассматривается проблема синтеза тестов для НЛА, используемых для обнаружения в них неисправностей. Допустимыми неисправностями в НЛА считаются обычные одиночные константные неисправности. К допустимым относятся также неисправности, появляющиеся в результате замещения некоторых элементов характеристических матриц НЛА другими (из заданного множества альтернативных). Разработаны методы синтеза тестов для НЛА, принадлежащих классу  $\mu$ -определенных и синхронизируемых, а также произвольных линейных автоматов. Первые два метода основаны на сведении рассматриваемой задачи к решению систем линейных алгебраических уравнений. Отметим, что для поиска таких решений существует хорошо разработанный математический аппарат, имеющий в арсенале целый ряд эффективных методов. Синтезируемые этим методами тесты для  $\mu$ -определенных и синхронизируемых НЛА имеют достаточно короткую длину, не превышающую глубины памяти соответствующих автоматов. Показано, что условия принадлежности НЛА названным выше двум первым классам не являются слишком жесткими. Отмечено, что известные ранее методы синтеза тестов для линейных автоматов требуют выполнения значительно более жестких требований. Метод синтеза для произвольных НЛА также строит довольно короткие тесты.

Техническая диагностика, дискретные системы с памятью, линейные последовательностные машины, нечеткие линейные автоматы, тестирование, методы синтеза контролирующих тестов

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-518-531

### Введение

Современные сферы человеческой деятельности, в т. ч. социальная, экономическая, промышленная, научная и др., характеризуются богатством использова-

ния различных сложных систем. Характерная особенность многих таких систем заключается в том, что они не поддаются точному и совершенно однозначному описанию. Классический рационализм, господствовавший ранее в науке, похоже, уже достиг своих пределов. Понятно, что описание современных сложных систем требует новых средств. Важными этапами на пути создания таких средств являются разработанная Л. Заде [1] теория нечетких множеств, а в последующем — исследования по теории нечетких систем. В 1976 году Л. Заде сформулировал принцип несовместимости, суть которого в том, что высокая точность описания систем несовместима с их большой сложностью. Сложные системы отличаются от простых (механистических) наличием разнородных компонентов с различными взаимосвязями, проявлением кооперативного поведения, неопределенностью параметров среды и законов функционирования отдельных компонентов и системы в целом.

Среди различных классов сложных систем важное место занимают гибридные интеллектуальные системы (ГИС) [2, 3]. Они являются совокупностью компонент, представленных аналитическими моделями, в т. ч. нечетких объектов, генетических алгоритмов, искусственных нейронных сетей, экспертных систем и др. ГИС как системы искусственного интеллекта (ИИ) характеризуются тем, что для решения задачи они используют не один, а несколько методов имитации интеллектуальной деятельности человека.

Согласно современным представлениям [4], эволюция систем представляет собой последовательность фазовых переходов через точки бифуркации. Эти переходы характеризуются фундаментальной неопределенностью дальнейшего направления развития системы. Роль неопределенности (нечеткости) в эволюционных системах резко возрастает и может привести к масштабным последствиям.

Так, нобелевский лауреат И. Пригожин сформулировал утверждение [5], справедливость которого разделяет и Л. Заде: по мере усложнения системы способность формулировать четкие и осмысленные высказывания о ее поведении снижается до определенного порога, за которым точность и смысл становятся взаимоисключающими.

В научных публикациях отмечается высокая эффективность ГИС во многих областях, например, при проектировании сложных силовых и электронных систем, обнаружении сбоев в таких технических системах [5], где приходится иметь дело как с «четкими», так и с «нечеткими» компонентами.

Проектирование подобных систем с использованием ГИС включает обязательное создание их адекватных математических моделей, разработку методов синтеза тестов для них (в частности, с использованием эволюционных алгоритмов), организацию процесса их тестирования и другие задачи.

Предлагаемая статья посвящена проблеме тестирования нечетких линейных систем, решение которой может быть реализовано в виде автономного компонента, входящего в состав ГИС. Этот компонент требует описания используе-

мой модели нечеткой линейной системы и разработки метода тестирования, а также организации самого процесса тестирования.

Интерес к линейным моделям обусловлен их обширным использованием как в теории (синтез специальных счетчиков, кодирующих устройств), так и в практических приложениях (обнаружение ошибок в кодах, шифрование сообщений) [6]. Кроме того, линейные автоматы обладают спецификой, позволяющей получать некоторые результаты (например, условия существования различных типов экспериментов с ними) значительно проще и в более удобном для вычисления и проверки виде, чем для автоматов общего вида, в т. ч. нелинейных. Приведенные факторы оправдывают интерес к теории линейных автоматов, в частности нечетких.

Что касается задачи тестирования нечетких систем, то ее решение необходимо для повышения надежности функционирования таких систем. По этой причине актуальность задачи тестирования не требует особого обоснования.

### 1. Описание нечеткого линейного автомата

Сначала напомним понятие линейной последовательностной машины (ЛПМ), для которой далее будем использовать и другое наименование — линейного автомата (ЛА), заданного над полем  $GF(p)$ , подробное описание которого приведено в [6]. В этой монографии описаны элементарные составляющие ЛА, его структура и приведена математическая модель ЛА в виде конечного автомата. Следуя [6], приведем необходимые нам далее сведения более детально.

Итак, ЛА — это система с  $l$  входными и  $m$  выходными полюсами. Входные и выходные сигналы ЛА принадлежат полю  $GF(p)$ , где  $p$  — простое число. Далее именно эта модель и будет нами использоваться.

В [6] ЛА задается пятеркой объектов:

$$\tilde{A} = (S, X, Y, \delta, \lambda),$$

где  $S$  — множество состояний,  $X$  — входной алфавит,  $Y$  — выходной алфавит, функция переходов  $\delta : S \times X \rightarrow S$ , функция выходов  $\lambda : S \times X \rightarrow Y$ .

Схема ЛПМ содержит элементарные составляющие (сумматоры, усилители и задержки) и подчиняется некоторым правилам их соединения. Возможно любое соединение конечного числа составляющих с одним ограничением — в нем должны отсутствовать замкнутые петли, не содержащие ни одной задержки. Если это правило не выполняется, то в схеме появляются соединения, в которых циркулирует неопределенный сигнал.

Воспользуемся следующими обозначениями, используемыми в [6]:

$$\bar{u}(t) = (u_1(t), \dots, u_l(t))', \bar{y}(t) = (y_1(t), \dots, y_m(t))', \bar{s}(t) = (s_1(t), \dots, s_n(t))'$$

где  $\bar{u}(t)$ ,  $\bar{y}(t)$ ,  $\bar{s}(t)$  — соответственно входной, выходной векторы и вектор состояния. Здесь состояние ЛПМ трактуется как упорядоченная совокупность состояний элементов задержек, входящих в состав ЛПМ. Число  $n$  принято называть размерностью ЛА.

Функционирование ЛА  $\tilde{A}$  задается уравнениями переходов и выходов:

$$\bar{s}(t+1) = A\bar{s}(t) + B\bar{u}(t), \quad (1)$$

$$\bar{y}(t) = C\bar{s}(t) + D\bar{u}(t), \quad (2)$$

где  $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ ,  $B = [b_{ij}]_{n \times l}$ ,  $C = [c_{ij}]_{m \times n}$ ,  $D = [d_{ij}]_{m \times l}$  — характеристические матрицы, элементы которых принадлежат полю  $GF(p)$ .

Известно [6], что конечное состояние ЛА и его выходная реакция в результате подачи входной последовательности длины  $t+1$ , если начальное состояние ЛА есть  $\bar{s}(0)$ , вычисляются по формулам:

$$\bar{s}(t+1) = A^{t+1}\bar{s}(0) + A^t B\bar{u}(t) + \dots + AB\bar{u}(t-1) + B\bar{u}(t), \quad (3)$$

$$\bar{y}(t) = CA^t\bar{s}(0) + CA^{t-1}B\bar{u}(0) + \dots + CB\bar{u}(t-1) + D\bar{u}(t). \quad (4)$$

Используемую модель линейной системы, которая будет определена ниже, в качестве компонентов ГИС будем далее называть нечетким линейным автоматом (НЛА). По-видимому, первой публикацией, в которой понятие нечетких автоматов было введено как аналог автоматов Миля и Мура, стала статья Wee W. и Fu S. [7], опубликованная в 1969 году. Общим вопросам концепции теории нечеткости в теории автоматов посвящены монографии [8, 9]. Отметим, что в ряде статей, например, [10–16], введено несколько различных типов нечетких автоматов.

Понятно, что наличие разных типов нечетких автоматов позволяет создавать более адекватные модели реальных цифровых систем. Эта нечеткость может относиться и к алгоритмам функционирования, и к исходным данным, и к значениям на выходах системы. В [17] был введен тип нечеткого автомата общего вида, в т. ч. и нелинейного, а в [18] он был конкретизирован для случая нечеткого линейного автомата (НЛА). Эта модель НЛА используется в предлагаемой статье.

Теперь перейдем к определению НЛА. Отметим, что все сказанное выше о ЛА полностью справедливо и для НЛА. Нечеткость функционирования ЛА может быть реализована путем использования соответствующего механизма для любой комбинации из матриц, фигурирующих в (1)–(4). Поясним принцип его работы на примере одной матрицы в (1)–(4). Например, как это предложено и проиллюстрировано в [17], промоделируем нечеткость функциониро-

вания НЛА на примере матрицы  $B$  с альтернативными элементами. Такие элементы этой матрицы запишем в виде  $b_{ij} = b_1 \vee b_2 \vee \dots \vee b_f$ , где  $b_i (i = 1, 2, \dots, f)$  есть символическое представление элементов из поля  $GF(p)$ , над которым НЛА задан. Эта запись говорит о том, что в любой дискретный момент времени  $t$ , в котором функционирует НЛА, элемент  $b_i$  может быть заменен любым другим из множества элементов  $\{b_1, b_2, \dots, b_f\}$ . Понятно, что форма записи уравнений переходов (1) и выходов (2) НЛА при этом не изменится, как и вид формул (3) и (4).

Механизм проявления нечеткости в функционировании автомата полностью адекватен ситуации, имеющей место в реальных дискретных устройствах. В качестве примера рассмотрим RS-триггер. Известно, что для него запрещена комбинация входных сигналов  $R = 1, S = 1$  из-за неопределенности состояния триггера (0 или 1), в котором он может находиться после ее подачи. Если запрещенная комбинация не поступает на триггерные входы, то дискретное устройство, содержащее RS-триггер, функционирует как детерминированное. Когда на входах триггера появляется запрещенная комбинация, это же устройство становится нечетко функционирующим.

Матричные операции умножения и сложения в формулах (1) — (4) суть обычные матричные операции. Просто здесь требуется учитывать символическую форму записи альтернативных элементов в матричных операндах. Символьные записи в формулах (1)—(4) содержат в себе три различные операции — умножение ( $\cdot$ ), сложение ( $+$ ) и ( $\vee$ ). Последнюю условимся называть математической операцией выбора элемента. Ее содержательный смысл совершенно прост — из двух ее операндов случайным образом выбирается один. Первые две операции являются классическими операциями над элементами поля  $GF(p)$  со всеми присущими им свойствами. Что касается последней, то нетрудно доказать, что она удовлетворяет свойствам коммутативности, ассоциативности и дистрибутивности (по отношению к операциям умножения и сложения).

## 2. Формулировка задачи

Теперь рассмотрим следующую задачу. Требуется построить входную последовательность (тест), которая обнаруживает множество заданных допустимых неисправностей НЛА.

Вначале определим множество допустимых неисправностей НЛА. Предполагается, что неисправности могут быть двух типов. Первый тип — константные одиночные неисправности, такие же, как и у обычных дискретных устройств (например, обрывы связей, замыкания). Их наличие в устройстве приводит в модели НЛА к замене некоторых элементов ее характеристических матриц другими элементами поля  $GF(p)$ , над которым задается НЛА. Неисправности второго типа в модели НЛА влекут замещение конкретных элементов характеристических матриц другим элементом, но не из соответствующего этому эле-

менту альтернативного множества. Предположим, например, что элемент имеет набор альтернатив  $b_{ij} = b_1 \vee b_2 \vee \dots \vee b_f$ . Неисправность второго типа возникнет в НЛА, если в процессе функционирования НЛА выбранное для нее значение будет заменено каким-либо элементом из поля  $GF(p)$ , не входящим в данный набор альтернатив для этого элемента. Такое определение неисправности второго типа вполне естественно и соответствует здравому смыслу. Оно продиктовано также тем, что при описанном выше механизме функционирования НЛА такая неисправность, вообще говоря, может быть обнаружена. Однако при этом гарантии ее обнаружения в случае описанного замещения не существует. Появление любой неисправности из описанного класса допустимых двух типов неисправностей трансформирует исходный НЛА в некоторый детерминированный ЛА.

Для обнаружения неисправности в процессе тестирования НЛА воспользуемся принципом, который был нами описан и использован в [21]. Очевидно, что любому НЛА  $M$  можно поставить в соответствие конечное множество  $S(M)$  ЛА, полученных из  $M$  при замене в некоторой его характеристической матрице одного элемента. Это означает, что множество  $S(M)$  есть совокупность детерминированных ЛА, которые в целом моделируют все возможные варианты поведения исходного ЛА  $M$  при наличии в нем допустимой неисправности. Тогда естественно считать, что проверяемый НЛА является исправным автоматом, если наблюдаемая его реакция на тест совпадает с реакцией на тот же тест некоторого детерминированного ЛА из множества  $S(M)$ . Если же реакция на тест проверяемого НЛА не совпадает с реакцией на тот же тест хотя бы одного из детерминированных ЛА, входящих в множество  $S(M)$ , то проверяемый НЛА естественно отнести к классу неисправных.

### 3. Метод синтеза тестов для НЛА

Задача синтеза тестов для детерминированного ЛА была исследовалась нами в [19] для детерминированного ЛА, где были разработаны соответствующие методы для различных видов ЛА. В частности, были предложены методы синтеза тестов для  $\mu$ -определенных и синхронизируемых ЛА, а также универсальный метод синтеза для ЛА произвольного вида. Последний метод основан на существовании у произвольных ЛА конечной памяти. В нашей статье [21] сформулирован общий принцип синтеза тестов для НЛА на основе подхода, использованного в [19].

Ниже в этом разделе будет на основе упомянутого принципа дано детальное и строгое математическое обоснование методов синтеза тестов для НЛА всех видов, аналогичных существующим у «четких» ЛА. В процессе изложения будет необходимо использовать некоторые понятия, конструкции и приемы из теории экспериментов с автоматами, введенные и описанные в классической монографии А. Гилла [20]. Поскольку не все читатели могут быть знакомы с этим

арсеналом средств и методов теории экспериментов, по мере необходимости будем приводить некоторые определения и факты этой теории.

Рассмотрим вначале задачи синтеза тестов для так называемых  $\mu$ -определенных и для синхронизируемых ЛА. Прежде всего напомним [20] понятие конечной памяти автомата. Говорят, что детерминированный ЛА имеет конечную память глубины  $\mu$ , если для любого  $t$  верно следующее равенство:

$$\bar{y}(t) = f(\bar{u}(t), \bar{u}(t-1), \dots, \bar{u}(t-\mu), \bar{y}(t-1), \dots, \bar{y}(t-\mu)), \quad (5)$$

где  $\bar{u}(t)$  — входные и  $\bar{y}(t)$  — выходные векторы ЛА в момент времени  $t$ .

Известно также [20], что любой конечный автомат, в частности линейный, имеет конечную память глубины  $\mu \leq \frac{1}{2}q(q-1)$ , где  $q$  — число состояний автомата.

В [20] введено также следующее понятие: ЛА называется  $\mu$ -определенным, если его выходной сигнал  $\bar{y}(\mu)$  в момент времени  $\mu$  зависит только от предыдущих  $\mu$  входов  $\bar{u}(t), \bar{u}(t-1), \dots, \bar{u}(t-\mu)$ .

В нашей статье [19] доказано, что необходимым и достаточным условием для того, чтобы ЛА был  $\mu$ -определенным, является выполнение равенства  $CA^\mu = [0]$ , где  $[0]$  — нулевая матрица (вектор), а  $C, A$  суть характеристические матрицы в формулах (1) и (2).

Напомним также [18], что входная последовательность ЛА называется синхронизирующей последовательностью (СП), если независимо от начального состояния ЛА после подачи СП он оказывается в одном и том же финальном (конечном) состоянии. В нашей статье [18] доказано, что необходимым и достаточным условием существования СП длины  $\mu$  ЛА будет выполнение равенства  $A^\mu = [0]$ .

Из двух приведенных выше утверждений вытекает, что каждый синхронизируемый ЛА одновременно является и  $\mu$ -определенным ЛА.

Следуя [18], можно ввести аналогичные понятия для НЛА: НЛА  $A$  назовем  $\mu$ -определенным (синхронизируемым), если каждый ЛА из множества  $S(M) = \{A_1, A_2, \dots, A_q\}$ , введенного нами выше, является  $\mu$ -определенным (синхронизируемым). Напомним, что  $S(M) = \{A_1, A_2, \dots, A_q\}$  есть множество ЛА, полученных из автомата  $M$  путем поочередной замены некоторого элемента (имеющего  $q$  альтернативных) в его характеристической матрице на один из альтернативных.

Используя принятые в [18] обозначения (условимся и в последующем изложении использовать обозначения из [18]), пусть  $A^*, B^*, C^*, D^*$  — характеристические матрицы тестируемого НЛА; в исправном НЛА  $\tilde{A}$  они соответствуют матрицам некоторого конкретного ЛА из множества  $S(M) = \{A_1, A_2, \dots, A_q\}$ . Условимся считать, что оба эти автомата  $\mu$ -определенны и синхронизируемы.

В общем случае они имеют разную глубину памяти, которую обозначим как  $\mu_1$  и  $\mu_2$  соответственно. Пусть  $\mu = \max(\mu_1, \mu_2)$ , тогда понятно, что справедливыми являются равенства  $C^*(A^*)^k = [0]$  и  $CA^k = [0]$  для всех  $k \geq \mu$ .

Предположим, что одна и та же входная последовательность  $T = \bar{u}(0), \bar{u}(1), \dots, \bar{u}(\mu)$  длины  $\mu + 1$  прикладывается к тестируемому НЛА, о котором до этого эксперимента неизвестно, является ли он исправным или неисправным. Тогда, имея в виду только что упомянутое, а также формулу (4), вычислим полные реакции обоих автоматов [19] независимо от их начального состояния:

$$\bar{y}^*(\mu) = C^*(A^*)^{\mu-1} B^* \bar{u}(0) + C^*(A^*)^{\mu-2} B^* \bar{u}(1) + \dots + C^* B^* \bar{u}(\mu-1) + D^* \bar{u}(\mu),$$

$$\bar{y}(\mu) = CA^{\mu-1} B \bar{u}(0) + CA^{\mu-2} B \bar{u}(1) + \dots + CB \bar{u}(\mu-1) + D \bar{u}(\mu).$$

Здесь первое выражение есть реакция тестируемого автомата, а второе выражение — реакция НЛА, если он исправен.

Теперь запишем разность этих выражений:

$$\bar{y}(\mu) - \bar{y}^*(\mu) = [CA^{\mu-1} B - C^*(A^*)^{\mu-1} B] \bar{u}(0) + \dots + [D - D^*] \bar{u}(\mu). \quad (6)$$

Совершенно очевидно, что тестируемый автомат является неисправным, если реакции его и исправного автомата различны, т.е. разность  $\bar{y}(\mu) - \bar{y}^*(\mu)$  есть ненулевой вектор. Равенство (6) можно трактовать естественным образом как систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно координат вектора  $u = [\bar{u}_1(0), \dots, \bar{u}_l(0), \dots, \bar{u}_1(\mu), \dots, \bar{u}_l(\mu)]$ . Обозначим матрицу системы (6) через  $Q$ , тогда она примет форму:

$$Q \cdot u = y. \quad (7)$$

где  $y$  есть некоторый  $m$ -мерный ненулевой вектор. Решив эту систему для всех возможных ненулевых векторов, мы получаем тест, отличающий проверяемый НЛА и автомат  $\tilde{A}$ .

Отметим кстати, что для решения СЛАУ разработан обширный арсенал эффективных математических методов (как точных, так и приближенных).

Если найти путем решения соответствующих СЛАУ тесты, отличающие проверяемый автомат от каждого ЛА множества  $S(M)$ , то совокупность всех этих тестов, очевидно, является полным тестом, который обнаруживает неисправности в НЛА. Нужно иметь в виду, что неисправный НЛА интерпретируется нами так, как это было определено выше.

Так как множество всех ненулевых векторов  $u$  (мы обозначаем его как  $Y$ , следуя [18]) может содержать много элементов даже для малых значений  $m$ , то процесс поиска решений СЛАУ (7) окажется трудоемким.

Опишем способ устранения этого недостатка. Рассмотрим только одну *однородную* СЛАУ с матрицей  $Q$  (напомним, что у нее все правые части системы равны 0). Найдем ее решение, которое обозначаем как  $U$ , тогда множество векторов  $Y \setminus U$  (теоретико-множественная разность), где  $U$  — это совокупность всех векторов — решений размерности  $m$ , совершенно очевидно, является искомым тестом. Таким образом, задача сводится к решению только одной единственной однородной системы.

Предложенный метод синтеза тестов является справедливым в том случае, когда все неисправные НЛА являются либо  $\mu$ -определенными, либо синхронизируемыми. Может показаться, что это требование очень жесткое. На самом деле это не совсем так.

Очевидно, что оно заведомо выполняется, если неисправность НЛА изменяет только элементы характеристических матриц  $B, C, D$ . Что касается матрицы  $A$ , то, к сожалению, не каждое ее изменение сохраняет упомянутые свойства. Таким образом, предложенный метод гарантирует синтез обнаруживающего теста для неисправностей, порождаемых изменением трех характеристических матриц из четырех, и только для изменений в матрице  $A$  он иногда (но не всегда!) может давать сбой.

Исходя из описания предложенного метода синтеза тестов, легко показать, что для двух рассмотренных классов НЛА тесты, построенные с его использованием, имеют длину  $\mu + 1$ , где  $\mu$  есть глубина памяти ЛА. Известно [6], что  $\mu \leq n$ , где  $n$  — размерность ЛА. Отсюда вытекает, что метод синтезирует тесты достаточно короткой длины. В практических приложениях этот факт является очень важным.

Возникает вопрос: как синтезировать тест, если НЛА не относится к рассмотренным выше двум видам? Опишем теперь, как по аналогии с [19] можно предложить метод синтеза тестов для произвольных НЛА, не требуя от них  $\mu$ -определенности или синхронизируемости. Этот метод, как и в [19] для случая детерминированного ЛА, основан на том факте, что, как известно [20], любой автомат имеет конечную память. Идея этого метода по аналогии с [21] очевидным образом может быть распространена и на случай НЛА.

Понятно, что ЛА — просто частный случай обычного детерминированного конечного автомата. Следовательно, методы синтеза тестов, разработанные для него, применимы и для ЛА.

Кратко напомним один из них, подробно описанный в [20]. Пусть  $A$  — тестируемый автомат НЛА, а  $\tilde{A}$  — некоторый конкретный ЛА из множества  $S(A)$ , являющихся минимальными. Пусть множества их допустимых начальных состояний совпадают с соответствующими множествами всех состояний этих двух автоматов. Для ЛА  $A$  построим любую установочную последовательность,

обозначив ее через  $u_1$  [20], которая заведомо существует, т. к. автомат  $A$  минимальный.

Напомним [20], что последовательность называется установочной, если по наблюдаемой реакции на нее можно однозначно определить финальное состояние, в котором окажется автомат после ее подачи. Вернемся к изложению метода синтеза. Теперь подадим  $u_1$  на предъявленный тестируемый автомат. Пока неизвестно, является ли испытуемый автомат исправным или неисправным. По наблюдаемой реакции найдем конечное состояние  $s_f(A)$ , в котором должен оказаться испытуемый автомат, если бы он был ЛА  $A$ . Далее построим установочную последовательность  $u_2$  для автомата  $\tilde{A}$  и подадим ее на тестируемый автомат. По наблюдаемой реакции найдем конечное состояние  $s_f(\tilde{A})$ , в котором должен оказаться испытуемый автомат, если бы он был автоматом  $\tilde{A}$ . Далее рассмотрим *расщепляемый автомат*  $\Delta(A, \tilde{A})$ , определенный в [20], считая его допустимыми начальными состояниями состояние  $s_f(A)$  и состояние  $s_f(\tilde{A})$  автомата  $\Delta(A, \tilde{A})$ . Для расщепляемого автомата с упомянутым множеством допустимых начальных состояний построим установочную последовательность  $u_3$  и подадим ее на вход тестируемого автомата. По наблюдаемой реакции найдем конечное состояние расщепляемого автомата. Если оно принадлежит подмножеству состояний автомата  $A$ , то тестируемый автомат является ЛА  $A$ , если же оно принадлежит подмножеству состояний автомата  $\tilde{A}$ , то испытуемый автомат является автоматом ЛА  $\tilde{A}$ . Для получения обоснованного вывода об исправности или неисправности испытуемого автомата необходимо только что описанный процесс реализовать для каждого из автоматов множества  $S(A)$ .

По полученным результатам вывод об исправности или неисправности НЛА делается по тому же правилу, что применялось для случая  $\mu$ -определенных и синхронизируемых автоматов.

Из [20] известно, что для любого ЛА длина установочной последовательности не превышает величины  $n$ , где  $n$  — размерность ЛА. Кроме того, известно [6]: если ЛА имеет хотя бы одну установочную последовательность длины  $k$ , то таковыми будут и все остальные входные последовательности длины  $k$ . Из последнего факта следует, что для ЛА проблема синтеза установочной последовательности в действительности легко решается. Значит, описанный выше метод синтеза тестов оказывается весьма эффективным именно для класса ЛА. Очевидно, что длина искомого теста  $u_1, u_2, u_3$  заведомо не превышает величины  $3n$ , где  $n$  — размерность ЛА. Чтобы сравнить длины тестов, напомним [20], что для автоматов с двузначным входным алфавитом общего вида аналогичная верхняя оценка равна  $2^N (N - 1)$ , где  $N$  — число состояний автомата (обычно  $n \ll N$ ). Сопоставление этих двух оценок красноречиво говорит о высоком качестве тестов по критерию длины, получаемых описанным методом для линейных, в т. ч. нечетких автоматов, по сравнению с произвольными автоматами.

## Заключение

Надежность функционирования любых цифровых устройств (ЦУ) является одним из ключевых требований. Обеспечение высокой надежности включает в качестве одного из этапов проведение их тестирования. Среди таких ЦУ важное место принадлежит современным ГИС, описываемым, как это было показано выше, математическими моделями НЛА. Проблемам тестирования ЛА и НЛА посвящен ряд публикаций. Однако предложенные в них методы тестирования нуждаются в выполнении некоторых существенных требований. В качестве примера приведем статью [22], в которой тестирование предполагает знание внутреннего состояния ЛА в любой момент времени. Доступ к такой информации для реальных ЦУ либо не выполняется вообще, либо выполняется для очень ограниченных видов ЦУ. В качестве второго примера приведем статью [23], где предложенный метод тестирования требует специальной технической реализации ЦУ. Очевидно, что для выполнения этого требования понадобятся дополнительные затраты на проектирование таких ЦУ.

Предложенный в нашей статье метод тестирования систем с нечеткими компонентами, принцип функционирования которых намного сложнее, чем у традиционных «четких» систем, не подразумевает выполнения описанных в [22, 23] требований, в чем и состоит его значительное преимущество.

## Библиографический список

1. *Zadeh L. A.* Fuzzy sets / L. A. Zadeh // Inf. Control. – 1965. – № 8. – P. 338–353.
2. *Батыршин И. З.* Нечеткие гибридные системы. Теория и практика / И. З. Батыршин, А. О. Недосекин, А. А. Стецко, В. Б. Тарасов, Н. А. Язенин, Н. Г. Ярушина. – М. : Физматлит, 2007. – 207 с.
3. *Medsker L. R.* Hybrid Intelligent Systems / L. R. Medsker. – Boston : Kluwer Academic Publishers, 1995. – 298 p.
4. *Mori H.* A hybrid expert system for fault detection in power system / H. Mori // Proc. of IEEE IJCNN. – 2002. – Vol. 2. – P. 2138–2143.
5. *Prigogine I.* The End Certainty : Time, Chaos and New Laws of Nature / I. Prigogine, I. Stengers. – NY, London : The Free Press, A Division of Simon & Shuster Inc, 1997. – 228 p.
6. *Gill A.* Linear Sequential Circuits : Analysis, Synthesis, and Applications / A. Gill. – New York : McGraw-Hill, 1966. – 216 p.
7. *Wee W.* A formulation of fuzzy automata and its application as a model of learning system / W. Wee, S. Fu // IEEE Trans. Systems Science and Cybernetics. – 1969. – Vol. 1. – N 1. – P. 215–223.
8. *Zimmermann H.-J.* Fuzzy set theory and its applications / H.-J. Zimmermann. – New York : Kluwer Academic Publishers, 2001. – 437 p.
9. *Mordeson J. N.* Fuzzy automata and language : theory and applications / J. N. Mordeson, D. S. Malik. – London : Chapman and Hall/CRC Press, 2002. – 376 p.
10. *Doostfatemech M.* New directions in fuzzy automata / M. Doostfatemech, S. C. Kremer // Journal of Approximate Reasoning. – 2005. – Vol. 38. – N 2. – P. 175–214.

11. *Li Y.* The universal fuzzy automaton / Y. Li, Q. Wang // *Fuzzy Sets and Systems*. – 2014. – Vol. 249. – P. 27–48.
12. *Cao Y.* Nondeterministic fuzzy automata / Y. Cao, Y. Ezawa // *Information Sciences*. – 2012. – N 191. – P. 86–97.
13. *Popovic Z.* Generalized directable automata, words, language and combinatorics / Z. Popovic, S. Bogdanovic, T. Petcovic, M. Ciric // III. Proceedings of the Third International Colloquium in Kyoto, Japan. – 2003. – P. 378–395.
14. *Kandel A.* Fuzzy switching and automata : theory and applications / A. Kandel, S. Lee. – London : Edward Arnold Publishers Ltd, 1979. – 534 p.
15. *Karthikeyan V.* Directable fuzzy automata / V. Karthikeyan, M. Rajuseker // *Intern. Journal of Computer Applications*. – 2015. – Vol. 131. – N 12. – P. 1–4.
16. *Karthikeyan V.* Generalized directable fuzzy automata / V. Karthikeyan, M. Rajuseker // *Intern. Journal of Computer Applications*. – 2015. – Vol. 125. – N 12. – P. 1–5.
17. *Speranskii D. V.* Experiments with fuzzy finite state machines / D. V. Speranskii // *Automation and Remote Control*. – 2015. – Vol. 76. – N 2. – P. 278–291.
18. *Speranskiy D. V.* Synchronization of Fuzzy Linear Automata / D. V. Speranskii // *Automatic Control and Computer Sciences*. – 2016. – Vol. 50. – N 2. – P. 72–79.
19. *Speranskii D. V.* On testing linear automata / D. V. Speranskii // *Automation and Remote Control*. – 2000. – Vol. 61. – N 5. – P. 858–865.
20. *Gill A.* Introduction to the theory of finite-state machines / A. Gill. – New York : McGraw-Hill, 1962. – 212 p.
21. *Сперанский Д. В.* Тестирование нечетких линейных автоматов / Д. В. Сперанский // *Изв. Саратов. ун-та*. – 2019. – № 2. – P. 61–66. – (Математика. Механика. Информатика)
22. *Agibalov G. P.* On simple experiments for linear initial automata / G. P. Agibalov, A. G. Yufat // *Automatic Control and Computer Sciences*. – 1972. – Vol. 6. – N 2. – P. 17–19.
23. *Kolesov N. V.* Designing a checking test for a linear finite automata / N. V. Kolesov // *Automation and Remote Control*. – 1982. – Vol. 43. – № 2. – P. 185–199.

**D. V. Speransky**

**A. V. Gorelik**

**I. A. Zhuravlev**

**A. V. Orlov**

*The department of "Systems for Transport Infrastructure Management",  
Russian University of Transport (MIIT), Moscow*

## **TESTING THE SYSTEMS WITH FUZZY DISCRETE COMPONENTS**

Modern complex systems are build based on heterogeneous components with various interrelationships, fuzziness, and uncertainty of the laws of functioning of the components and the system. An important class of such systems comprises hybrid intelligent systems, where the components are represented by analytical models of fuzzy objects, artificial neural networks, expert systems, etc. The article considers fuzzy discrete devices being, for example, part of hybrid systems. Fuzzy linear automata (FLA) introduced in the article are used as a mathematical model of such components. The problem of test synthesis for FLA used to detect faults in them is discussed. Normal single-stuck faults

are permissible faults in FLA. The faults originating from the replacement of some elements of the FLA characteristic matrices with others (from a given set of alternative ones) are also permissible. Test synthesis methods for FLA belonging to the class of m-deterministic and synchronized automata, as well as arbitrary linear automata have been developed. The first two methods are based on reducing the considered problem of solving systems of linear algebraic equations. It should be noted that there is a well-developed mathematical apparatus applying a few effective methods for searching for such solutions. The tests synthesized by these methods for m-deterministic and synchronized FLA are sufficiently short and do not exceed the memory depth of the corresponding automata. It is shown that the conditions for an FLA referring to the two first classes mentioned above are not too strict. It is noted that the known methods of test synthesis for linear automata require compliance with much more stringent requirements. The synthesis method for arbitrary FLA also builds short tests.

Technical diagnostics, discrete systems with memory, linear sequential machines, fuzzy linear automata, testing, control test synthesis methods

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-518-531

## References

1. Zadeh L. A. (1965) Fuzzy sets. *Inf. Control*, no. 8, pp. 338–353.
2. Batyrshin I. Z., Nedosekin A. O., Stetsko A. A., Tarasov V. B., Yazenin N. A. & Yarushina N. G. (2007) Nechetkiye gibridnyye sistemy. Teoriya i praktika [Fuzzy hybrid systems. Theory and practice]. Moscow, Fizmatlit Publ., 207 p. (In Russian)
3. Medsker L. R. (1995) Hybrid Intelligent Systems. Boston, Kluwer Academic Publishers, 298 p.
4. Mori H. (2002) A hybrid expert system for fault detection in power system. *Proc. of IEEE IJCNN*, vol. 2, pp. 2138–2143.
5. Prigogine I. & Stengers I. (1997) The End Certainty: Time, Chaos and New Laws of Nature. NY, London, The Free Press, A Division of Simon & Shuster Inc, 228 p.
6. Gill A. (1966) Linear Sequential Circuits: Analysis, Synthesis, and Applications. New York, McGraw-Hill Press, 216 p.
7. Wee W. & Fu S. (1969) A formulation of fuzzy automata and its application as a model of learning system. *IEEE Trans. Systems Science and Cybernetics*, vol. 1, no. 1, pp. 215–223.
8. Zimmermann H.-J. (2001) Fuzzy set theory and its applications. New York, Kluwer Academic Publishers, 437 p.
9. Mordeson J. N. & Malik D. S. (2002) Fuzzy automata and language: theory and applications. London, Chapman and Hall/CRC Press, 376 p.
10. Doostfatemech M. & Kremer S. C. (2005) New directions in fuzzy automata. *Journal of Approximate Reasoning*, vol. 38, no. 2, pp. 175–214.
11. Li Y. & Wang Q. (2014) The universal fuzzy automaton. *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 249, pp. 27–48.
12. Cao Y. & Ezawa Y. (2012) Nondeterministic fuzzy automata. *Information Sciences*, no. 191, pp. 86–97.
13. Popovic Z., Bogdanovic S., Petcovic T. & Ciric M. (2003) Generalized directable automata, words, language and combinatorics. III. *Proceedings of the Third International Colloquium in Kyoto, Japan*, pp. 378–395.
14. Kandel A. & Lee S. (1979) Fuzzy switching and automata: theory and applications. London, Edward Arnold Publishers Ltd, 534 p.
15. Karthikeyan V. & Rajuseker M. (2015) Directable fuzzy automata. *Intern. Journal of Computer Applications*, vol. 131, no. 12, pp. 1–4.

16. Karthikeyan V. & Rajuseker M. (2015) Generalized directable fuzzy automata. *Intern. Journal of Computer Applications*, vol. 125, no. 12, pp. 1–5.
17. Speranskiy D. V. (2015) Experiments with fuzzy finite state machines. *Automation and Remote Control*, vol. 76, no. 2, pp. 278–291.
18. Speranskiy D. V. (2016) Synchronization of Fuzzy Linear Automata. *Automatic Control and Computer Sciences*, vol. 50, no. 2, pp. 72–79.
19. Speranskiy D. V. (2000) On testing linear automata. *Automation and Remote Control*, vol. 61, no. 5, pp. 858–865.
20. Gill A. (1962) Introduction to the theory of finite-state machines. New York, McGraw-Hill Press, 212 p.
21. Speranskiy D. V. (2019) Testirovaniye nechetkikh lineynykh avtomatov [Fuzzy Linear Automata Testing]. *Izv. of Saratov University*, no. 2, pp. 61–66. – (Mathematics. Mechanics. Informatics) (In Russian)
22. Agibalov G. P. & Yufat A. G. (1972) On simple experiments for linear initial automata. *Automatic Control and Computer Sciences*, vol. 6, no. 2, pp. 17–19.
23. Kolesov N. V. (1982) Designing a checking test for a linear finite automata. *Automation and Remote Control*, vol. 43, no. 2, pp. 185–199.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Вал. В. Сапожниковым  
Поступила в редакцию 12.05.2020, принята к публикации 15.09.2020*

**СПЕРАНСКИЙ Дмитрий Васильевич** — доктор технических наук, профессор кафедры «Системы управления транспортной инфраструктурой» Российского университета транспорта  
e-mail: Speranskiy.dv@gmail.com

**ГОРЕЛИК Александр Владимирович** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы управления транспортной инфраструктурой» Российского университета транспорта  
e-mail: agorelik@yandex.ru

**ЖУРАВЛЕВ Илья Александрович** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы управления транспортной инфраструктурой» Российского университета транспорта  
e-mail: zhuravlev\_ia@mail.ru

**ОРЛОВ Александр Валерьевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы управления транспортной инфраструктурой» Российского университета транспорта  
e-mail: summerman1978@gmail.com

© Сперанский Д. В., Горелик А. В., Журавлев И. А., Орлов А. В., 2020

UDC 004.052.32+681.518.5

**V.V. Sapozhnikov, D. Eng. Sci.,**

**VI.V. Sapozhnikov, D. Eng. Sci.**

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

**D.V. Efanov, D. Eng. Sci.**

*"VEGA Group" LLC, Saint Petersburg, Russian Federation;  
Higher School of Transport, Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport,  
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation;  
The Department of "Automation, Remote Control and Communication on Railway Transport",  
Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation*

## **THE FEATURES OF THE COMBINATIONAL LOGIC CIRCUITS CONCURRENT ERROR-DETECTION SYSTEMS BASED ON THE SEARCH FOR SYMMETRICALLY-INDEPENDENT OUTPUTS GROUPS CONSTRUCTION**

The authors of the article found that in the use of classical sum codes (Berger codes) and a some of their modifications in the combinational circuits testing organization it is possible to detect both unidirectional and part of non-unidirectional errors in the data vectors. It is shown that it is possible to search for such groups of outputs of combinational circuits where only symmetrical errors occur due to stuck-at-faults of elements of the internal structure of the circuits. Such groups of outputs are designated as symmetrically-independent outputs (SI-groups of outputs). The conditions of belonging of the group of outputs of the combinational circuits to the SI-groups of outputs are determined. It is shown that each SI-group of outputs can be controlled using a separate testing subsystem based on the code with the detection of any non-symmetrical errors (in particular, and any non-symmetrical errors up to certain multiplicities). The ways of searching for SI-groups of outputs in the combinational circuits testing organization are presented.

Combinational circuit, self-checking structure, unidirectional error, symmetrical error, asymmetrical error, code with the unidirectional and asymmetrical error detection, groups of symmetrically-independent outputs

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-532-549

### **1. Introduction**

The methods of redundant coding are widely used in the self-checking discrete devices developing. These methods are used both at the stages of automata synthesis and at the organization of test and functional diagnosis systems [1, 2]. The features of error detection by redundant codes allow developers of discrete devices to give the properties of testability and fault detection to their structures [3].

The redundant coding is also used in the testing organization of the combinational components of discrete devices, or combination logic circuits [4]. The use of redundant coding in this case implies, on the one hand, taking into account the characteristics of error detection by the certain code, and on the other hand, taking into account the structural features of the combinational circuits themselves. Among such properties of codes, it is possible to allocate possibilities of certain type's error detection (combinations of ones and zero bits distortions) and multiplicities (number of the bits distorted at an error) [5]. From the standpoint of the combinational circuit structure it is the characteristics of its implementation: ranking of logic elements (or element groups) in the structure, the relationships between them, the presence of branches, the number of paths between the poles of the circuit with odd and even number of inversions, etc. [6]. In this situation, there are two possible ways. The first way consists in choosing a code "for" a given circuit structure: searching for a code with the desired features or selecting groups of circuit outputs for separate control by one or another attribute, etc. The second way involves a special transformation of the combinational circuit structure into some structure that is controllable by the selected code. It should be such a structure that allows occurrence of errors only of a certain type or multiplicities.

The codes that are focused on the detection and not on the correction of faults are most commonly used in the synthesis of fault detection combinational circuits. This makes it possible to obtain devices with a relatively small structural redundancy (as a rule, compared to duplication and subsequent comparison of the values of the self-titled outputs [7]). Among these codes are parity codes [8], constant-weight codes [9], codes with summation (Berger codes) [10] and their various modifications [11–13]. For example, parity codes do not detect any errors with even multiplicities, but they detect any single distortions. This property of parity codes is effectively used in organizing of the control of combinational circuits by groups of independent outputs (I-groups of outputs) or after converting the circuit structure into a circuit with one I-group of outputs [14–16]. Another example is the use of constant-weight codes and classical Berger codes with the property of detecting any unidirectional errors (this property of these codes is often used). In this case, either the search for groups of unidirectionally-independent outputs (UI-groups of outputs) is performed, or the transformation of the circuit structure into a circuit with one UI-group of outputs [17, 18]. It is possible to take into account other features of redundant codes and structures of controlled combinational circuits [19, 20].

This paper is devoted to the description of the key results of the research of the development of testing methods for combinational circuits based on the properties of codes aimed at detecting errors of certain types and multiplicities. It is proposed to organize testing of combinational circuits by the property of detecting any errors, except for multidirectional errors of even multiplicity, associated with the simultaneous distortion of the same number of zero and ones bits (symmetrical errors). This property is possessed by both constant-weight codes and Berger codes and some of their modifications.

## 2. Types of errors and codes with the detection of certain types of errors

The classification of errors in vectors of redundant codes proposed in [5] implies their division into several types: symmetrical, unidirectional, and asymmetrical errors. *Symmetrical* errors are associated with the simultaneous distortion of the same number of zero and ones bits. *Unidirectional* errors include errors caused by distortions of only zero or only ones bits. *Asymmetrical* errors occur while distorting an unequal number of zero and ones bits. It should be noted that these types of errors are distributed in various proportions in the code vectors depending on their lengths. With an increase in the length of the code vector, the proportion of asymmetrical errors increases, while the proportion of unidirectional errors gradually, while symmetrical errors, slightly decreases. For example, for the case  $m = 10$ , subject to the formation of a full set of output combinations, the proportion of unidirectional errors is approximately 0.2 %, symmetrical — 24.6 %, and asymmetrical — 75.2 %.

Among the variety of codes aimed at detecting errors, special classes of codes are detected that detect any unidirectional errors or any unidirectional errors up to the established multiplicity  $d_v$  — the so-called  $UED(m, k)$  and  $d_v$ - $UED(m, k)$  codes. Such codes, for example, include Berger codes and Bose-Lin codes (modular sum codes). Berger codes are  $UED(m, k)$ -codes, and Bose-Lin codes are  $d_v$ - $UED(m, k)$ , where the  $d_v$  value is determined by the value of the module selected when constructing the code [21, 22].

In [23], it was shown that in self-checking devices constructing, the possibility of detecting by some codes, in addition to any unidirectional errors, also any asymmetrical errors in data vectors can also be taken into account. We introduce the class of codes with the detection of any unidirectional and asymmetrical errors —  $UAED(m, k)$ -codes, as well as the class of codes with the detection of any unidirectional and asymmetrical errors to the established values of the multiplicities  $d_v$  and  $d_\alpha$ , respectively —  $d_v, d_\alpha$ - $UAED(m, k)$ -codes. Taking into account the features of  $UAED(m, k)$  and  $d_v, d_\alpha$ - $UAED(m, k)$ -codes allows us to reduce the structural redundancy of the synthesized discrete devices.

In organizing of combinational circuits control with using  $UAED(m, k)$  and  $d_v, d_\alpha$ - $UAED(m, k)$ -codes, the two approaches described above are also possible, however, the UI-groups expand to the so-called unidirectionally/asymmetrically-independent output groups (UAI-groups). This allows us to simplify the final structures of self-checking combinational circuits.

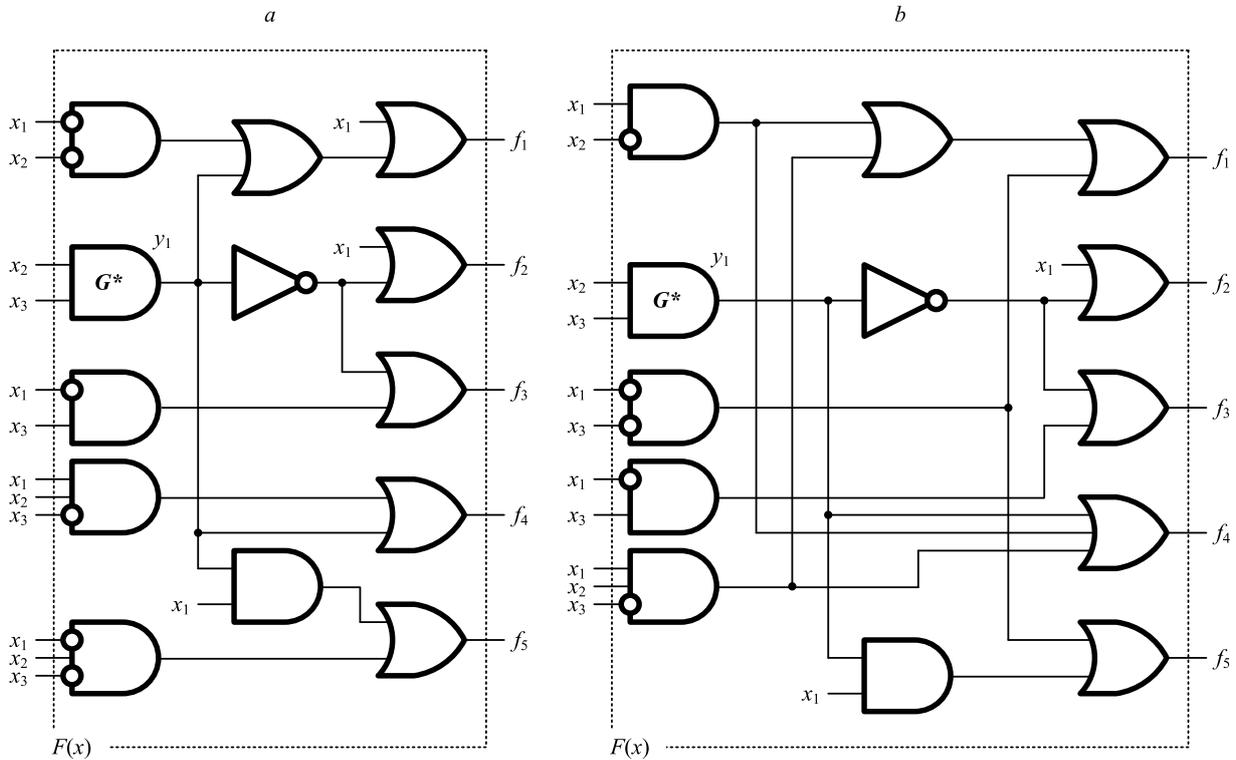
The search for UAI-groups of outputs is similar to the search for groups of outputs that allow only symmetrical distortions. Here we describe the search conditions for such output groups of combinational circuits.

## 3. Search terms for checkable output groups

We introduce the following notation:  $\{f_1, f_2, \dots, f_m\}$  is set of combinational circuit outputs;  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  is set of combinational circuit inputs;  $\omega_i^{ar} = \{f_{j_1}, f_{j_2}, \dots, f_{j_q}\}$  is

a subset of combinational circuit outputs,  $(j_1, j_2, \dots, j_q \in \{1, 2, \dots, m\})$ , which are distorted when the output element failure with the value of the output function  $y_i$  (element  $G_i$ ) is input into the device and when the binary vector  $a_r = \langle x_1 x_2 \dots x_n \rangle$ , where  $a_r$  is a binary decimal equivalent,  $a_r \in \{0, 1, \dots, 2^n\}$ ,  $q \in \{2, 3, \dots, m\}$  receipts on the input.

Consider the combinational circuits shown in Fig. 1.



**Figure 1.** The combinational circuit in which a symmetrical error may occur at the outputs (a), and the combinational circuit in which a symmetrical error at the outputs are eliminated (b)

The circuit shown in Fig. 1, a refers to circuits at the outputs of which a symmetrical error may occur (Table 1). For this we have:

$$\omega_1^0 = \{f_2, f_3, f_4\};$$

$$\omega_1^1 = \{f_2, f_4\};$$

$$\omega_1^2 = \{f_1, f_2, f_3, f_4\};$$

$$\omega_1^3 = \{f_1, f_2, f_4\};$$

$$\omega_1^4 = \{f_3, f_4, f_5\};$$

$$\omega_1^5 = \{f_3, f_4, f_5\};$$

**Table 1.** The description of the operation of circuit Fig. 1, *a* in the event of faults in the logic element  $G^*$ 

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$\frac{\partial f_1}{\partial y_1}$	$\frac{\partial f_2}{\partial y_1}$	$\frac{\partial f_3}{\partial y_1}$	$\frac{\partial f_4}{\partial y_1}$	$\frac{\partial f_5}{\partial y_1}$
0	0	0	1	1	1	0	0	0	1 (1→0)	1 (1→0)	1 (0→1)	0
0	0	1	1	1	1	0	0	0	1 (1→0)	0	1 (0→1)	0
0	1	0	0	1	1	0	1	1 (0→1)	1 (1→0)	1 (1→0)	1 (0→1)	0
0	1	1	1	0	1	1	0	1 (1→0)	1 (0→1)	0	1 (1→0)	0
1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1 (1→0)	1 (0→1)	1 (0→1)
1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1 (1→0)	1 (0→1)	1 (0→1)
1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1 (1→0)	0	1 (0→1)
1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1 (0→1)	1 (1→0)	1 (1→0)

$$\omega_1^6 = \{f_3, f_5\};$$

$$\omega_1^7 = \{f_3, f_4, f_5\}.$$

At the outputs of the circuit depicted in Fig. 1, *b*, despite the topology, the occurrence of symmetrical errors is excluded (Table 2). For this we have:

$$\omega_1^0 = \{f_2, f_3, f_4\};$$

$$\omega_1^1 = \{f_1, f_2, f_4, f_5\};$$

$$\omega_1^2 = \{f_2, f_3, f_4\};$$

$$\omega_1^3 = \{f_1, f_2, f_4, f_5\};$$

$$\omega_1^4 = \{\emptyset\};$$

$$\omega_1^5 = \{\emptyset\};$$

$$\omega_1^6 = \{\emptyset\};$$

$$\omega_1^7 = \{f_1, f_3, f_4\}.$$

**Table 2.** The description of the operation of circuit Fig. 1, *b* in the event of faults in the logic element  $G^*$

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$\frac{\partial f_1}{\partial y_1}$	$\frac{\partial f_2}{\partial y_1}$	$\frac{\partial f_3}{\partial y_1}$	$\frac{\partial f_4}{\partial y_1}$	$\frac{\partial f_5}{\partial y_1}$
0	0	0	1	1	1	0	1	0	1 (1→0)	1 (1→0)	1 (0→1)	0
0	0	1	0	1	1	0	0	1 (0→1)	1 (1→0)	0	1 (0→1)	1 (0→1)
0	1	0	1	1	1	0	1	0	1 (1→0)	1 (1→0)	1 (0→1)	0
0	1	1	1	0	1	1	1	1 (1→0)	1 (0→1)	0	1 (1→0)	1 (1→0)
1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1 (1→0)	0	0
1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1 (1→0)	0	0
1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1 (1→0)	0	0
1	1	1	1	1	0	1	0	1 (1→0)	0	1 (0→1)	1 (1→0)	0

We denote by  $V_t$  the set of different subsets  $\omega_t^{ar}$  with an even number of elements; if there are several identical subsets  $\omega_t^{ar}$ , any one of them is included in the set  $V_t$ .

For Fig. 1, *a* we have:  $V_1 = \{\omega_1^2 = \{f_1, f_2, f_3, f_4\}, \omega_1^1 = \{f_2, f_4\}, \omega_1^6 = \{f_3, f_5\}\}$ .

For Fig. 1, *b* we have:  $V_1 = \{\omega_1^1 = \{f_1, f_2, f_4, f_5\}\}$ .

A subset of the outputs of the combinational circuit  $\{f_{j_1}, f_{j_2}, \dots, f_{j_q}\}$  ( $j_1, j_2, \dots, j_q \in \{1, 2, \dots, m\}$ ) is called a *symmetrically-independent group (SI-group)* if the failure of the output of any element  $G_t$  in the device structure does not cause a symmetrical type error on these outputs.

**Theorem 1.** A failure of the output of the element  $G_t$  does not cause a symmetrical type error on the set of outputs of the control unit  $W = \{f_{j_1}, f_{j_2}, \dots, f_{j_p}\}$ ,  $p \in \{2, 3, \dots, m\}$ , if the following condition:

$$\frac{\partial f_{k_1}}{\partial y_t} \cdot \frac{\partial f_{k_2}}{\partial y_t} \cdot \dots \cdot \frac{\partial f_{k_d}}{\partial y_t} \cdot \left( \frac{\partial f_{h_1}}{\partial y_t} \cdot \frac{\partial f_{h_2}}{\partial y_t} \cdot \dots \cdot \frac{\partial f_{h_{p-d}}}{\partial y_t} \right) Q \left( R_d^{d/2} (f_{k_1}, f_{k_2}, \dots, f_{k_d}) \right) = 0, \quad (1)$$

is satisfied for each subset  $\omega_t^{ar} = \{f_{k_1}, f_{k_2}, \dots, f_{k_d}\}$ , such that  $\omega_t^{ar} \in W$  и  $\omega_t^{ar} \in V_t$ , where  $f_{h_1}, f_{h_2}, \dots, f_{h_{p-d}} \in \{f_{j_1}, f_{j_2}, \dots, f_{j_p}\} \setminus \{f_{k_1}, f_{k_2}, \dots, f_{k_d}\}$ ; the function  $R_d^{d/2}(f_{k_1}, f_{k_2}, \dots, f_{k_d})$  is a conjunction disjunction  $f_{k_1} f_{k_2} \cdot \dots \cdot f_{k_d}$ ,  $f_k \in \{0, 1\}$ , in which the  $\frac{d}{2}$  variables have direct values, and the rest of  $\frac{d}{2}$  the variables have inverse values, and the function  $Q \left( R_d^{d/2} (f_{k_1}, f_{k_2}, \dots, f_{k_d}) \right)$  is a function obtained by substituting into a function  $R_d^{d/2}$

instead of designating the output functions  $f_i$  their representations through input variables.

**Proof.** Consider the left side of the equality (1). We introduce the following notation:

$$A(y_t) = \frac{\partial f_{k_1}}{\partial y_t} \cdot \frac{\partial f_{k_2}}{\partial y_t} \cdot \dots \cdot \frac{\partial f_{k_d}}{\partial y_t}, \quad B(y_t) = \frac{\overline{\partial f_{h_1}}}{\partial y_t} \cdot \frac{\overline{\partial f_{h_2}}}{\partial y_t} \cdot \dots \cdot \frac{\overline{\partial f_{h_{p-d}}}}{\partial y_t},$$

$$C = Q \left( R_d^{d/2} (f_{k_1}, f_{k_2}, \dots, f_{k_d}) \right).$$

In accordance with the this theorem, in studying the element  $G_r$ , it is necessary to consider all possible subsets of outputs  $\omega_t^{a_r}$ , that are distorted when one or more vectors of input variables are received at the device input. In this case, it is enough to consider only subsets with an even number of elements, because on subsets with an odd number of outputs it is impossible to generate errors of a symmetrical type. The second feature of the considered subsets  $\omega_t^{a_r}$  is that when the input vector  $a_r$  arrives, the values of all the outputs included in the subset are distorted, and any other outputs are not distorted.

All subsets  $\omega_t^{a_r}$  with the indicated properties are included by construction in the set  $V_t$  and must be considered by the hypothesis of the theorem. There are no other subsets  $\omega_t^{a_r}$  other than those indicated above.

In accordance with the hypothesis of the theorem, each subset  $\omega_t^{a_r} \in V_t$  is considered separately.

The left side of the equation (1) contains three cofactors:  $A(y_t)$ ,  $B(y_t)$  and  $C$ . The expression  $A(y_t)$  defines those input vectors, upon receipt of which the values of all the outputs included in the considered subset  $\omega_t^{a_r}$  are distorted. The expression  $B(y_t)$  captures those input vectors, upon receipt of which all the outputs of the device that are not included in the subsets  $\omega_t^{a_r}$  are not distorted. The product  $A(y_t)B(y_t)$  allows you to calculate all those input vectors, upon receipt of which only those outputs that are part of a subset  $\omega_t^{a_r}$  (and all at the same time) are distorted, and not one of the outputs that do not belong to this subset is distorted. It is necessary to check the possibility of a symmetrical error especially for these input vectors.

For this purpose, the left part of expression (1) includes the cofactor  $C$ , which allows calculating the  $D(\omega_t^{a_r})$  set of all input vectors, upon receipt of which, in principle, symmetrical errors may occur. A symmetrical error is possible if the half of the output functions on the input vector in a subset  $\omega_t^{a_r}$  take the value 0, and the rest take the value 1. An expression  $R_d^{d/2} (f_{k_1}, f_{k_2}, \dots, f_{k_d})$ , represented as a function that depends on variables  $f_{k_1}, f_{k_2}, \dots, f_{k_d}$ , defines combinations of these variables that meet the specified condition. The replacing in this expression the notation of the output functions by their representations through the input variables allows us to define the set  $D(\omega_t^{a_r})$ .

If  $A(y_t)B(y_t)C \neq 0$ , then this means that there is at least one input vector, upon receipt of which a symmetrical error occurs. If there is an expression  $A(y_t)B(y_t)C = 0$  for all subsets  $\omega_i^{ar} \in V_t$ , then the failure of the output of the element  $G_i$  on the considered set  $W$  of the outputs of the combinational circuit does not cause symmetrical errors on any input vector.

*The theorem is proved.*

For the circuit of Fig. 1, *a* we consider the set  $W = \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5\}$  and the element  $G^*$ . To verify the conditions of the theorem regarding the element  $G^*$  it is necessary to verify condition (1) for three subsets:  $\{f_2, f_4\}$ ,  $\{f_3, f_5\}$  and  $\{f_1, f_2, f_3, f_4\}$ .

For the subset  $\{f_2, f_4\}$  we have:

$$\frac{\partial f_2}{\partial y_1} \cdot \frac{\partial f_4}{\partial y_1} \cdot \left( \frac{\partial f_1}{\partial y_1} \cdot \frac{\partial f_3}{\partial y_1} \cdot \frac{\partial f_5}{\partial y_1} \right) \cdot Q \left( R_d^{d/2}(f_2, f_4) \right). \tag{2}$$

We calculate the derivatives (see formula (2) and Table 1):

$$\frac{\partial f_1}{\partial y_1} = \overline{x_1 x_2}, \quad \frac{\partial f_2}{\partial y_1} = \overline{x_1}, \quad \frac{\partial f_3}{\partial y_1} = x_1 \vee \overline{x_1 x_3}, \quad \frac{\partial f_4}{\partial y_1} = \overline{x_1} \vee x_1 \overline{x_2} \vee x_1 x_3, \quad \frac{\partial f_5}{\partial y_1} = x_1.$$

We calculate the following expressions for checking the condition (1):

$$A(y_t) = \frac{\partial f_2}{\partial y_1} \cdot \frac{\partial f_4}{\partial y_1} = \overline{x_1} (\overline{x_1} \vee x_1 \overline{x_2} \vee x_1 x_3) = \overline{x_1}; \tag{3}$$

$$B(y_t) = \frac{\partial f_1}{\partial y_1} \cdot \frac{\partial f_3}{\partial y_1} \cdot \frac{\partial f_5}{\partial y_1} = \overline{x_1 x_2} \cdot x_1 \vee \overline{x_1 x_3} \cdot x_1 = \overline{x_1 x_2 x_3}; \tag{4}$$

$$R_d^{d/2}(f_2, f_4) = f_2 \overline{f_4} \vee \overline{f_2} f_4;$$

$$Q \left( R_d^{d/2}(f_2, f_4) \right) = (x_1 \vee \overline{x_1 x_2}) \overline{x_1 x_2 \vee x_2 x_3} \vee \overline{x_1 \vee x_1 x_2} (x_1 x_2 \vee x_2 x_3) = \overline{x_1} \vee x_1 \overline{x_2}. \tag{5}$$

As a result, we have:

$$\overline{x_1} \cdot \overline{x_1 x_2 x_3} \cdot (\overline{x_1} \vee x_1 \overline{x_2}) = \overline{x_1 x_2 x_3} \neq 0.$$

Since the left side of the obtained expression is not equal to zero, the condition of the theorem is not fulfilled and the fault of the element  $G^*$  causes a symmetrical error. The left side of the resulting expression defines a function that defines the input vectors for which this error occurs. In this case, it is a vector  $x_1 x_2 x_3$ .

For the circuit, shown in Fig. 1, *b*, we also consider the subset  $\{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5\}$  and the element  $G^*$ . In this case, verification of condition (1) is required for only one subset  $\{f_1, f_2, f_4, f_5\}$ .

In this case

$$R_d^{d/2}(f_1, f_2, f_4, f_5) = f_1 f_2 \overline{f_4} \overline{f_5} \vee \overline{f_1} \overline{f_2} \overline{f_4} \overline{f_5} \vee f_1 \overline{f_2} \overline{f_4} f_5 \vee \overline{f_1} f_2 \overline{f_4} \overline{f_5} \vee \overline{f_1} \overline{f_2} f_4 \overline{f_5} \vee \overline{f_1} f_2 f_4 f_5,$$

$$Q\left(R_d^{d/2}(f_1, f_2, f_4, f_5)\right) = 0.$$

Therefore, condition (1) is satisfied and the failure of the element  $G^*$  does not cause symmetrical errors on the set of all outputs of the circuit.

The following statement is obvious.

**Theorem 2.** *A subset of the outputs of the combinational circuit  $\{f_{j_1}, f_{j_2}, \dots, f_{j_p}\}$  ( $j_1, j_2, \dots, j_p \in \{1, 2, \dots, m\}$ ) is a SI-group when each element in its structure satisfies the conditions of Theorem 1.*

Based on Theorems 1 and 2, it is possible to construct effective algorithms for searching for SI-groups of outputs and using these groups to obtain completely verifiable structures of combinational logic circuits using  $UAED(m, k)$  and  $d_v, d_\alpha$ - $UAED(m, k)$  codes by analogy with how this was done in [3, 18].

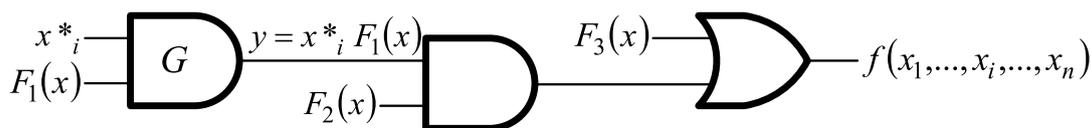
#### 4. The inputs of the logic elements fault detection

In all studies devoted to the synthesis and analysis of self-checking discrete devices, only stuck-at-faults of the outputs of logic elements are considered and modeled. However, stuck-at-faults also include faults in the individual inputs of the elements that are connected to the inputs of the device. For example, the previously considered circuit (Fig. 1, *a*) contains 13 stuck-at-faults of the outputs of the logic elements and 15 stuck-at-faults of the inputs of the logic elements.

Condition (1) allows us to formulate the following statement.

**Theorem 3.** *If a fault in the output of a logic element in a combinational circuit does not cause a symmetrical type error on the set of outputs of the device  $\{f_{j_1}, f_{j_2}, \dots, f_{j_p}\}$  ( $j_1, j_2, \dots, j_p \in \{1, 2, \dots, m\}$ ), then a stuck-at-faults in the input of the same element does not cause the same error.*

**Proof.** In fact, consider the element  $G$  at the output of which the function  $y$  is realized. Let element  $G$  have an input  $x_i^*$  that is connected directly to the input of the device  $x_i$ . On the second input, some function  $F_1(x)$  is implemented. Consider the case when an element  $G$  implements a conjunction and enters into the system of realization of a function  $f$  given in disjunctive normal form. In general, such a scheme can be represented in the form of the device shown in Fig. 2.



**Figure 2.** Combinational circuit

The function

$$f(x) = (x_i^* F_1(x)) F_2(x) \vee F_3(x) = y F_2(x) \vee F_3(x), \tag{6}$$

where  $F_1(x)$ ,  $F_2(x)$  and  $F_3(x)$  are some arbitrary functions of the variables  $x_1, \dots, x_i, \dots, x_n$ , is implemented at the output of the circuit.

The input variable  $x_i$  that is fed to the input of the element is indicated with a superscript  $x_i^*$ . This index means that the failure of the input of the element  $G$  corresponds to fixing the variable  $x_i^*$  to a constant, and the variables  $x_i$  received at the inputs of other elements of the circuit are not distorted.

To calculate Boolean differences, we apply the formula

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x_i} = [f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) \oplus f(x_1, \dots, 0, \dots, x_n)] \vee [f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) \oplus f(x_1, \dots, 1, \dots, x_n)]. \tag{7}$$

In this case, we have (see formulas (6) and (7)): if  $x_i^* = 0$ , then  $y = 0$  and  $f(x_1, \dots, 0, \dots, x_n) = F_3(x)$ ; if  $x_i^* = 1$ , then  $y = F_1(x)$  and  $f(x_1, \dots, 1, \dots, x_n) = F_1(x) F_2(x) \vee F_3(x)$ .

Then

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x_i} = [f(x) \oplus F_3(x)] \vee [f(x) \oplus (F_1(x) F_2(x) \vee F_3(x))]. \tag{8}$$

On the other hand, we have:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(x)}{\partial x_i} &= [f(x) \oplus (0 \cdot F_2(x) \vee F_3(x))] \vee [f(x) \oplus (1 \cdot F_2(x) \vee F_3(x))] = \\ &= [f(x) \oplus F_3(x)] \vee [f(x) \oplus (F_2(x) \vee F_3(x))]. \end{aligned} \tag{9}$$

Let's compare expressions (8) and (9).

Each of the derivatives consists of two functions enclosed in square brackets, which are interconnected by a disjunction sign. Consider the functions enclosed in second square brackets. The relations are

$$F_1(x) F_2(x) \vee F_3(x) \rightarrow F_2(x) \vee F_3(x), \tag{10}$$

$$f(x) \oplus (F_1(x)F_2(x) \vee F_3(x)) \rightarrow f(x) \oplus (F_2(x) \vee F_3(x)). \quad (11)$$

Since in both expressions (8) and (9) the functions enclosed in the first square brackets are identical, it follows from (10) and (11) that

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x_i} \rightarrow \frac{\partial f(x)}{\partial y}. \quad (12)$$

Thus, the Boolean difference of a variable  $x_i^*$  contains only those input sets that are included in the Boolean difference of the output of the element  $G$ .

*The theorem is proved.*

The Table 3 and 4 shows the Boolean differences for the inputs  $x_2$  and  $x_3$  of the element  $G^*$  in the diagram Fig. 1, *a*. From a comparison of the Tables 1 and 3, 4 it follows that relation (12) holds in all cases. For example:

$$\frac{\partial f_1}{\partial y_1(x_2)} = \overline{x_1 x_2 x_3} \rightarrow \frac{\partial f_1}{\partial y_1} = \overline{x_1 x_2},$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial y_1(x_3)} = \overline{x_1 x_2} \rightarrow \frac{\partial f_2}{\partial y_1} = \overline{x_1}, \text{ etc.}$$

It can be seen from expression (7) that the Boolean difference combines two checking tests. In the first square brackets, the checking test of the input (or output) of the element for the “stuck-at-0” fault is calculated, and in the second square brackets — for the “stuck-at-1” fault. Therefore, the value of the Boolean difference is determined only

**Table 3.** The description of the circuit Fig. 1, *a* in case of input  $x_2$  faults

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$\frac{\partial f_1}{\partial y_1}$	$\frac{\partial f_2}{\partial y_1}$	$\frac{\partial f_3}{\partial y_1}$	$\frac{\partial f_4}{\partial y_1}$	$\frac{\partial f_5}{\partial y_1}$
0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	1	1	0	0	0	1 (0→1)	0	1 (0→1)	0
0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	1	1	0	1 (1→0)	1 (0→1)	0	1 (1→0)	0
1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1 (1→0)	1 (0→1)	1 (0→1)
1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1 (0→1)	1 (1→0)	0

**Table 4.** The description of the circuit Fig. 1, b in case of input  $x_3$  faults

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$\frac{\partial f_1}{\partial y_1}$	$\frac{\partial f_2}{\partial y_1}$	$\frac{\partial f_3}{\partial y_1}$	$\frac{\partial f_4}{\partial y_1}$	$\frac{\partial f_5}{\partial y_1}$
0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	1	1	0	1	1 (0→1)	1 (1→0)	1 (1→0)	1 (0→1)	0
0	1	1	1	0	1	1	0	1 (1→0)	1 (0→1)	0	1 (1→0)	0
1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1 (1→0)	0	1 (0→1)
1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1 (0→1)	1 (1→0)	0

by the values of the functions  $f(x_1, \dots, 0, \dots, x_n)$  and  $f(x_1, \dots, 1, \dots, x_n)$  and does not depend on the structure of the subcircuit, which connects the output of the element  $G$  with the output of the device, and the structure of the subcircuit that implements the function  $F_1(x)$  at the second input of the element  $G$ , because their verification tests are preserved with equivalent transformations of combinational devices. In this regard, relation (12) is satisfied for any implementation of the function  $f(x)$ .

Denote by  $y_t(x_i)$  the input variable, which is fed to the input of the element  $G_t$ . Then the condition under which the input  $y_t(x_i)$  failure does not cause a symmetrical error on the set of outputs of the combinational circuit  $W = \{f_{j_1}, f_{j_2}, \dots, f_{j_p}\}$  is written as follows:

$$\frac{\partial f_{k_1}}{\partial y_t(x_i)} \cdot \frac{\partial f_{k_2}}{\partial y_t(x_i)} \cdot \dots \cdot \frac{\partial f_{k_d}}{\partial y_t(x_i)} \times \left( \frac{\partial f_{h_1}}{\partial y_t(x_i)} \cdot \frac{\partial f_{h_2}}{\partial y_t(x_i)} \cdot \dots \cdot \frac{\partial f_{h_{p-d}}}{\partial y_t(x_i)} \right) Q \left( R_d^{d/2} (f_{k_1}, f_{k_2}, \dots, f_{k_d}) \right) = 0. \tag{13}$$

Let's compare the expressions (1) and (13). It follows from (12) that  $\frac{\partial f_{k_1}}{\partial y_t(x_i)} \rightarrow \frac{\partial f_{k_1}}{\partial y_t}$ ,

$$\frac{\partial f_{j_2}}{\partial y_t(x_i)} \rightarrow \frac{\partial f_{j_2}}{\partial y_t}, \quad \dots, \quad \frac{\partial f_{k_d}}{\partial y_t(x_i)} \rightarrow \frac{\partial f_{k_d}}{\partial y_t}, \quad \frac{\partial f_{h_1}}{\partial y_t(x_i)} \rightarrow \frac{\partial f_{h_1}}{\partial y_t}, \quad \frac{\partial f_{h_2}}{\partial y_t(x_i)} \rightarrow \frac{\partial f_{h_2}}{\partial y_t}, \quad \dots, \quad \frac{\partial f_{h_{p-d}}}{\partial y_t(x_i)} \rightarrow \frac{\partial f_{h_{p-d}}}{\partial y_t}.$$

Then we have:

$$A(y_t(x_i)) = \frac{\partial f_{k_1}}{\partial y_t(x_i)} \cdot \frac{\partial f_{k_2}}{\partial y_t(x_i)} \cdot \dots \cdot \frac{\partial f_{k_d}}{\partial y_t(x_i)} \rightarrow A(y_t) = \frac{\partial f_{k_1}}{\partial y_t} \cdot \frac{\partial f_{k_2}}{\partial y_t} \cdot \dots \cdot \frac{\partial f_{k_d}}{\partial y_t}, \quad (14)$$

$$B(y_t(x_i)) = \frac{\overline{\partial f_{h_1}}}{\partial y_t(x_i)} \cdot \frac{\overline{\partial f_{h_2}}}{\partial y_t(x_i)} \cdot \dots \cdot \frac{\overline{\partial f_{h_{p-d}}}}{\partial y_t(x_i)} \rightarrow B(y_t) = \frac{\overline{\partial f_{h_1}}}{\partial y_t} \cdot \frac{\overline{\partial f_{h_2}}}{\partial y_t} \cdot \dots \cdot \frac{\overline{\partial f_{h_{p-d}}}}{\partial y_t}. \quad (15)$$

From (14) and (15) it implies that

$$A(y_t(x_i))B(y_t(x_i)) \rightarrow A(y_t)B(y_t). \quad (16)$$

The validity of statement (1) follows from the fact that in expressions (1) and (13) the third factor  $C$  is the same.

For the circuit of Fig. 1,  $a$  we consider a subset of outputs  $\{f_2, f_4\}$  and the fault of input  $x_2$  of the element  $G^*$ . Expression (13) has the implies form

$$\frac{\partial f_2}{\partial y_1(x_2)} \cdot \frac{\partial f_4}{\partial y_1(x_2)} \cdot \left( \frac{\overline{\partial f_1}}{\partial y_1(x_2)} \cdot \frac{\overline{\partial f_3}}{\partial y_1(x_2)} \cdot \frac{\overline{\partial f_5}}{\partial y_1(x_2)} \right) Q \left( R_d^{d/2}(f_2, f_4) \right). \quad (17)$$

We calculate the derivatives (see the Table 3):

$$\frac{\partial f_1}{\partial y_1(x_2)} = \overline{x_1 x_2 x_3}, \quad \frac{\partial f_2}{\partial y_1(x_2)} = \overline{x_1 x_3}, \quad \frac{\partial f_3}{\partial y_1(x_2)} = x_1 x_2, \quad \frac{\partial f_4}{\partial y_1(x_2)} = x_3, \\ \frac{\partial f_5}{\partial y_1(x_2)} = x_1 \overline{x_2 x_3}.$$

We calculate the following expressions for checking condition (17):

$$A(y_t(x_2)) = \frac{\partial f_2}{\partial y_1(x_2)} \cdot \frac{\partial f_4}{\partial y_1(x_2)} = (\overline{x_1 x_3}) x_3 = \overline{x_1 x_3}, \quad (18)$$

$$B(y_t(x_2)) = \frac{\overline{\partial f_1}}{\partial y_1(x_2)} \cdot \frac{\overline{\partial f_3}}{\partial y_1(x_2)} \cdot \frac{\overline{\partial f_5}}{\partial y_1(x_2)} = \\ = (x_1 \vee x_2 \vee x_3) (\overline{x_1 \vee x_3}) (\overline{x_1 \vee x_2 \vee x_3}) = \overline{x_3} \vee \overline{x_1 x_2}. \quad (19)$$

From a comparison of (18) and (3) it implies that (see (16))

$$\frac{\partial f_2}{\partial y_1(x_2)} \cdot \frac{\partial f_4}{\partial y_1(x_2)} \rightarrow \frac{\partial f_2}{\partial y_1} \cdot \frac{\partial f_4}{\partial y_1}.$$

Similarly, a comparison of (19) and (4) implies that

$$\frac{\overline{\partial f_1}}{\partial y_1(x_2)} \cdot \frac{\overline{\partial f_3}}{\partial y_1(x_2)} \cdot \frac{\overline{\partial f_5}}{\partial y_1(x_2)} \rightarrow \frac{\overline{\partial f_1}}{\partial y_1} \cdot \frac{\overline{\partial f_3}}{\partial y_1} \cdot \frac{\overline{\partial f_5}}{\partial y_1}.$$

Then

$$\begin{aligned} A(y_t(x_2))B(y_t(x_2)) &= (\overline{x_1x_3})(\overline{x_3} \vee \overline{x_1x_2}) = \\ &= \overline{x_1x_2x_3} \rightarrow A(y_t)B(y_t) = (\overline{x_1})(\overline{x_1x_2x_3}) = \overline{x_1x_2x_3}. \end{aligned}$$

From (5) it follows that the fault of the input  $x_2$  of the element  $G^*$  admits a symmetrical error. The Theorem 3 allows us to formulate the following statement.

**Theorem 4.** *When organizing the testing of a combinational circuit according to the UAED (m, k) or  $d_\nu, d_\alpha$ -UAED (m, k)-code, for detecting all stuck at-faults of the inputs and outputs of logic elements, it is enough to consider only faults of the outputs of logic elements.*

We also note that in combinational circuits, faults may occur in the lines that connect the device input to the inputs of several logic elements. In this case, a multiple malfunction occurs, in which the input signals of several logic elements are fixed into constants. The solution to the problem of detecting faults of this type is possible due to the imposition of certain requirements on the structure of the electrical installation, taking into account the properties of the controlled device [24].

### 5. The combinational device structure construction

The completely self-checking structure of the combinational circuit is constructed as follows. We find SI-groups of outputs that meet the conditions of the Theorem 2. Each SI-group is controlled using a separate checking based on the UAED (m, k) или  $d_\nu, d_\alpha$ -UAED (m, k)-code. The control outputs of all control circuits are combined at the inputs of a self-checking two-rail signal compression circuit to obtain one control output.

The obtaining the required set of SI-groups of outputs, it is advisable to conduct one of the following methods.

The first method is as follows. First, by analyzing all possible subsets of the outputs of the combinational circuit, a complete set of the SI-groups of outputs is found. Then, the minimal subset of the SI-groups is determined, which includes all outputs of the circuit.

In the second method, a set containing all  $m$  outputs is considered first. If it does not satisfy the condition of Theorem 2, then all possible subsets with the number of outputs  $m-1$ , etc., are considered. When the SI-group is found, all the outputs included in it are excluded from further consideration. The process ends when all the outputs of the combinational circuit are included in any SI-group.

The alternative option to search for SI-groups of outputs is a special transformation of the structure of the combinational circuit into a structure whose outputs form a single SI-group. The method for converting circuits into circuits with the SI-groups is similar to that described in [25] for obtaining UI- and UAI-groups.

## 6. Conclusion

The article revealed and formalized simple conditions under which the selected set of outputs of the combinational circuit forms the SI-group. The search for the SI-groups of outputs on the set of outputs of the circuit, in turn, allows to determine all possible options for splitting into groups of outputs for effective control based on  $UAED(m, k)$  or  $d_v, d_\alpha$ - $UAED(m, k)$ -codes.

As shown in [18] by the example of searching for UI-groups of outputs, the use of one of the  $UAED(m, k)$ -codes, the Berger code, makes it possible in practice to organize self-checking discrete devices with redundancy less than when duplicating. In some cases, more than a 50 % reduction in redundancy can be achieved. Expanding the set of outputs to the UAI-group allows to further reduce the redundancy of the self-checking circuit. The same can be concluded for the method of converting circuits into circuits with UAI-outputs, because the conversion will require reservation of a smaller number of internal logic elements than by the method proposed in [18]. As shown in the last source, the complexity of the technical implementation of the original circuit when converted into a device with a controllable structure increases on average by 16 %. The use of UAI-groups in the combinational circuits synthesis can reduce this estimate. The search for the SI-groups of outputs is, in a sense, identical to the search for UAI-groups of outputs, but it is much simpler.

It should be noted that, because the conditions formed are based on the functional principle of describing the operation of a combinational circuit, the results obtained are not oriented only to circuits implemented on logic elements. The field of their application is much wider: the results can be applied to the construction of self-checking combinational circuits on a modern programmable element base.

## References

1. *Fujiwara E.* (2006) Code design for dependable systems: Theory and practical applications. New Jersey, John Wiley & Sons Press, 720 p.
2. *Ubar R., Raik J. & Vierhaus H.-T.* (2011) Design and test technology for dependable systems-on-chip (Premier Reference Source). Information Science Reference. Hershey, New York, IGI Global Press, 578 p.

3. Goessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E. & Marienfeld D. (2008) New methods of concurrent checking. Ed. 1. Dordrecht, Springer Science+Business Media B. V. Press, 184 p.
4. Nicolaidis M. & Zorian Y. (1998) On-Line testing for VLSI – A compendium of approaches. *Journal of Electronic Testing: Theory and Application (JETTA)*, vol. 12, iss. 1–2, pp. 7–20. <https://doi.org/10.1023/A:1008244815697>
5. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. & Efanov D. V. (2015) Klassifikatsiya oshibok v informacionnykh vektorakh sistematicheskikh kodov [Errors classification in information vectors of systematic codes]. *Journal of Instrument Engineering*, vol. 58, iss. 5, pp. 333–343. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2015-58-5-333-343> (in Russian)
6. Dmitriev V. V., Efanov D. V., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov V. V. (2018) Sum codes with efficient detection of twofold errors for organization of concurrent error detection systems of logical devices. *Automation and Remote Control*, vol. 79, iss. 4, pp. 665–678. <https://doi.org/10.1134/S0005117918040082>
7. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Efanov D. V. & Dmitriev V. V. (2017) New structures of the concurrent error detection systems for logic circuits. *Automation and Remote Control*, vol. 78, iss. 2, pp. 300–313. <https://doi.org/10.1134/S0005117917020096>
8. Ghosh S., Basu S. & Toubia N. A. (2005) Synthesis of low power CED circuits based on Parity Codes. *Proceedings of 23rd IEEE VLSI Test Symposium (VTS'05)*, pp. 315–320.
9. Freiman C. V. (1962) Optimal error detection codes for completely asymmetric binary channels. *Information and Control*, vol. 5, iss. 1, pp. 64–71. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(62\)90223-1](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(62)90223-1)
10. Berger J. M. (1961) A note on error detection codes for asymmetric channels. *Information and Control*, vol. 4, iss. 1, pp. 68–73. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(61\)80037-5](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(61)80037-5)
11. Piestrak S. J. (1995) Design of self-testing checkers for unidirectional error detecting codes. Wrocław, Ofiyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej Press, 1995, 111 p.
12. Das D., Toubia N. A., Seuring M. & Gossel M. (2000) Low cost concurrent error detection based on modulo weight-based codes. *Proceedings of the IEEE 6th International On-Line Testing Workshop (IOLTW)*. Spain, Palma de Mallorca, July 3–5, pp. 171–176. <https://doi.org/10.1109/OLT.2000.856633>
13. Efanov D., Sapozhnikov V. & Sapozhnikov V. V. (2017) Generalized algorithm of building summation codes for the tasks of technical diagnostics of discrete systems. *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*. Novi Sad, Serbia, September 29 – October 02, pp. 365–371. <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2017.8110126>
14. Sogomonyan E. S. & Slabakov E. V. (1989) Samoproveryaemye ustrojstva i vychislitel'nye sistemy [Self-checking devices and fault-tolerant systems]. Moscow, Radio & Communication Publ., 208 p. (in Russian)
15. Goessel M. & Sogomonyan E. S. (1992) Formation of self-testing and self-checking combinational circuits with weakly independent outputs. *Automation and Remote Control*, vol. 53, iss. 8, pp. 1264–1272.
16. Sogomonyan E. S. & Gossel M. (1993) Design of self-testing and on-line fault detection combinational circuits with weakly independent outputs. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, vol. 4, iss. 4, pp. 267–281. <https://doi.org/10.1007/BF00971975>
17. Busaba F. Y. & Lala P. K. (1994) Self-checking combinational circuit design for single and unidirectional multibit errors. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, vol. 5, iss. 1, pp. 19–28. <https://doi.org/10.1007/BF00971960>
18. Morosow A., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. & Gossel M. (1998) Self-checking combinational circuits with unidirectionally independent outputs. *VLSI Design*, vol. 5, iss. 4, pp. 333–345. <https://doi.org/10.1155/1998/20389>

19. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov Vl. V. (2018) Synthesis of self-checking combinational devices based on allocating special groups of outputs. *Automation and Remote Control*, vol. 79, iss. 9, pp. 1607–1618. <https://doi.org/10.1134/S0005117918090060>
20. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. & Efanov D. V. (2018) Kody Hemminga v sistemah funkcional'nogo kontrolya logicheskikh ustrojstv [Hamming Codes in concurrent error detection systems of logic devices]. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2018, 151 p. (in Russian)
21. Das D. & Toubia N. A. (1999) Synthesis of circuits with low-cost concurrent error detection based on bose-lin codes. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1999, vol. 15, iss. 1–2, pp. 145–155. <https://doi.org/10.1023/A:1008344603814>
22. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov Vl. V. (2015) Application of modular summation codes to concurrent error detection systems for combinational boolean circuits. *Automation and Remote Control*, vol. 76, iss. 10, pp. 1834–1848. <https://doi.org/10.1134/S0005117915100112>
23. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov Vl. V. (2017) Conditions for detecting a logical element fault in a combination device under concurrent checking based on Berger's Code. *Automation and Remote Control*, vol. 78, iss. 5, pp. 892–902. <https://doi.org/10.1134/S0005117917040113>
24. Prokofjev A. A., Sapozhnikov V. V. & Sapozhnikov Vl. V. (1984) Logicheskij metod kontrolya elektricheskogo montazha [Logical testing method for electrical arrangement]. *Electronic Modeling*, vol. 6, iss. 4, pp. 55–59. (in Russian)
25. Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl. & Efanov D. (2017) Search Algorithm for fully tested elements in combinational circuits, controlled on the basis of Berger Codes. *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*. Novi Sad, Serbia, September 29 – October 02, pp. 99–108. <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2017.8110085>

*The paper is submitted for publication by Raimund Ubar,  
a member of the editorial board.*

*Received: May 19, 2020, accepted: June 01, 2020*

**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 Групп», Санкт-Петербург  
Высшая школа транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург  
Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»  
Российский университет транспорта, Москва*

## ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ КОМБИНАЦИОННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ НА ОСНОВЕ ПОИСКА ГРУПП СИММЕТРИЧНО-НЕЗАВИСИМЫХ ВЫХОДОВ

В статье установлено, что при применении классических кодов с суммированием (кодов Бергера) и ряда их модификаций при организации контроля комбинационных схем можно использовать их особенности обнаружения как монотонных, так и части немонотонных ошибок в информационных векторах. Показано, что возможен поиск групп выходов комбинационных схем, на которых могут возникать только симметричные ошибки вследствие одиночных неисправностей элементов внутренней структуры схем. Такие группы выходов обозначены как группы симметрично-независимых выходов. Определены условия принадлежности группы выходов комбинационной схемы к группам симметрично-независимых выходов. Показано, что каждая симметрично-независимая группа выходов может контролироваться при помощи отдельной подсистемы контроля на основе кода с обнаружением любых несимметричных ошибок (в частности, и любых несимметричных ошибок до определенных кратностей). Представлены пути поиска групп симметрично-независимых выходов при организации контроля комбинационных схем.

Комбинационная схема, самопроверяемая структура, монотонная ошибка, симметричная ошибка, асимметричная ошибка, код с обнаружением монотонных и асимметричных ошибок, группы симметрично-независимых выходов

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-532-549

*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 Групп», 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

© Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Efanov D. V., 2020

## СПИСОК СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В 2020 ГОДУ

### ИЗ ИСТОРИИ АВТОМАТИКИ

- Г. К. Зальцман, А. П. Пронин* № 1  
Из истории звуковой сигнализации на железнодорожном транспорте с. 89–103

### ЖИВУЧЕСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ

- В. А. Володарский* № 1  
Оптимизация технического содержания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики при неопределенности исходной информации с. 7–24

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов* № 1  
Журналу «Автоматика на транспорте» пять лет с. 104–113

### МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА В ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

- Р. Б. Абдуллаев* № 3  
Система технического диагностирования и непрерывного мониторинга устройств железнодорожной автоматики на базе промышленных программируемых логических контроллеров с. 309–331

- Ю. В. Алеветдинова* № 1  
Система технического диагностирования металлоконструкции подвижной единицы с. 25–37

- В. В. Грачев, А. В. Грищенко, В. А. Кручек, Ф. Ю. Базилевский, М. А. Шварц, Ф. М. Шварц* № 4  
Методика синтеза нейросетевых диагностических моделей сложных технических объектов с. 466–483

- Г. В. Осадчий, А. В. Шинкаренко, Д. Г. Плотников, А. В. Баните* № 4  
Принципы построения универсальной платформы непрерывного мониторинга технического состояния инфраструктурных объектов с. 484–498

### СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

- А. Н. Ковкин* № 2  
Инверторы как средство безопасного управления двигателями стрелочных электроприводов с. 121–133

- В. А. Кузюков, А. Ю. Васильев, Р. И. Шушпанов* № 2  
Управление напольными объектами микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики с использованием радиоканала с. 134–148

*А. Б. Никитин, И. В. Кушпиль* № 4  
Результаты исследования технических средств контроля  
целостности поездов с. 411–434

*В. Г. Новиков, А. И. Сафронов, В. А. Кузюков* № 3  
Микропроцессорные системы управления движением поездов  
в Московском метрополитене с. 268–293

*В. И. Шаманов* № 3  
Расчеты помех от тягового тока в неоднородных рельсовых линиях с. 241–267

## **СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ**

*В. Ю. Рязанов* № 4  
Анализ подтверждения соответствия, обеспечение качества  
и безопасности микропроцессорных систем железнодорожной  
автоматики с. 435–465

## **ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ СИСТЕМЫ**

*Р. Б. Абдуллаев* № 1  
Вероятностные характеристики полиномиальных кодов в системах  
технического диагностирования с. 64–88

*А. Ю. Мухопад, Ю. Ф. Мухопад* № 2  
Программная реализация сложных управляющих автоматов с. 222–233

*В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов* № 3  
Отказоустойчивая структура на основе логического дополнения  
с контролем вычислений по паритету с. 377–403

*Д. В. Сперанский, А. В. Горелик, И. А. Журавлев, А. В. Орлов* № 4  
Тестирование систем с нечеткими дискретными компонентами с. 518–531

*V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov* № 4  
The features of the concurrent error-detection systems  
of combinational logic circuits based on the search for groups  
of symmetrically-independent outputs construction с. 532–549

## **ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ**

*В. В. Демьянов, А. В. Пультяков, М. Э. Скоробогатов, В. А. Алексеенко* № 2  
Методика определения порогового значения отношения сигнал/  
помеха для систем автоматической локомотивной сигнализации с. 149–164

*А. Г. Котенко, О. В. Котенко* № 2  
Динамические модели управления работой станции в рамках  
концепции киберфизических систем с. 165–183

- К. Е. Ковалев, В. Л. Белозеров, В. А. Шаров* № 3  
Модель загруженности оперативно-диспетчерского персонала с. 294–308  
на малодеятельных линиях

### **ЭЛЕКТРОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

- Д. Х. Баратов* № 3  
Синтез моделей электронного документооборота технической с. 332–355  
документации с учетом его внутренних состояний

- П. Е. Булавский, О. К. Ваисов* № 3  
Моделирование и оценка времени поиска неисправностей с. 356–376  
в системах интервального регулирования движения поездов  
на базе иерархических цветных сетей Петри

- А. М. Горбачев* № 4  
Математическая модель маршрутных расписаний наземного с. 499–517  
городского электрического транспорта

- Т. А. Искаков, А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко, М. А. Чжо* № 1  
Подходы к оценке качества планирования и управления движением с. 38–63  
пассажирских поездов метрополитена

- Д. С. Марков, М. Б. Соколов, В. Б. Соколов* № 2  
Формализованная схема процесса имитационного моделирования с. 204–221  
рельсовой линии

- Д. В. Сперанский, А. В. Горелик, А. В. Орлов* № 2  
Задачи оптимизации ресурсов в области технической эксплуатации с. 184–203  
систем автоматики и телемеханики

## LIST OF ARTICLES PUBLISHED IN 2019

### HISTORY OF AUTOMATION

- G. K. Zal'tsman, A. P. Pronin* No. 1  
A historical introduction to the sound signaling on railway transport pp. 89–103

### VITALITY, RELIABILITY, SAFETY

- V. A. Volodarsky* No. 1  
Optimization of technical maintenance of automation and remote control devices with source data uncertainty pp. 7–24

### BRIEF REPORTS

- V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov* No. 1  
The journal "Automation on Transport" celebrates its 5th anniversary pp. 104–113

### MONITORING METHODS IN TRANSPORT SYSTEMS

- R. B. Abdullaev* No. 3  
Implementation of the subsystem of diagnostic information gathering in continuous monitoring systems of railway automation facilities based on programmable logic controllers pp. 309–331

- Yu. V. Alevetdinova* No. 1  
Technical diagnostics system of rolling stock unit metalwork pp. 25–37

- V. V. Grachev, A. V. Grishchenko, V. A. Kruchek, F. Yu. Bazilevsky, M. A. Schwartz, F. M. Schwartz* No. 4  
Methodology for synthesis of neural network diagnostic models of complex technical objects pp. 466–483

- G. V. Osadchiy, A. V. Shinkarenko, D. G. Plotnikov, A. V. Banite* No. 4  
Structural principles of a universal platform for continuous monitoring of the technical condition of infrastructure facilities pp. 484–498

### TRANSPORT CONTROL SYSTEMS

- A. N. Kovkin* No. 2  
Invertors as means of secure control for electric switch mechanisms pp. 121–133

- V. A. Kuzyukov, A. Yu. Vasiliev, R. I. Shushpanov* No. 2  
Control of microprocessor-based systems floor facilities for railway automation and remote control involving the use of radio channel pp. 134–148

- A. B. Nikitin, I. V. Kushpil'* No. 4  
Results of studying technical means of train integrity monitoring pp. 411–434

*V. G. Novikov, A. I. Safronov, V. A. Kuzyukov*  
Microprocessor-based train control systems for the Moscow subway No. 3  
pp. 268–293

*V. I. Shamanov*  
Calculations of interference from traction current in nonhomogeneous track lines No. 3  
pp. 241–267

### STANDARDIZATION AND CERTIFICATION

*V. Yu. Ryazanov*  
Analysis of the regulatory framework for confirmation of the functional safety requirements compliance of microprocessor-based railway automation systems No. 4  
pp. 435–465

### TECHNICAL DIAGNOSTICS AND CONTROLLABLE SYSTEMS

*R. B. Abdullaev*  
Probabilistic features of polynomial codes in technical diagnosis systems No. 1  
pp. 64–88

*A. Yu. Mukhopad, Yu. F. Mukhopad*  
Program implementation of complicated control automata No. 2  
pp. 222–233

*V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov*  
Fault-tolerant structure based on Boolean complement with parity calculations control No. 3  
pp. 377–403

*D. V. Speransky, A. V. Gorelik, I. A. Zhuravlev, A. V. Orlov*  
Testing the systems with fuzzy discrete components No. 4  
pp. 518–531

*V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov*  
The features of the concurrent error-detection systems of combinational logic circuits based on the search for groups of symmetrically-independent outputs construction No. 4  
pp. 532–549

### OPERATION OF TRANSPORT SYSTEMS

*V. V. Demyanov, A. V. Pulyakov, M. E. Skorobogatov, V. A. Alekseenko*  
Method of threshold determination of signal-to-noise ratio for automatic cab signaling systems No. 2  
pp. 149–164

*A. G. Kotenko, O. V. Kotenko*  
Dynamic models of yard operation management within the concept of cyber-physical systems No. 2  
pp. 165–183

*K. E. Kovalev, V. L. Belozеров, V. A. Sharov*  
Workload model of operating and dispatching personnel at low-density lines No. 3  
pp. 294–308

**ELECTRONIC SIMULATION**

- D. Kh. Baratov* No. 3  
Synthesis of models of technical documentation electronic  
management with regard to its internal state pp. 332–355
- P. E. Bulavsky, O. K. Vaisov* No. 3  
Modeling and estimation of failure detection period in systems  
of railway traffic interval control based on hierarchy colored Petri nets pp. 356–376
- A. M. Gorbachev* No. 4  
Mathematical model of aperiodic timetables of urban  
electric transport pp. 499–517
- T. A. Iskhakov, A. I. Safronov, V. G. Sidorenko, M. A. Chzho* No. 1  
Approaches to quality assessment of subway traffic planning  
and management pp. 38–63
- D. S. Markov, M. B. Sokolov, V. B. Sokolov* No. 2  
Formalized scheme for the railway line simulation modeling process pp. 204–221
- D. V. Speranskiy, A. V. Gorelik, A. V. Orlov* No. 2  
Tasks of resource optimization in the sphere of automation  
and remote control systems maintenance pp. 184–203

Подписано в печать с оригинал-макета 22.12.2020.  
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 19. Уч.-изд. л. 9,5.  
Установочный тираж 300 экз. Заказ .

Отпечатано в типографии ООО «Издательство ОМ-Пресс»,  
190031, СПб., наб. реки Фонтанки, 117.