



# АВТОМАТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

---

# AUTOMATION ON TRANSPORT

№ 4 • Том 7

Декабрь, 2021

---

December, 2021



*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 № ЭОА 21990 от 01.03.2021

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

## СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ СРЕДСТВА МАССОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

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

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

ISSN 2412-9186

Индекс Роспечати 80525

## АДРЕС УЧРЕДИТЕЛЯ

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

## АДРЕС ИЗДАТЕЛЯ

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

## РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Научный редактор: *И. В. Кушпиль*  
Перевод: *А. Н. Крышня, У. Л. Романова*  
Литературный редактор  
и корректор: *Е. Г. Локтионова*  
Верстка: *А. А. Стуканова*  
Электронное сопровождение: *А. С. Иванов*

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021

## FOUNDER

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

## PUBLISHER

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

## EDITOR-IN-CHIEF

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

## MASS MEDIA REGISTRATION CERTIFICATE NUMBER

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

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

ISSN 2412-9186

Rospechat Index 80525

## FOUNDER'S ADDRESS

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

## PUBLISHER'S ADDRESS

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

## JOURNAL STAFF

Science editor: *Igor V. Kushpil*  
English translation: *A. N. Kryshnia, U. L. Romanova*  
Editing  
and proofreading: *Eugenia G. Loktionova*  
Layout: *Anna A. Stukanova*  
Electronic maintenancy: *Aleksei S. Ivanov*

© PSTU, 2021

## МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

*Валерий Сапожников*

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

*Константин Бочков*

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

*Сергей Власенко*

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

*Грегор Теег*

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

*Марек Мезитис*

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

*Йорн Пахль*

профессор, Брауншвейгский  
технический университет,  
Брауншвейг, Германия

*Раймунд Убар*

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

*Владимир Хаханов*

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

*Фуниан Ху*

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

*Христо Христов*

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

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*Никитин Александр Борисович*

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

*Кушпиль Игорь Васильевич*

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

*Баранов Леонид Аврамович*

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

*Бестемьянов Петр Филимонович*

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

*Бушуев Сергей Валентинович*

канд. техн. наук, доцент,  
УрГУПС, Екатеринбург

*Василенко Михаил Николаевич*

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

*Долгий Игорь Давидович*

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

*Ефанов Дмитрий Викторович*

д-р техн. наук, доцент,  
РУТ, Москва

*Кокурин Иосиф Михайлович*

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

*Марков Дмитрий Спиридонович*

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

*Наседкин Олег Андреевич*

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

*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

*Шаманов Виктор Иннокентьевич*

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

*Ходаковский Валентин Аветикович*

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

*Сухих Николай Николаевич*

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

## INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL

*Valery Sapozhnikov*

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

*Konstantin Bochkov*

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

*Sergey Vlasenko*

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

*Gregor Theeg*

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

*Marek Mezitis*

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

*Jorn Pacht*

Professor, Technical University  
of Braunschweig,  
Braunschweig, Germany

*Raimund Ubar*

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

*Vladimir Hahanov*

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

*Funian Hu*

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

*Khristo Khristov*

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

## EDITORIAL BOARD

*Alexander B. Nikitin*

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

*Igor V. Kushpil*

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

*Leonid A. Baranov*

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

*Peter F. Bestemiyarov*

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

*Sergey V. Bushuev*

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

*Michael N. Vasilenko*

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

*Igor D. Dolgiy*

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

*Dmitry V. Efanov*

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

*Iosif M. Kokurin*

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

*Dmitry S. Markov*

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

*Oleg A. Nasedkin*

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

*Sergey A. Nikischenkov*

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

*Anton A. Pyrkin,*

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

*Efim N. Rozenberg*

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

*Victor I. Shamanov*

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

*Valentin A. Khodakovsky*

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

*Nikolay N. Suhih*

D. Sc., Professor

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

*Кабецкий А. Г., Манаков А. Д.*

Нормы и методы определения электромагнитной совместимости современных систем автоматической локомотивной сигнализации и электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом на метрополитене ..... 503

*Манаков А. Д., Порошин А. А., Шатохин В. А.*

Активный метод защиты устройств электропитания микропроцессорных комплексов железнодорожной автоматики и телемеханики ..... 522

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

*Баранов Л. А., Сидоренко В. Г., Логинова Л. Н.*

Подходы к моделированию пассажиропотоков в рамках функционирования интеллектуальной системы управления городскими рельсовыми транспортными системами ..... 539

### СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

*Баните А. В., Деряга Д. С., Леоненко О. В.*

Совершенствование городской транспортной системы путем внедрения адаптивных систем управления дорожным движением ..... 565

### ЭЛЕКТРОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

*Сафронов А. И., Лысенко Е. В.*

Моделирование плана перевозочного процесса в утренний час пик на замкнутой Большой кольцевой линии Московского метрополитена ..... 584

*Бубнов В. П., Смагин В. А.*

Несколько замечаний о самом важном элементе метрологии — человеку .... 617

### ИЗ ИСТОРИИ АВТОМАТИКИ

*Власенко С. В., Сушков С. А., Гришечко С. В.*

Августин Бетанкур как создатель устройств сигнализации для первых железных дорог Европы и предвестник систем железнодорожной автоматики ..... 631

### ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ СИСТЕМЫ

*Ефанов Д. В., Осадчий Г. В., Лесковец И. В.*

Методы синтеза самопроверяемых комбинационных устройств автоматики на основе логического дополнения до равновесного кода «1 из 4» ..... 645

## CONTENTS

### OPERATION OF TRANSPORT SYSTEMS

- A. G. Kabetsky, A. D. Manakov*  
 Norms and Methods for determining the electromagnetic compatibility  
 of modern automatic locomotive signaling systems and electric rolling stock  
 with an asynchronous traction drive on the subway ..... 503
- A. D. Manakov, V. A. Shatokhin, A. A. Poroshin*  
 Active protection method for power supply of microprocessor  
 complexes of railway automation and remote control ..... 522

### INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS

- L. F. Baranov, V. G. Sidorenko, L. N. Loginova*  
 Passenger flows modeling approaches within the framework  
 of the functioning of the intelligent control system of urban rail  
 transportation systems. .... 539

### TRANSPORT CONTROL SYSTEMS

- A. V. Banite, D. S. Deryaga, O. V. Leonenko*  
 Improvement of the urban transportation system by the introduction  
 of adaptive traffic control systems ..... 565

### ELECTRONIC SIMULATION

- A. I. Safronov, E. V. Lysenko*  
 Modeling the plan of the transportation process during the morning  
 rush hour on the closed bolshaya koltsevaya line of the moscow metro ..... 584
- V. A. Smagin, V. P. Bubnov*  
 Some remarks on the most important element of metrology – the person ..... 617

### HISTORY OF AUTOMATION

- S. V. Vlasenko, S. A. Sushkov, S. V. Grishechko*  
 Agustin de Betancourt as creator of optical telegraph machine  
 used on the first european railway lines and precursor of railway  
 signalling systems ..... 631

### TECHNICAL DIAGNOSTICS AND CONTROLLABLE SYSTEMS

- D. V. Efanov, G. V. Osadchy, I. V. Leskovets*  
 Synthesis methods of self-checking combinational devices of automatic  
 controls based on logical complement to the equilibrium 1-out-of 4 code ..... 645

УДК 681.518.5:004.052.32

**А. Г. Кабецкий,  
А. Д. Манаков, докт. техн. наук**

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

## **НОРМЫ И МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ И ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА С АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ НА МЕТРОПОЛИТЕНЕ**

В статье дается краткий обзор развития и применения систем автоматического управления поездами метрополитена. Проводится анализ современных систем автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости с передачей сигнала на основе двукратной фазоразностной модуляции. Внедрение в эксплуатацию на линиях Петербургского метрополитена электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом и усовершенствованных систем автоматики и телемеханики движения поездов инициирует работу по обеспечению их электромагнитной совместимости. Для систем автоматики и телемеханики движения поездов на метрополитене не были определены нормативы электромагнитных помех, возникающих в их рабочем диапазоне, при внедрении в эксплуатацию электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом. В статье обозначены основные источники кондуктивных электромагнитных помех и пути их проникновения в приемный тракт устройств автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости. Предложена методика определения норм опасного и мешающего влияния (нормы помехоустойчивости) для систем автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости систем блока автоматического регулирования скорости БАРС с фазоразностной модуляцией и модернизированной поездной автоматики ПА-М с фазоразностной модуляцией для линий Петербургского метрополитена. Дан способ перехода от норм помехоустойчивости систем автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости к нормам помехоэмиссии электроподвижного состава при различных коэффициентах асимметрии тягового тока. Рассмотрена методика измерения тягового тока в точках высокого потенциала на электроподвижном составе. Представлена методика оценки уровней кондуктивных электромагнитных помех от электроподвижного состава посредством вычисления действительного значения в скользящем окне предварительно отфильтрованного сигнала тягового тока электроподвижного состава.

АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией, асинхронный тяговый привод, кондуктивная электромагнитная помеха, норма помехи, мешающее влияние электромагнитных помех, опасное влияние электромагнитных помех, тяговый ток, цифровая обработка сигналов

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-503-521



## Введение

Наиболее перспективным и экономичным видом транспорта современных городов является метрополитен. Непрерывный рост объема пассажирских перевозок сделал актуальным создание систем автоматического управления движением поездов метрополитена. Первая автономная система автоведения поезда метрополитена, созданная в Научно-исследовательском институте управляющих и вычислительных машин (НИИ УВМ), испытана в Московском метрополитене в 1961 году. Сразу после этого начались разработки централизованных систем автоматического управления движением поездов метрополитена. В 60-е годы были внедрены программно-моделирующая система автоматического управления поездами (ПМ САУДМ) Ленинградского метрополитена (разработчики – Ленинградский метрополитен и Гипротрансигнальсвязь), система автоведения САММ Московского метрополитена (разработчики – Московский институт инженеров железнодорожного транспорта (МИИТ) и Московский метрополитен). В 70-е годы создали и начали применять комплексные системы автоматического управления движением поездов на Московском и Ленинградском метрополитенах, характеризующиеся наличием управляющего вычислительного комплекса на центральном посту управления и объединением систем автоведения с системами интервального регулирования движением поездов.

Системы автоматического управления поездами (САУ П) предназначены для автоматизации процесса управления ведением поезда (включая пуск и разгон, выбор режима ведения на перегонах, торможение у платформ) с целью повышения точности выполнения графика движения.

САУ П являются составной частью комплексной автоматизированной системы управления движением поездов (АСУ ДП) и взаимосвязаны с системами обеспечения безопасности движения и устройствами внутренней локомотивной (поездной) автоматики. К системам безопасности, непосредственно связанным с САУ П, относятся система автоматического управления торможением (САУТ), системы интервального регулирования: автоматическая локомотивная сигнализация (АЛС), система автоматического регулирования скорости (АРС) и др. [1–3].

Система АЛС-АРС предназначена для непрерывного контроля и регулирования скорости поезда путем ограничения ее в пределах допустимой по условиям безопасности движения [4].

Система АЛС-АРС состоит из путевых устройств в виде шифратора и генератора сигналов АЛС-АРС, а также поездных устройств в виде приемных катушек и функциональных модулей: согласующих устройств, локомотивных приемников, сигнального управления, измерения скорости, приборов контроля эффективного торможения и др.

Сигналы АЛС-АРС от путевого генератора поступают в рельсовую цепь и, проходя по рельсовым нитям, под приемными катушками локомотива наводят



в них электродвижущую силу (ЭДС). Сигнал от приемных катушек и локомотива проходит стадию предварительной фильтрации, усиления и дешифрации, после чего на табло у машиниста отображается информация о допустимой и фактической скорости электроподвижного состава. При превышении допустимой скорости система автоматически отключает тягу и торможение электроподвижного состава.

В настоящее время при новом строительстве или модернизации линий Петербургского метрополитена внедряются более современные системы АЛС-АРС, где сигнал о допустимой скорости – это битовая последовательность, которая передается на локомотивные устройства посредством синусоидального сигнала с двукратной фазоразностной модуляцией на несущей частоте 3348,21 Гц. АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией позволяет существенно увеличить объем передаваемой информации.

Команда АЛС-АРС включает 1 байт. Формат байта кода команды имеет следующий вид. Бит 7 (старший) – номер пути, на рельсовой цепи которого выдается сигнал АЛС-АРС (0 – первый, 1 – второй). Бит 6 – тип рельсовой цепи, на которую выдается сигнал АЛС-АРС (0 – четная, 1 – нечетная). Биты 5...0 – код заданных скоростей кодируемой рельсовой цепи. Коды скоростей 1–52 соответствуют основному (установленному) направлению движения, т. е. поездным маршрутам. Коды скоростей 54–63 соответствуют неосновным направлениям движения и используются при маневровых передвижениях подвижного состава. Информация кодируется модифицированным кодом Бауэра [5].

Наряду с модернизацией устройств АЛС-АРС вводится в эксплуатацию новый электроподвижной состав с частотным управлением электродвигателем. Такой тип подвижного состава обладает более плавными тяговыми характеристиками при регулировании скорости движения. Скорость асинхронного тягового привода регулируется изменением частоты тока, генерируемого преобразователем частоты. Отсутствие в этом двигателе коллекторно-щеточного узла снижает эксплуатационные затраты на техническое обслуживание.

На линиях Петербургского метрополитена используются схемы электропитания тягового движения на постоянном токе с напряжением в тяговой сети 825 В. Основные источники электропитания тягового энергоснабжения – 6- или 12-пульсовые схемы выпрямления. Основная гармоника 6-пульсовой схемы выпрямления – 300 Гц. Последующие гармоники следуют через каждые 300 Гц (600, 900, 1200, ..., 3000, 3300, 3600 Гц). Основная гармоника 12-пульсовой схемы выпрямления – 600 Гц. Последующие гармоники следуют через каждые 600 Гц (1200, 1800, ..., 3000, 3600 Гц).

Применение электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом и статических полупроводниковых преобразователей для организации источника электропитания собственных нужд подвижного состава, электропитания компрессоров, заряда аккумуляторных батарей расширило спектр гармонических составляющих в тяговой сети Петербургского метрополитена. Было ини-

цировано определение норм помехоустойчивости для систем АЛС-АРС, а также предъявление требований к помехоэмиссии от электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом.

Вопросами электромагнитной совместимости (ЭМС) систем железнодорожной автоматики и телемеханики и электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом на магистральном транспорте посвящены работы [6–9], ставшие концептуальными при решении проблем ЭМС электроподвижного состава с устройствами АСУ ДП на метрополитене.

Проблема ЭМС подвижного состава и систем АЛС-АРС должна решаться путем предъявления жестких требований к уровню помех, допустимому при работе асинхронного тягового привода. Требования, которые включены в ГОСТ [10, 11], не охватывают системы тягового энергоснабжения метрополитенов и частотный диапазон работы систем АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией.

Целью работы является определение ЭМС систем АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией и электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом для линий Петербургского метрополитена. Для этого требуется разработать:

- методику определения норм помехоустойчивости систем АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией;
- метод перехода от норм помехоустойчивости к нормам помехоэмиссии для электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом;
- методику оценки уровней помехоэмиссии электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом.

## **1. Определение норм опасного и мешающего влияния помех на систему АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией**

*Электромагнитная помеха* – любое электромагнитное явление, которое может ухудшить качество функционирования технического средства.

*Кондуктивная электромагнитная помеха* – электромагнитная помеха, энергия которой передается по одному или нескольким проводникам.

*Норма помехи* – максимальный допустимый уровень электромагнитной помехи, измеренный в регламентированных условиях [12].

Опасное влияние кондуктивных помех на работу АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией: повышение допустимой скорости движения подвижного состава по отношению к скорости, разрешенной устройствами АЛС-АРС для данной рельсовой цепи. При нахождении подвижного состава на рельсовой цепи и при действии кондуктивных помех в результате приема и дешифрации сигналов АЛС-АРС, поступающих с приемных катушек, вырабатывается сигнал допустимой скорости движения подвижного состава, разрешающий движение с большей скоростью, чем скорость, разрешенная сигналом, который вырабатывают путевые устройства АЛС-АРС для данной рельсовой цепи [14].

Мешающее влияние кондуктивных помех на работу АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией: понижение допустимой скорости движения подвижного состава по отношению к скорости, разрешенной устройствами АЛС-АРС для данной рельсовой цепи; кратковременное или устойчивое пропадание сигнала допустимой скорости движения подвижного состава на индикаторах допустимой скорости движения. При нахождении подвижного состава на рельсовой цепи и при действии кондуктивных помех в результате приема и дешифрации сигналов АЛС-АРС, поступающих с приемных катушек, вырабатывается сигнал допустимой скорости движения подвижного состава, разрешающий движение с меньшей скоростью, чем скорость, разрешенная сигналом, который вырабатывают устройства АЛС-АРС для данной рельсовой цепи, или происходит кратковременное или устойчивое пропадание сигнала допустимой скорости движения подвижного состава [13, 14].

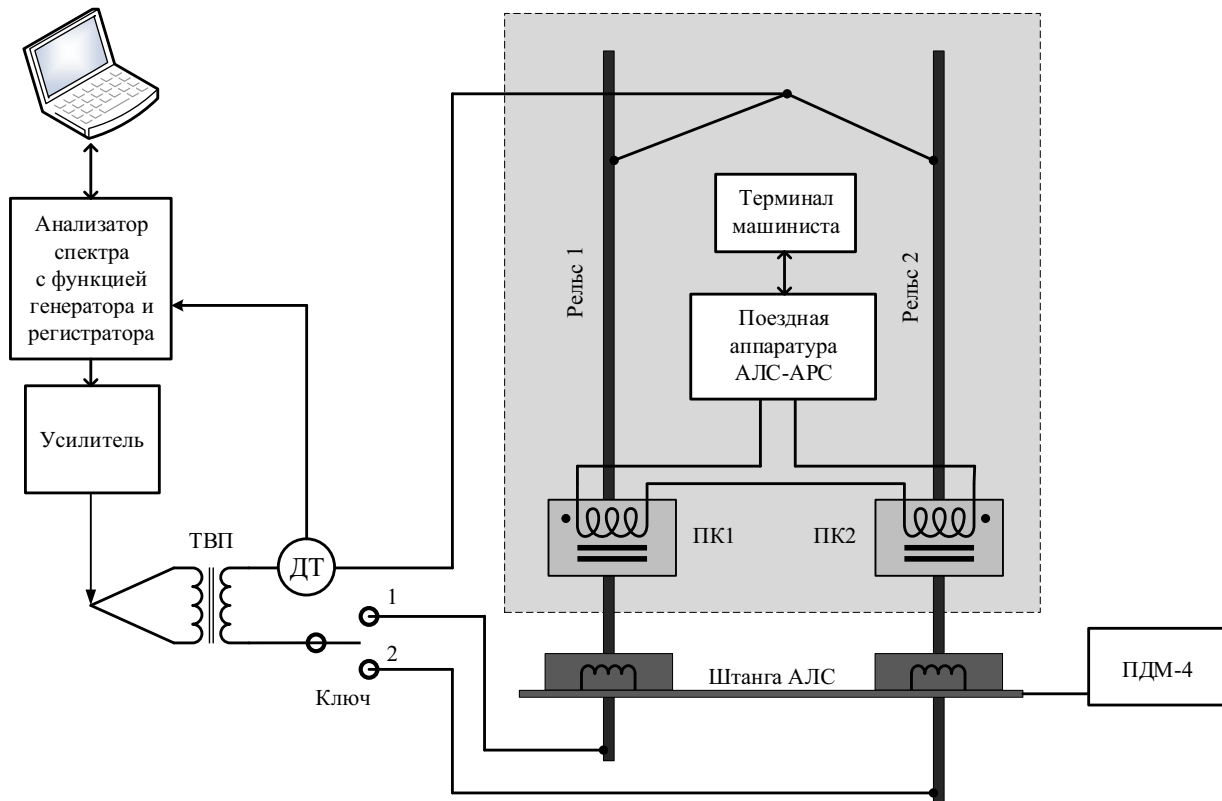
Известно, что общим каналом для систем АЛС-АРС и электроподвижного состава является обратная тяговая сеть. Канализация обратного тягового тока, а также движение сигнального тока устройств рельсовых цепей и АЛС-АРС осуществляется по рельсовым линиям.

Электромагнитная совместимость приемного тракта АЛС-АРС с обратной тяговой сетью обеспечивается встречным включением приемных катушек. Обратный тяговый ток протекает по двум рельсовым нитям в одном направлении, поэтому наведенные в приемных катушках ЭДС взаимно вычитаются. Следовательно, мешающее или опасное влияние тягового тока и его гармоник и интергармоник от электроподвижного состава на устройства АЛС-АРС проявляется лишь тогда, когда токи в рельсах оказываются неравными между собой или в приемных катушках равные токи наводят неравные ЭДС [15–20]. Это происходит в результате наличия продольной и поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей и полуобмоток дроссель-трансформатора рельсовой цепи; вследствие неодинаковых электрических свойств приемных катушек; из-за различия входных сопротивлений обратному тяговому току, стекающему через колесные пары в рельсы. В данной работе мы ограничимся исследованиями обеспечения ЭМС только при асимметрии тягового тока из-за разницы сопротивлений рельсовых нитей и полуобмоток дроссель-трансформатора рельсовой цепи.

Нормы помехоустойчивости устройств АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией разрабатываются для кондуктивных электромагнитных помех, представляющих собой гармонические сигналы синусоидальной формы, эквивалентные сигналам в рабочей полосе частот устройств АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией.

Методика определения норм опасного и мешающего влияния помех на устройства АЛС-АРС системы БАРС Петербургского метрополитена [21] была доработана и на ее основе собран испытательный стенд.

Испытательный стенд показан на рисунке 1, где ПК1 и ПК2 – приемные катушки АЛС-АРС, расположенные на расстоянии  $180 \pm 5$  мм над рельсами;



**Рис. 1.** Схема испытательного стенда системы АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией

ПДМ-4 – прибор диагностики поездной автоматики метро для оперативной комплексной проверки поездных устройств АРС в условиях депо [22] в комплекте со штангой АЛС – для имитации сигналов АЛС с фазоразностной модуляцией под приемными катушками (штанга АЛС изолирована от рельсов); ДТ – датчик тока, регистрирующий уровень тока кондуктивной электромагнитной помехи на основе пояса Роговского; ключ, позволяющий осуществлять ввод электромагнитной помехи под каждой из приемных катушек по отдельности; ТВП – трансформатор ввода кондуктивной электромагнитной помехи.

Методика определения норм помехоустойчивости следующая. На ПДМ-4 устанавливается сигнал (команда) с фазоразностной модуляцией с минимально допустимым уровнем тока, соответствующий допустимой скорости движения подвижного состава и через штангу АЛС, индуктивно поступает на приемные катушки и далее в модули дешифрации и обработки поездной аппаратуры АЛС-АРС. Данная команда скорости контролируется на терминале машиниста. От усилителя, через ТВП и одно из положений ключа, в рельс 1 или рельс 2 посредством анализатора спектра с функцией генератора и регистратора подается кондуктивная электромагнитная помеха на определенной частоте. Через ДТ контролируется ее уровень. Ток помехи наводит ЭДС на ПК1 или ПК2. Плавно повышая уровень помехи, добиваемся установления

режимов «мешающее влияние» или «опасное влияние» и фиксируем частоту и уровень помехи (действующее значение). Процедуру проводим для каждой из частот (с шагом 10 Гц), в рабочей полосе сигнала АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией, а также для каждой из канонических гармоник тяговой сети (300, 600, 900, ..., 3300, 3600 Гц). Нормой засчитывается минимальное зафиксированное значение электромагнитной помехи. Минимальное время длительности помехи выбирается исходя из особенностей реакции системы АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией, которое может составлять 100 мс или 1 с.

В таблице 1 на основании предложенной методики определены нормы мешающего и опасного влияний, который легли в серию стандартов предприятия ГУП «Петербургский метрополитен» для систем АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией БАРС [13] и ПА-М [14].

**Таблица 1.** Нормы уровней тока мешающего и опасного влияния электромагнитных помех на работу устройств БАРС с фазоразностной модуляцией и ПА-М с фазоразностной модуляцией

Вид влияния	Частота помехи или частотный диапазон, Гц	Норма тока помехи (не более), (действующее значение), А	
		БАРС ФРМ	ПА-М ФРМ
Мешающее влияние	600±1	*	4,2
	900±1	*	4,0
	1200±1	*	4,7
	1500±1	*	5,4
	2400±1	1,88	*
	2700±1	0,64	*
	3000±1	0,28	*
	3100–3600±1	0,08	0,07
Опасное влияние	3268±1	0,2	*
	3178±1	*	0,9
	3388±1	*	0,6
	3468±1	*	0,7
	3518±1	*	1,2

*Примечание:*

\* – влияние не обнаружено.

Минимально допустимая длительность помехи для системы АЛС-АРС БАРС ФРМ составляет 1 с.

Минимально допустимая длительность помехи для системы АЛС-АРС ПА-М ФРМ составляет 0,1 с.

## 2. Переход от норм помехоустойчивости систем АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией к уровням помехоэмиссии электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом

Внедрение стандартов предприятия предъявляет требования к помехоэмиссии (в части кондуктивного влияния) электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом. При анализе ЭМС электроподвижного состава в работах [23, 24] показан принцип перехода от норм помехоустойчивости к уровням помехоэмиссии от ЭПС при заданных коэффициентах асимметрии.

Согласно [25], коэффициент асимметрии тягового тока ( $K_{ac}$ ) в двухниточных рельсовых цепях рассчитывается по формуле:

$$K_{ac} = \frac{|I_{p1} - I_{p2}|}{I_{p1} + I_{p2}} 100 \%, \quad (1)$$

где  $I_{p1} - I_{p2}$  – разностный тяговый ток электроподвижного состава между первым и вторым рельсом (ток асимметрии) в двухниточных рельсовых цепях, А;  $I_{p1} + I_{p2}$  – суммарный тяговый ток ЭПС, А.

Разностный тяговый ток – ток кондуктивной электромагнитной помехи на определенной частоте, представленной в таблице 1.

Максимально допустимый уровень асимметрии тягового тока в РЦ принимается равным 6%. Аналогичное значение коэффициента асимметрии тягового тока для линий Петербургского метрополитена также принимается равным  $K_{ac} = 6\%$ .

Используя формулу (1), рассчитаем уровни помехоэмиссии для суммарного тягового тока подвижного состава. Получим:

$$I_{ном} = \frac{|I_{p1} - I_{p2}|}{K_{ac}} 100, \quad (2)$$

где  $I_{ном}$  – уровень кондуктивной электромагнитной помехи на исследуемой частоте от электроподвижного состава, А.

Результаты расчетов помех от гармоник или интергармоник тягового тока при заданном  $K_{ac}$  тягового тока приведены в таблице 2.

## 3. Методика оценки кондуктивных электромагнитных помех от тягового тока электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом при определении ЭМС с устройствами АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией

Объектом исследования является тяговый ток электроподвижного состава. Измерение тягового тока можно производить в точках высокого потенциа-



**Таблица 2.** Нормы уровней мешающего и опасного влияния помех тягового тока от электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом на работу устройств БАРС с фазоразностной модуляцией и ПА-М с фазоразностной модуляцией

Вид влияния	Частота и исследуемый частотный диапазон, Гц	Норма помех тягового тока (не более), (действующее значение) при $K_{ac} = 6\%$ , А	
		БАРС ФРМ	ПА-М ФРМ
Мешающее влияние	600±10	*	70
	900±10	*	66,7
	1200±10	*	78,3
	1500±10	*	90
	2400±10	31,3	*
	2700±10	10,7	*
	3000 ±10	4,7	*
	3100–3600	1,4	1,2
Опасное влияние	3268±10	3,4	*
	3178±10	*	15
	3388±10	*	10
	3468±10	*	1,2
	3518±10	*	20

*Примечание:*  
 \* – влияние не обнаружено.  
 Минимально допустимая длительность помехи для системы АЛС-АРС БАРС ФРМ составляет 1 с.  
 Минимально допустимая длительность помехи для системы АЛС-АРС ПА-М ФРМ составляет 0,1 с.

ла каждого моторного вагона электроподвижного состава, на обратной шине тяговой подстанции или междроссельной перемычке средней точке дроссель-трансформатора. Измерения на обратной шине тяговой подстанции или средней точке дроссель-трансформатора предъявляют высокие требования к испытательному полигону. Одно из них касается обеспечения консольного электропитания только от одной тяговой подстанции. Зачастую мощности одной тяговой подстанции не хватает для обеспечения энергией подвижного состава, возможны срабатывания защиты. Измерения на междроссельной перемычке средней точке дроссель-трансформатора, помимо обеспечения консольного электропитания, требует внимательного контроля протекания обратного тягового тока именно через дроссель-трансформатор, на котором производится измерение для обеспечения протекания полного (суммарного) тягового тока. С учетом вышеописанного предлагается методика измерения в точках высо-

кого потенциала на электроподвижном составе. Типовая методика измерения тягового тока электроподвижного состава приведена в [26].

Структурная схема проведения измерений тягового тока показана на рисунке 2, где Д1 – датчик тока, подключаемый в точке прохождения полного (суммарного) тока вагона электроподвижного состава;  $I_{p1}$ ,  $I_{p2}$  – обратный тяговый ток, проходящий в рельсе 1 и 2 соответственно; ДТ – дроссель-трансформатор.

Измеренные величины тягового тока для каждого моторного вагона сводятся в систему измерений и регистрации сигналов (временных характеристик тягового тока), представляющую собой анализатор спектра с функцией регистратора. Временные характеристики тягового тока записываются для всех режимов управления при эксплуатации электроподвижного состава. Режимы выбираются из предполагаемого максимального воздействия помех гармоник тягового тока на устройства АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией:

- режим разгона подвижного состава до максимальной эксплуатационной скорости с максимальным потреблением тока;
- режим отключения тяги электродвигателя во время движения подвижного состава;
- режим электродинамического торможения до полной остановки подвижного состава, и др.

Эти основные режимы комбинируются с учетом продольного профиля пути.

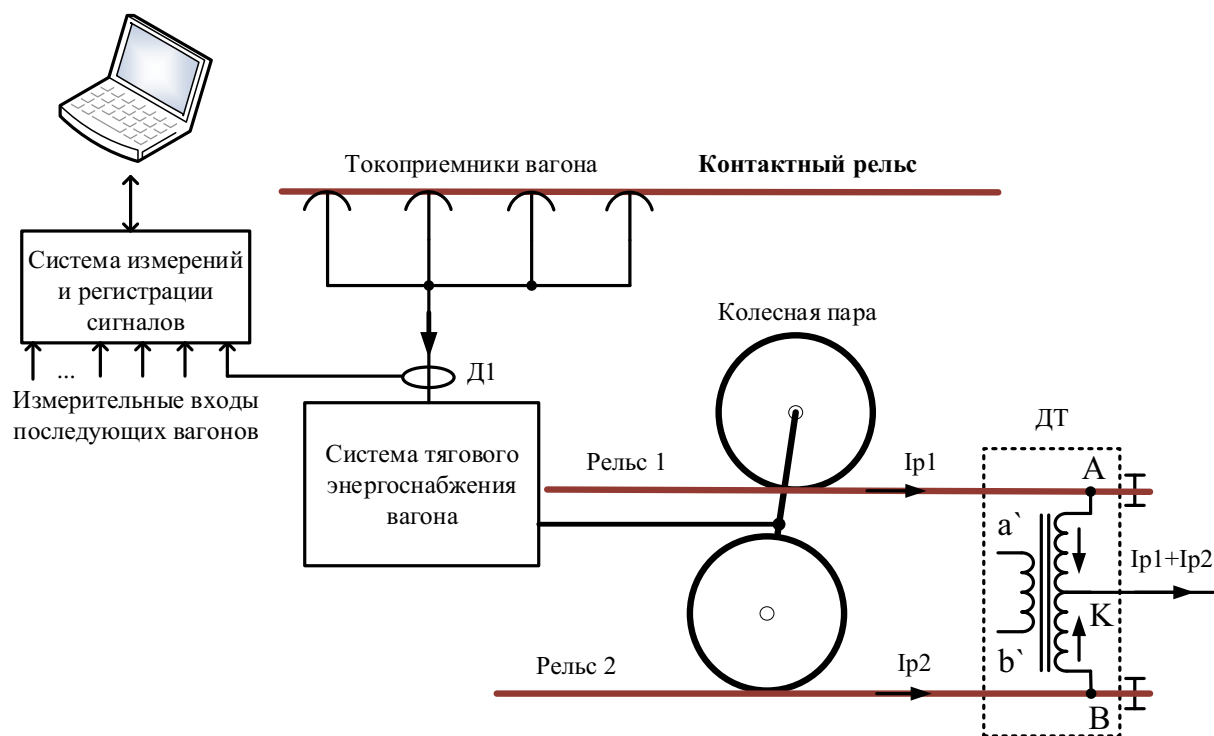


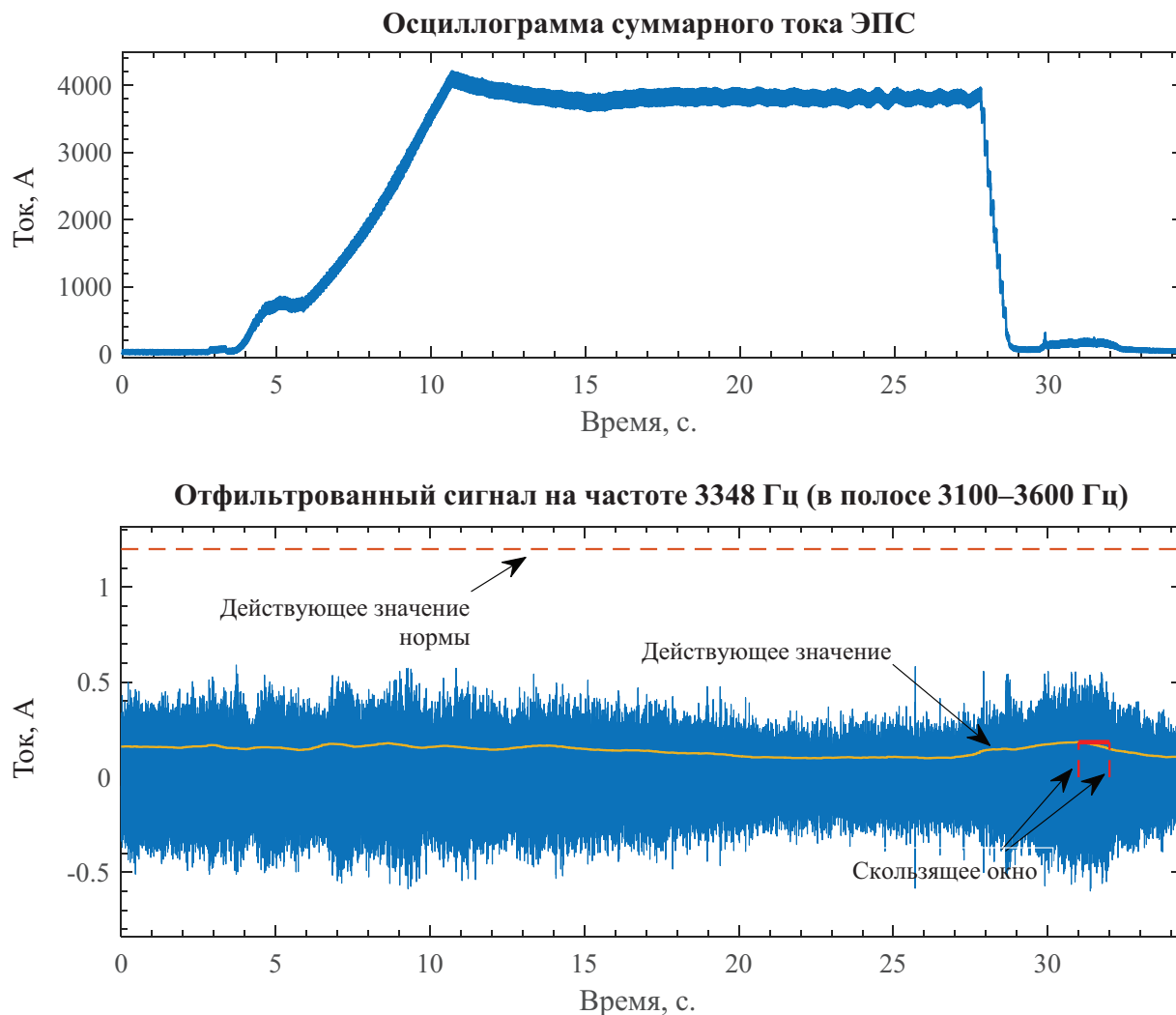
Рис. 2. Структурная схема измерений тягового тока

Методика оценки уровня электромагнитных помех тягового тока электроподвижного состава на основе сравнения максимальной величины среднеквадратичного значения (действующее значение) в спектрограмме тягового тока для несущей частоты со значениями нормы приводится в работе [10].

В [6] для обработки зарегистрированных в ходе опытных поездок данных переменной составляющей тягового тока электроподвижного состава предлагается использование гармонического анализа данных методом скользящего окна с перекрытием 50–70 % и применением «окна Ханна».

Методика обработки записей переменной составляющей тягового тока приведена в Европейском стандарте [27], посвященном нормам электромагнитной совместимости электроподвижного состава и рельсовых цепей. Стандарт призван решить задачу передвижения высокоскоростного и обычного железнодорожного транспорта в пределах Евросоюза. У каждой страны-участницы имеются национальные особенности в системах электроснабжения железных дорог, частотах питающего тока, различных конфигурациях и типах рельсовых цепей. Поэтому нормы, предложенные стандартом, не являются общими. Как раз наоборот: для каждого типа рельсовых цепей, для каждого вида тяги (постоянного и переменного (16,7–50 Гц) тока) вводятся определенные уровни допустимых значений гармонических составляющих и методы их оценки. Наиболее часто в стандарте встречается метод вычисления среднеквадратичного значения в скользящем окне предварительно отфильтрованного сигнала с указанными параметрами используемого фильтра (тип фильтра, порядок и др.). Таким образом, стандарт регламентирует допустимые нормы и четко указывает требуемый метод обработки записей тягового тока [6].

Для оценки влияния гармоник тягового тока производится цифровая обработка сигнала суммарного тягового тока электроподвижного состава (алгебраическая сумма токов с каждого моторного вагона) на основе методики, предложенной в работе [27]. Программный продукт для цифровой фильтрации был разработан на основе математического аппарата и реализован на языках высокого уровня MATLAB и Python. Цифровым фильтром с определенной амплитудно-частотной характеристикой [28] из сигнала суммарного тока выделяется (отфильтровывается) сигнал в полосе частот работы АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией или отдельно для каждой из канонических гармоник тягового тока. Далее на временном интервале, нормированном для конкретного типа устройств АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией (0,1 или 1 с.), с шагом не менее 10 % (скользящее окно с перекрытием 90 %), вычисляется действующее значение отфильтрованного сигнала. В таблицу заносится максимальное зафиксированное значение для каждого из режимов управления подвижного состава при проведении испытаний. Результатом соответствия (обеспечение ЭМС) будет отсутствие превышения вычисленного действующего значения электромагнитной помехи и величины нормы помехи для конкретной частоты, представленной в таблице 2.



**Рис. 3.** Осциллограммы при оценке уровней электромагнитных помех от электроподвижного состава, полученные методом цифровой фильтрации

В качестве примера на рисунке 3 представлены осциллограммы суммарного тягового тока, полученные от электроподвижного состава и отфильтрованные в рабочей полосе частот 3100–3600 Гц.

На рисунке 3 показан процесс вычисления действующего значения отфильтрованного сигнала суммарного тока электроподвижного состава при помощи цифрового фильтра с АЧХ Чебышева второго рода [28]. Действующее значение отфильтрованного сигнала вычисляется при помощи скользящего окна длительностью 1 секунда с перекрытием 90%. Максимальное зафиксированное действующее значение (на рис. 3 выделено красным) сравнивается с уровнем нормы.

Предварительная оценка временных характеристик отфильтрованного сигнала позволяет выявлять одиночные неповторяющиеся случаи превышения норм тока подвижного состава, вызванные переходными процессами, ставшие следствием бросков тока, срабатывания автоматов защиты, и пр.

## Заключение

Анализ отечественных и зарубежных стандартов по электромагнитной совместимости выявил отсутствие требований помехоэмиссии электроподвижного состава для метрополитенов с системой тягового энергоснабжения постоянного тока 825 В. Предлагаемые в стандартах методики оценки тягового тока не содержали действительных временных характеристик влияния электромагнитных помех тягового тока для частотных диапазонов работы современных систем АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией.

Исследования устойчивости систем АЛС-АРС БАРС с фазоразностной модуляцией и ПА-М с фазоразностной модуляцией к кондуктивным электромагнитным помехам в рабочем диапазоне частот показали наличие опасных влияний. Предъявление жестких требований к уровням помехоэмиссии электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом в частотном диапазоне систем АЛС-АРС – ограничение до уровней (не более) мешающего влияния должны исключить возникновение опасных влияний. В качестве дополнительной меры защиты от опасных влияний предлагается пересмотреть нормы уровней помехоэмиссии электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом с учетом более высоких коэффициентов асимметрии тягового тока (например, произвести перерасчет норм уровней при  $K_{ac} = 12\%$ ).

Методом определения норм опасного и мешающего влияния помех на систему АЛС-АРС с фазоразностной модуляцией, предложенным в статье, предлагается исследовать все системы АЛС-АРС Петербургского метрополитена.

Необходимо оценить помехоустойчивость при различных коэффициентах асимметрии электрических характеристик приемных катушек для систем АЛС-АРС, эксплуатируемых на линиях метрополитена.

Методика измерения тягового тока в точках высокого потенциала электроподвижного состава позволяет гарантированно провести испытания и измерения при максимальных эксплуатационных характеристиках ведения электроподвижного состава с максимальным потреблением тока и максимальной скорости ведения.

В дальнейшем предлагается провести сравнительный анализ методов оценки уровней электромагнитных помех тягового тока: оценка уровней спектральных составляющих при дискретном преобразовании Фурье с использованием различных оконных функций сглаживания; вычисление действующего значения в скользящем окне предварительно отфильтрованного сигнала с различными амплитудно-частотными характеристиками цифровых фильтров.

## Библиографический список

1. Системы автоматического и телемеханического управления электроподвижным составом / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, В. И. Астрахан и др.; под ред. Л. А. Баранова. – М.: Транспорт, 1984. – 311 с.

2. Баранов Л. А. Автоматическое управление движением поездов метрополитена / Л. А. Баранов // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16, № 3 (76). – С. 156–165.
3. Никульчиков П. М. История, состояние и перспективы развития систем автоматического управления поездами метрополитена / П. М. Никульчиков // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2, № 3. – С. 456–473.
4. Махмутов К. М. Устройства интервального регулирования движения поездов на метрополитене / К. М. Махмутов. – Москва: Транспорт, 1986. – 351 с.
5. Блок локомотивных приемников ЧК-ФМ. Руководство по эксплуатации. ИДФС. 065.00.000 РЭ. – Минск: Инженерный центр ООО «ФЛАРС», 2009. – 23 с.
6. Кравцов Ю. А. Электромагнитная совместимость рельсовых цепей и электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом / Ю. А. Кравцов // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 7–27.
7. Нормативы по электромагнитной совместимости подвижного состава и рельсовых цепей и методы их проверки / Ю. А. Кравцов, Е. В. Архипов, А. А. Антонов, М. Е. Бакин // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 2. – С. 65–71.
8. Бестемьянов П. Ф. Методика оценки работоспособности рельсовых цепей тональной частоты при воздействии тока электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом / П. Ф. Бестемьянов, Ю. А. Кравцов, Е. Г. Щербина, А. Б. Чегуров // Вестник РГУПС. – 2012. – № 1. – С. 87–92.
9. Исследование помехоустойчивости путевых приемников тональных рельсовых цепей / Ю. А. Кравцов, В. И. Линьков, П. Е. Машенко, А. Е. Щербина // Наука и техника транспорта. – 2009. – № 1. – С. 86–91.
10. ГОСТ 33436.3-1-2015 (МЭК 62236-3-1:2008). Совместимость технических средств электромагнитная. Системы и оборудование железнодорожного транспорта. Часть 3–1. Железнодорожный подвижной состав. Требования и методы испытаний. – Введ. 2017. 06.01. – М.: Стандартинформ, 2019. – 17 с.
11. Нормы безопасности на железнодорожном транспорте: НБ ЖТ ЦТ 04–98. Электровозы. Требования по сертификации. Введ. 07.08.98. – М., 2003. – 172 с.
12. ГОСТ Р 50397–2011 (МЭК 60050-161:1990). Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. – Введ. 2012–09–01. – М.: Стандартинформ, 2013. – 56 с.
13. Нормы уровней опасного и мешающего влияния электромагнитных помех на работу поездных устройств АЛС-АРС системы БАРС на рельсовых цепях с фазомодулированным кодированием петербургского метрополитена // Система стандартов по электромагнитной совместимости. ГУП «Петербургский метрополитен». – СПб., 2018. – 31 с.
14. Нормы опасного и мешающего влияния электромагнитных помех на работу поездных устройств АЛС-АРС с фазомодулированным кодированием на рельсовых цепях Петербургского метрополитена. Поездная аппаратура комплексной системы «Движение» модернизированная (ПА-М) // Система стандартов по электромагнитной совместимости. ГУП «Петербургский метрополитен». – СПб., 2018. – 11 с.
15. Шаманов В. И. Защищенность локомотивных приемников АЛС от помех / В. И. Шаманов // Автоматика, связь, информатика. – 2013. – № 4. – С. 14–19.
16. Шаманов В. И. Моделирование генерации помех токами рельсовой тяговой сети / В. И. Шаманов // Автоматика, связь, информатика. – 2014. – № 10. – С. 5–9.
17. Шаманов В. И. Косвенные измерения соотношения тяговых токов под катушками АЛС / В. И. Шаманов, А. Е. Ваньшин, Л. Тасболатова // Автоматика, связь, информатика. – 2018. – № 8. – С. 2–5.



18. Шаманов В. И. Влияние условий эксплуатации на устойчивость работы АЛСН / В. И. Шаманов, А. В. Пультяков, Ю. А. Трофимов // Железнодорожный транспорт. – 2009. – № 5. – С. 46–50.
19. Шаманов В. И. Параметры рельсовых линий в задачах электромагнитной совместимости / В. И. Шаманов, Ю. А. Трофимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 4 (48). – С. 196–203.
20. Шаманов В. И. Помехи на аппаратуру рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации. Средства защиты / В. И. Шаманов. – М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2018. – 304 с.
21. Манаков А. Д. Нормы опасного и мешающего влияния помех на устройства АЛС-АРС системы БАРС Петербургского метрополитена / А. Д. Манаков, А. А. Блюдов, А. Г. Кабецкий, А. А. Трошин // Автоматика на транспорте. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 28–39.
22. Прибор диагностики метро (ПДМ-4). Руководство по эксплуатации. ИДФС. 060.00.00 РЭ. – Инженерный центр «ФЛАРС». – Минск, 2006.
23. Манаков А. Д. Электромагнитная совместимость рельсовых цепей и электроподвижного состава / А. Д. Манаков, Н. Н. Балугев, А. А. Трошин // Актуальные вопросы развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики: сб. науч. тр. / под ред. Вл. В. Сапожникова. – СПб.: Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2013. – С. 93–102.
24. Манаков А. Д. Методика определения тока помех в рельсах двухниточных рельсовых цепей метрополитенов / А. Д. Манаков, В. А. Кудрявцев, А. Т. Осьминин // Электротехника. – 2016. – № 5. – С. 48–52.
25. Аркатов В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – М.: Транспорт, 1990. – 295 с.
26. СТО СДС ОПЖТ – 09–2011. Требования для добровольной сертификации вагонов метрополитена. Электромагнитная совместимость. – М., 2011. – 12 с.
27. CENELEC DS/CLC/TS 50238–2:2010. Railway Applications – Compatibility Between Rolling Stock and Train Detection Systems – Part 2: Compatibility with Track Circuits, 01.07.2010, 42 p.
28. Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников / С. Смит; пер. с англ. А. Ю. Линовича, С. В. Витязева, И. С. Гусинского. – М.: Додека-XXI, 2008. – 720 с.: ил. – (Серия «Схемотехника»). – ISBN 978-5-94120-145-7.

**A. G. Kabetsky,  
A. D. Manakov**

*Department of Automation and Telemechanics on Railways  
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University*

## **NORMS AND METHODS FOR DETERMINING THE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF MODERN AUTOMATIC LOCOMOTIVE SIGNALING SYSTEMS AND ELECTRIC ROLLING STOCK WITH AN ASYNCHRONOUS TRACTION DRIVE ON THE SUBWAY**

The article provides a brief overview of the development and application of automatic control systems for subway trains. Modern automatic locomotive signaling systems featuring automatic speed control with signal transmission based on double-phase-difference modulation are analyzed. The introduction of electric rolling stock with an asynchronous traction drive and advanced train traffic automation and remote control systems at the St. Petersburg Metro initiates the drive to ensure their electromagnetic compatibility. For the subway train traffic automation and remote control systems, there have been no acceptance criteria for electromagnetic interference that occur in their operating range when electric rolling stock with an asynchronous traction drive is put into operation. The article identifies the main sources of conducted electromagnetic interference and the routes of their penetration into the receive path of automatic locomotive signaling devices with automatic speed control. A method is proposed for determining the limits of hazardous and interfering effects (immunity limits) for automatic train signaling systems with automatic speed regulation of the systems of the BARS automatic speed control unit with phase-difference modulation and the upgraded ПА-М (ПА-М) train automation with phase-difference modulation for the St. Petersburg Metro lines. A method is given for the transition from the immunity limits of automatic locomotive signaling systems with automatic speed control to the emission limits of electric rolling stock at different traction current unbalance factors. A technique for measuring traction current at high-potential points on electric rolling stock is considered. A technique for assessing the levels of conducted electromagnetic interference from electric rolling stock by calculating the effective value in a sliding window of a pre-filtered traction current signal of an electric rolling stock is presented.

Automatic train signaling with automatic speed regulation with phase-difference modulation, asynchronous traction drive, conducted electromagnetic interference, interference limit, interfering electromagnetic interference, hazardous electromagnetic interference, traction current, digital signal processing

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-503-521

### **References**

1. *Baranov L. A., Erofeyev E. V., Astrakhan V. I. et al.* (1984) *Sistemy avtomaticheskogo i telemekhanicheskogo upravleniya elektropodvizhnym sostavom* [Automatic and remote control systems for electric rolling stock] Ed. by L. A. Baranov. Moscow, Transport Publ., 311 p. (In Russian)
2. *Baranov L. A.* (2018) *Avtomaticheskoye upravleniye dvizheniyem poyezdov metropolitena* [Automatic control of subway train traffic]. *Mir transporta* [World of Transport and Transportation], vol. 16, no. 3 (76), pp. 156–165. (In Russian)

3. *Nikulchikov P. M.* (2016) Istoriya, sostoyaniye i perspektivy razvitiya sistem avtomaticheskogo upravleniya poyezdami metropolitena [History, state and development potential of automatic control systems for subway trains]. *Avtomatika na transporte* [Automatic Equipment in Transport], vol. 2, no. 3, pp. 456–473. (In Russian)
4. *Makhmutov K. M.* (1986) *Ustroystva interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poyezdov na metropolitene* [Devices for interval control of subway train traffic]. Moscow, Transport Publ., 351 p. (In Russian)
5. Blok lokomotivnykh priyemnikov ChK-FM. Rukovodstvo po ekspluatatsii. IDFS. 065.00.000 RE [Train apparatus block ChK-FM. Manual. IDFS. 065.00.000 OM]. (2009). Minsk, OOO FLARS, Engineering Center, 23 p. (In Russian)
6. *Kravtsov Yu. A.* (2015) Elektromagnitnaya sovmestimost' rel'sovykh tsepey i elektropodvizhnogo sostava s asinkhronnym tyagovym privodom [Electromagnetic compatibility of track circuits and electric rolling stock with asynchronous traction drive]. *Avtomatika na transporte* [Automatic Equipment in Transport], vol. 1, no. 1, pp. 7–27. (In Russian)
7. *Kravtsov Yu. A., Arkhipov E. V., Antonov A. A. & Bakin M. E.* (2014) Normativy po elektromagnitnoy sovmestimosti podvizhnogo sostava i rel'sovykh tsepey i metody ikh proverki [Electromagnetic compatibility limits of rolling stock and rail circuits and methods for their verification]. *Science and Technology in Transport*, no. 2, pp. 65–71. (In Russian)
8. *Bestem'yanov P. F., Kravtsov Yu. A., Shcherbina E. G. & Chegurov A. B.* (2012) Metodika otsenki rabotosposobnosti rel'sovykh tsepey tonal'noy chastoty pri vozdeystvii toka elektropodvizhnogo sostava s asinkhronnym tyagovym privodom [Methodology for assessing the performance of audio frequency track circuits under the influence of the current of electric rolling stock with an asynchronous traction drive]. *Bulletin of RSTU*, no. 1, pp. 87–92. (In Russian)
9. *Kravtsov Yu. A., Lin'kov V. I., Mashchenko P. E. & Shcherbina A. E.* (2009) Issledovaniye pomekhoustoychivosti putevykh priyemnikov tonal'nykh rel'sovykh tsepey [Study of immunity limits of track pick up units of audio frequency track circuits]. *Science and Technology in Transport*, no. 1, pp. 86–91. (In Russian)
10. *GOST 33436.3-1-2015 (MEK 62236-3-1:2008). Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Sistemy i oborudovaniye zheleznodorozhnogo transporta. Chast 3-1. Zheleznodorozhnyy podvizhnoy sostav. Trebovaniya i metody ispytaniy* [GOST 33436.3-1-2015 (IEC 62236-3-1:2008) Electromagnetic compatibility of technical equipment. Railway systems and equipment. Part 3-1. Railway rolling stock. Requirements and test methods] Introd. 2017.06.01. (2019). Moscow, Standartinform, 17 p. (In Russian)
11. *Normy bezopasnosti na zheleznodorozhnom transporte: NB ZhT TsT 04-98. Elektrovozy. Trebovaniya po sertifikatsii* [Rail Safety Standards: NB ZhT TsT 04-98. Electric locomotives. Certification requirements]. Introd. 07.08.98. (2003). Moscow, 172 p. (In Russian)
12. *GOST R 50397-2011 (MEK 60050-161:1990). Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Terminy i opredeleniya* [GOST R 50397-2011 (IEC 60050-161:1990) Electromagnetic compatibility of technical equipment. Terms and definitions]. Introd. 2012-09-01. (2013). Moscow, Standartinform, 56 p. (In Russian)
13. *Normy urovney opasnogo i meshayushchego vliyaniya elektromagnitnykh pomekh na rabotu poyezdnykh ustroystv ALS-ARS sistemy BARS na rel'sovykh tsepyakh s fazomodulirovannym kodirovaniyem peterburgskogo metropolitena* [Limits for the levels of hazardous and interfering effects of electromagnetic interference on the operation of automatic train signaling with automatic speed regulation of the BARS system on track circuits with phase-modulated coding of the St. Petersburg Metro]. *Sistema standartov po elektromagnitnoy sovmestimosti* [System of electromagnetic compatibility standards]. (2018). St. Petersburg Metro State Unitary Enterprise, St. Petersburg, 31 p. (In Russian)

14. *Normy opasnogo i meshayushchego vliyaniya elektromagnitnykh pomekh na rabotu poyezdnykh ustroystv ALS-ARS s fazomodulirovannym kodirovaniyem na rel'sovykh tsepyakh Peterburgskogo metropolitena. Poyezdnaya apparatura kompleksnoy sistemy «Dvizheniye» modernizirovannaya (PA-M) [Limits of hazardous and interfering effects of electromagnetic interference on the operation of automatic train signaling with automatic speed regulation with phase-modulated coding on the track circuits of the St. Petersburg Metro. Modernized train apparatus of the "Dvizheniye" complex system (MTA)]. Sistema standartov po elektromagnitnoy sovmestimosti [System of electromagnetic compatibility standards]. (2018). St. Petersburg Metro State Unitary Enterprise, St. Petersburg, 11 p. (In Russian)*
15. *Shamanov V.I. (2013) Zashchishchennost' lokomotivnykh priyemnikov ALS ot pomekh [Protection of automatic train signaling apparatus from interference]. Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, communication, computer science]. No. 4, pp. 14–19. (In Russian)*
16. *Shamanov V.I. (2014) Modelirovaniye generatsii pomekh tokami rel'sovoy tyagovoy seti [Modeling of interference generation by currents of a rail traction network]. Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, communication, computer science]. No. 10, pp. 5–9. (In Russian)*
17. *Shamanov V.I., Van'shin A.E. & Tasbolatova L. (2018) Kosvennyye izmereniya sootnosheniya tyagovykh tokov pod katushkami ALS [Indirect measurements of the ratio of traction currents under the automatic train signaling coils]. Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, communication, computer science], no. 8, pp. 2–5. (In Russian)*
18. *Shamanov V.I., Pul'tyakov A.V. & Trofimov Yu. A. (2009) Vliyaniye usloviy ekspluatatsii na ustoychivost' raboty ALSN [The influence of operating conditions on the stability of the continuous automatic train signaling operation]. Zheleznodorozhnyy transport [Railroad Transport], no. 5, pp. 46–50 (In Russian)*
19. *Shamanov V.I. & Trofimov Yu. A. (2015) Parametry rel'sovykh liniy v zadachakh elektromagnitnoy sovmestimosti [Rail line parameters as related to electromagnetic compatibility]. Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye [Modern technologies. System analysis. Modeling], no. 4 (48), pp. 196–203. (In Russian)*
20. *Shamanov V.I. (2018) Pomekhi na apparaturu rel'sovykh tsepey i avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii. Sredstva zashchity [Interference on the track circuits and automatic train signaling equipment. Protection means]. Moscow, FSBHEI Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Railway educational training center] Publ. 304 p. (In Russian)*
21. *Manakov A.D., Blyudov A.A., Kabetskiy A.G. & Troshin A.A. (2015) Normy opasnogo i meshayushchego vliyaniya pomekh na ustroystva ALS-ARS sistemy BARS Peterburgskogo metropolitena [Limits of hazardous and interfering interferences on the automatic train signaling with automatic speed regulation of the BARS system of the St. Petersburg Metro]. Avtomatika na transporte [Automatic Equipment in Transport], vol. 1, no. 1, pp. 28–39. (In Russian)*
22. *Pribor diagnostiki metro (PDM-4). Rukovodstvo po ekspluatatsii. IDFS. 060.00.00 RE [Metro diagnostics device (PDM-4). Manual. IDFS. 060.00.000 OM]. (2006). OOO FLARS, Engineering Center, Minsk (In Russian)*
23. *Manakov A.D., Baluyev N.N. & Troshin A.A. (2013) Elektromagnitnaya sovmestimost' rel'sovykh tsepey i elektropodvizhnogo sostava [Electromagnetic compatibility of track circuits and electric rolling stock]. Aktual'nyye voprosy razvitiya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: sb. nauch. tr. [Current problems of railway automation and remote control systems development: Scientific proceedings]. Under editorship of V.I. V. Sapozhnikov, Saint Petersburg, Petersburg State Transport University, pp. 93–102. (In Russian)*
24. *Manakov A.D., Kudryavtsev V.A. & Os'minin A.T. (2016) Metodika opredeleniya toka pomekh v rel'sakh dvukhmitochnykh rel'sovykh tsepey metropolitenov [Methodology for determining*

- the interference current in the rails of double-rail track circuits of subways]. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], no. 5, pp. 48–52. (In Russian)
25. *Arkotov V. S., Kravtsov Yu. A. & Stepenskiy B. M.* (1990) *Rel'sovyye tsepi. Analiz raboty i tekhnicheskoye obsluzhivaniye* [Rail circuits. Analysis of operation and maintenance]. Moscow, Transport Publ., 295 p. (In Russian)
  26. STO SDS OPZhT – 09–2011. *Trebovaniya dlya dobrovol'noy sertifikatsii vagonov metropolitena. Elektromagnitnaya sovmostimost'* [Standard of the Voluntary Certification System of the Association of Railway Equipment Manufacturers – 09–2011. Requirements for voluntary certification of subway cars. Electromagnetic Compatibility]. (2011) Moscow, 12 p. (In Russian)
  27. CENELEC DS/CLC/TS 50238–2:2010. *Railway Applications – Compatibility Between Rolling Stock And Train Detection Systems – Part 2: Compatibility With Track Circuits* (2010) 42 p.
  28. *Steven W. Smith.* (2008) *Tsifrovaya obrabotka signalov. Prakticheskoye rukovodstvo dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists]. Russ. ed. by A. Yu. Linovich, S. V. Vityazev, I. S. Gusinsky. Moscow, Dodeka-XXI, 720 p.: il. (In Russian) (“Skhemotekhnika” (Computer Circuitry) Series). ISBN 978-5-94120-145-7.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии  
профессором В. И. Шамановым*

*Поступила в редакцию 28.07.2021, принята к публикации 10.08.2021*

*Кабецкий Андрей Геннадьевич* – инженер Центра компьютерных железнодорожных технологий кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения императора Александра I  
kabeckiy@gmail.com

*Манаков Александр Демьянович* – старший научный сотрудник Центра компьютерных железнодорожных технологий, доктор технических наук, старший научный сотрудник Центра компьютерных железнодорожных технологий, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения императора Александра I  
manakoff\_2@mail.ru

© Кабецкий А. Г., Манаков А. Д., 2021



УДК 681.518.5:656.25

**А. Д. Манаков, докт. техн. наук**

**В. А. Шатохин, канд. техн. наук**

**А. А. Порошин**

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

## **АКТИВНЫЙ МЕТОД ЗАЩИТЫ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ**

Статья посвящена исследованию вопросов повышения надежности, безопасности и живучести устройств электропитания железнодорожной автоматики и телемеханики. В ходе работы был проведен анализ отказов в хозяйстве автоматики и телемеханики за последние годы, оценена доля отказов устройств вследствие воздействия грозových перенапряжений, отмечена тенденция роста числа отказов устройств железнодорожной автоматики и телемеханики по причине коммутационных и грозových перенапряжений. Представлена структура современных устройств бесперебойного электропитания с описанием основных структурных узлов. Предложены способы реализации активного метода защиты устройств электропитания железнодорожной автоматики и телемеханики путем введения в систему технической диагностики и мониторинга функции локации гроз с возможностью регистрации опасной грозовой активности для сохранения их исправного и работоспособного состояния и обеспечения бесперебойности и безопасности перевозочного процесса, что будет способствовать снижению ущерба от влияния опасных электромагнитных воздействий, в т. ч. грозových перенапряжений. Рассмотрен вариант синхронизации системы локации гроз с имеющимися грозопеленгационными сетями посредством глобальной компьютерной сети Интернет, а также вариант установки однопунктового грозопеленгатора на посту электрической централизации.

Системы электропитания железнодорожной автоматики, атмосферное перенапряжение, электромагнитное воздействие, система технического диагностирования и мониторинга грозовой активности, активный метод защиты

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-522-538

### **Введение**

В соответствии с долгосрочной программой развития ОАО «РЖД» до 2025 года с целью повышения пропускной способности ведется процесс активного внедрения микропроцессорных устройств на железнодорожном транспорте. По данным Центральной дирекции инфраструктуры, на 1 января 2019 года станционные микропроцессорные системы уже эксплуатируются на 602 станциях с количеством стрелок 16036, на многих станциях идут пуско-наладочные работы, выполняются проектные работы по оснащению системами микропроцессорной централизации (МПЦ) новых объектов. Современные системы МПЦ качественно отличаются от релейных и релейно-процессорных систем централизации по ряду преимуществ:



- высокий уровень надежности (резервируются многие узлы, в т. ч. центральный процессор, происходит непрерывный обмен информацией между ядром МПЦ и управляемыми объектами);
- интеллектуальный интерфейс, снижающий вероятность ошибочных действий оперативного персонала (речевые подсказки и логический контроль над действиями человека);
- расширенный набор технологических функций (замыкание маршрута без открытия светофора, блокировка стрелок в нужном положении и др.);
- возможность управления объектами многих станций и перегонов с одного рабочего места;
- высокий уровень диагностики и мониторинга (предоставление техническому персоналу полной информации о ключевых узлах системы и локализации неисправностей с возможностью передачи данных в центр управления перевозками, протоколирование и архивирование неисправностей системы и действий эксплуатационного персонала);
- меньший объем строительно-монтажных работ, упрощенный процесс стыковки с системами более высокого уровня, меньшие габариты оборудования.

Значимые отрицательные аспекты микропроцессорных систем – дороговизна и повышенные требования к качеству электропитания [1], поэтому при проектировании железнодорожной станции системам электропитания железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) уделяется особое внимание.

Для обеспечения бесперебойности перевозочного процесса системы электропитания устройств ЖАТ решают важные задачи, среди которых можно выделить две главные: обеспечение непрерывного во времени электропитания систем и устройств ЖАТ с необходимым для их надежного функционирования качеством электроэнергии.

По данным [2], на протяжении пяти лет (с 2015 по 2019) росло количество отказов устройств ЖАТ вследствие воздействия атмосферных перенапряжений. Атмосферные перенапряжения возникают в результате прямого удара молнии в тяговую сеть, высоковольтные линии электроснабжения, рельсовую линию, а также в результате электростатической индукции электрически заряженных облаков и электромагнитной индукции тока молнии при близких разрядах молнии в землю и между облаками.

Такие перенапряжения оказывают опасные электромагнитные воздействия и мешающие электромагнитные влияния на устройства инфраструктуры обеспечения движения поездов [3–10].

В данной работе рассматривается создание комплексной системы технической диагностики и мониторинга (СТДМ) систем электропитания ЖАТ с активным методом защиты от атмосферных перенапряжений. Помимо имеющихся функциональных возможностей СТДМ будет включать в свой состав систему слежения за перемещением грозовых фронтов с возможностью переключения на резервные автономные источники питания при близких грозовых разрядах.

При этом степень опасности атмосферного электричества будет определяться системой локации гроз.

## 1. Современные системы электропитания ЖАТ

Уже более 20 лет Центр компьютерных железнодорожных технологий Петербургского государственного университета путей сообщения работает над совершенствованием устройств электропитания микропроцессорных комплексов железнодорожной автоматики и телемеханики. Разработанные системы электропитания УЭП-МПК активно внедряются на всей сети ОАО «РЖД», в метрополитене, на промышленном транспорте, а также на железнодорожных линиях Казахстана.

УЭП-МПК – система с двойным преобразованием электроэнергии на основе шины постоянного тока (рис. 1).

В состав системы электропитания УЭП-МПК входят функциональные блоки, каждый из которых поставляется в виде законченного модуля. Питающие

Обобщенная структурная схема системы электропитания

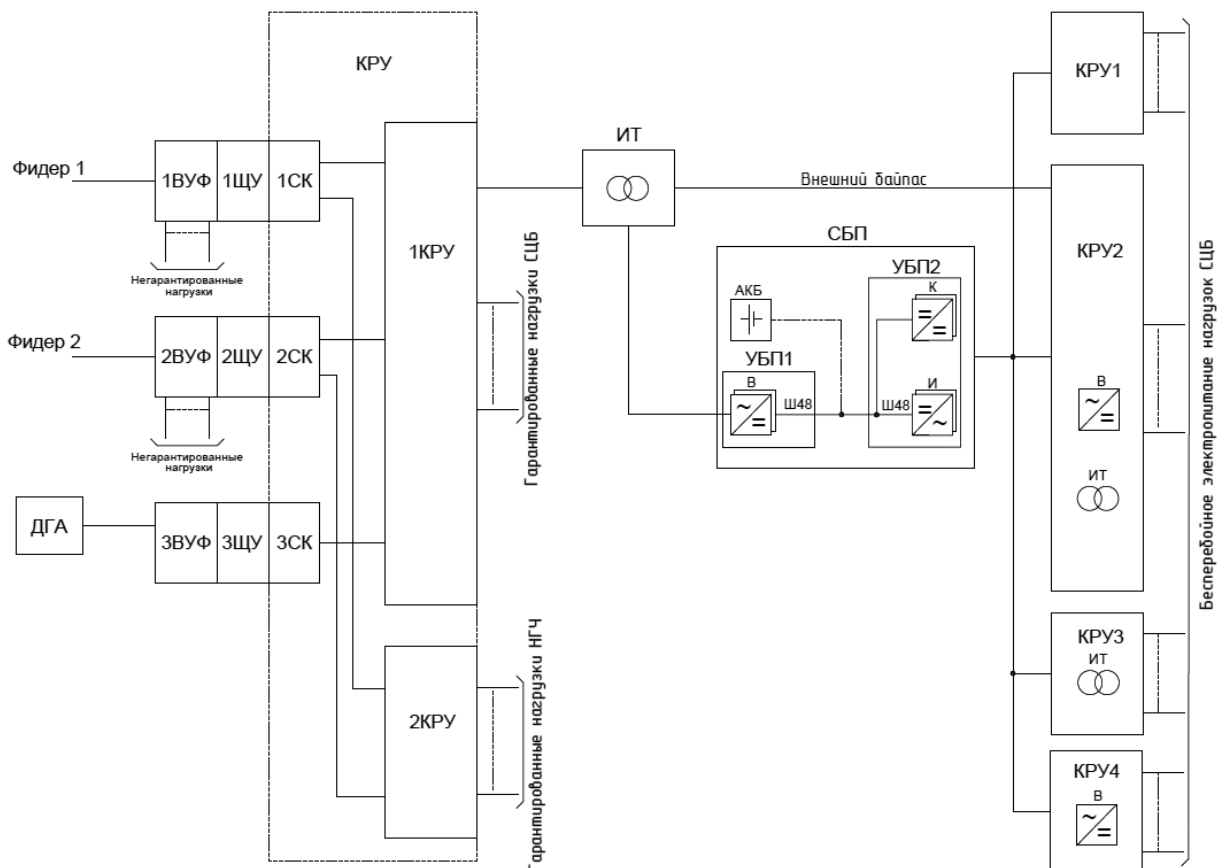


Рис. 1. Структурная схема УЭП-МПК

кабели внешних фидеров заводятся через отдельные независимые вводные устройства фидера (ВУФ), количество которых определяется категорией потребителя. Каждое из вводных устройств на входе содержит рубильник с видимым разрывом цепей, обеспечивающий гарантированное разъединение цепей по требованиям норм пожаротушения. Для защиты от электрических перегрузок по току в ВУФ устанавливаются два отдельных автоматических выключателя, выходы с одного из которых идут на изолирующий трансформатор (ИТ), а далее – в систему бесперебойного электропитания и через распределительные устройства к соответствующим нагрузкам устройств сигнализации, централизации и блокировки. Для гарантированного электропитания нагрузок, не относящихся к СЦБ, в ВУФ устанавливается отдельный входной автомат. Щит учета электроэнергии (ЩУ) обеспечивает учет потребляемой электроэнергии. От вводных устройств каждый фидер подключается на входные клеммы силового коммутатора (СК): 1 СК, 2 СК, 3 СК, где происходит проверка параметров входного напряжения и – при их соответствии заданным значениям – автоматическое включение фидера в работу. СК обеспечивает подключение внешнего источника питания к системе бесперебойного питания (СБП). В СК реализована схема автоматического ввода резерва: в случае пропадания фидера осуществляется автоматический переход на второй фидер, в случае пропадания второго – автоматический переход на третий фидер, подразумевающий под собой питание от резервной автономной электростанции (РАЭС). Во время перехода с фидера на фидер, а также в случае пропадания всех фидеров (и отсутствии или незапуске РАЭС) питание нагрузок идет от аккумуляторной батареи (АКБ).

Комплектные распределительные устройства (КРУ) выпускаются четырех видов.

КРУ без индекса предназначено для решения функциональных и логических задач: выбора фидера автоматом ввода резерва и управления местной электростанцией.

КРУ 1-го типа предназначено для распределения переменного входного напряжения  $\sim 220$  В между потребителями без каких-либо преобразований. КРУ 2-го типа предназначено для распределения входного напряжения между потребителями с его преобразованием как в переменное, так и в постоянное с необходимыми значениями. КРУ 3-го типа предназначено для распределения входного напряжения между потребителями с его преобразованием в переменное с необходимыми значениями. КРУ 4-го типа предназначено для распределения постоянного входного напряжения  $=24$  В между потребителями без каких-либо преобразований.

От отдельного распределительного устройства 1 КРУ образуется гарантированное электропитание нагрузок (сети рабочего освещения, вентиляции, кондиционирования, бытовых нагрузок, электрообогрева и т. п.). Под гарантированным электропитанием понимается электропитание, при котором допускается кратковременное (на время переключения фидеров) ухудшение

показателей качества электроэнергии, просадки и исчезновения напряжения на входных выводах цепей питания аппаратуры. Длительность прерывания электропитания при переключении резерва не должна превышать 1,3 с. При пропадании обоих фидеров выделяется одна минута на запуск РАЭС, при этом совершается не менее трех попыток запуска.

Гарантированное электропитание нагрузок дистанции гражданских сооружений (устройства обогрева помещений/модулей, сети хозяйственного освещения и т. п.) в УЭП-МПК обеспечивается от отдельного распределительного устройства 2 КРУ.

Негарантированное электропитание образуется напрямую от 1 ВУФ. Под негарантированным электропитанием понимается вид электропитания нагрузки, обеспечиваемого устройством электропитания, при котором допускается длительное ухудшение показателей качества электроэнергии, провалы и исчезновения напряжения на входных выводах цепей питания технических средств.

К силовым коммутаторам через изолирующий трансформатор (ИТ) подключается СБП, которая выполняет две главные задачи:

- осуществляет качественное электроснабжение нагрузок, прежде всего вычислительной техники и сетевого коммуникационного оборудования, критичных к параметрам электроэнергии;
- обеспечивает непрерывность питания нагрузок, непосредственно обеспечивающих бесперебойность и безопасность перевозочного процесса.

Под бесперебойным электропитанием понимается вид электропитания нагрузки, обеспечиваемого устройством электропитания, при котором не допускаются исчезновение или перепады напряжения, а также отклонения от регламентированных показателей качества электроэнергии.

В СБП используются устройства бесперебойного электропитания (УБП) двойного преобразования, относящиеся к категории on-line. Достоинством метода является идеальное питание нагрузки при любых неполадках в сети, нулевое время перехода на АКБ без переходных процессов. Питание нагрузки без перехода на АКБ в широком диапазоне напряжения сети.

УЭП-МПК включают в себя систему технической диагностики и мониторинга, контролирующую все ключевые узлы системы электропитания и в онлайн-режиме транслирующую информацию на автоматизированное рабочее место электромеханика и дежурного по станции (ДСП), а также в системы верхнего уровня. Программное обеспечение СТДМ УЭП-МПК выполняет следующие функции:

- краткое отображение состояния УЭП-МПК (фидеров, АКБ), напряжение и потребляемые токи, температуру, критические и некритические аварии, сопротивление изоляции и т. п.);
- расширенное отображение состояния объектов УЭП-МПК (гармонические составляющие, активную и реактивную мощность);
- расширенное отображение состояния РАЭС (напряжение, токи, частоту, объем топлива, ошибки в работе, прогнозируемое время работы);

— отображение состояний преобразователей (инверторов, конверторов, выпрямителей).

## 2. Анализ отказов технических средств в хозяйстве автоматики и телемеханики

Анализируя статистику отказов в хозяйстве автоматики и телемеханики с 2010 по 2018 годы, можно отметить, что в целом наблюдается положительная тенденция по снижению числа отказов аппаратуры СЦБ (рис. 2). Это происходит благодаря внедрению современных систем диагностики и мониторинга, совершенствованию структурной и элементной базы систем СЦБ.

Однако вопреки общей положительной динамике растет число отказов устройств ЖАТ по причине коммутационных и грозовых перенапряжений (ПН), причем доля последних преобладает (рис. 3).

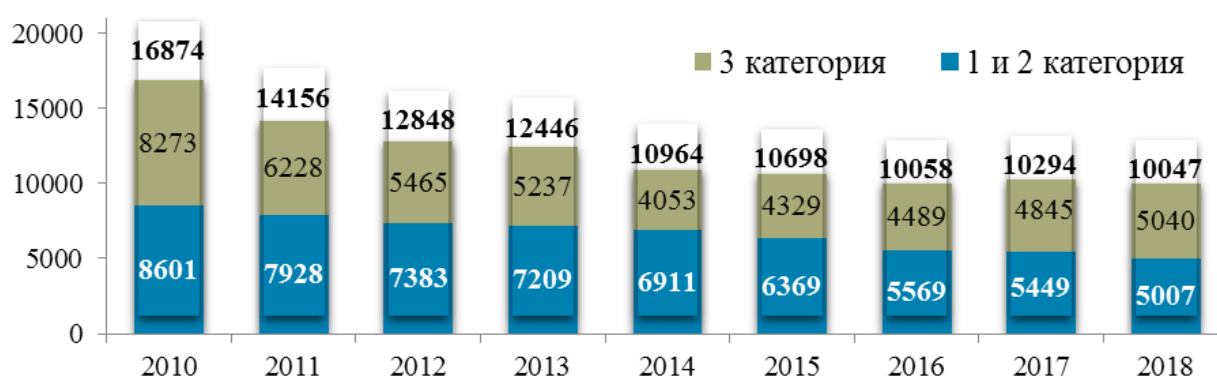


Рис. 2. Отказы технических средств в хозяйстве автоматики и телемеханики за 2010–2018 годы

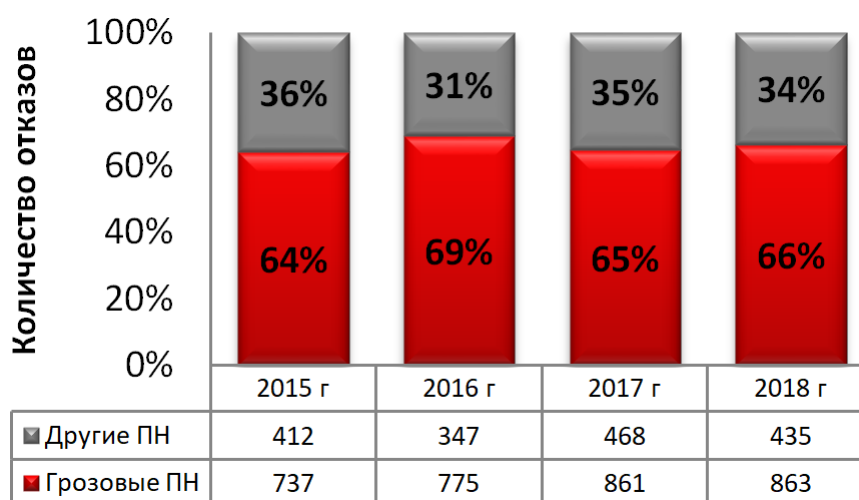


Рис. 3. Количество и доля отказов устройств ЖАТ вследствие воздействия перенапряжений за 2015–2018 годы

**Таблица 1.** Влияние отказов на потери поездо-часов в хозяйстве автоматики и телемеханики в зависимости от характера воздействия за 2018 год

Воздействия	Потери поездо-часов	
	2018 год	%
Эксплуатационные	2627,1	20,8
Деградационные	3620,7	28,6
Конструктивные	1875,5	14,8
Производственные	1890,5	14,9
Влияние погоды (атмосферных перенапряжений)	1315	10,4
Кражи, порчи	1377,2	10,9
Итого	12 660,6	

С увеличением числа отказов аппаратуры ЖАТ растут и задержки поездов, вызванные грозowymi перенапряжениями. Так, согласно таблице 1, погодные условия (в т. ч. атмосферные перенапряжения) вызвали свыше 1300 поездо-часов потерь, что составляет более 10 % от всех задержек поездов в сети РЖД за год.

Увеличение количества отказов устройств ЖАТ по причине грозowych ПН и потерь поездо-часов объясняется в т. ч. тем, что с каждым годом растет число микропроцессорных и релейно-процессорных устройств, внедряемых в хозяйстве автоматики и телемеханики. Усугубляет ситуацию тот факт, что микроэлектронные устройства из-за уменьшения рабочей поверхности микроэлектронных компонентов и малого междуэлектродного пространства способны выдержать лишь незначительные допустимые перенапряжения и токи перегрузки, уровень которых гораздо ниже по сравнению с релейными системами.

В работах [3, 11, 12] показано, что распределенные сети систем электроснабжения, расположенные над поверхностью земли, подвержены прямым ударам молнии, электрическому влиянию грозowych облаков и магнитному влиянию токов молнии. Высоковольтные линии являются направляющей средой для волн атмосферных перенапряжений, которые по мере распространения воздействуют на все технические средства, подключенные к распределительным сетям электроснабжения.

Системы электропитания ЖАТ – последний рубеж, от которого непосредственно идет электропитание микропроцессорных централизаций, электронных систем автоблокировки, автоматизированных систем диспетчерского управления и контроля, компьютерных диспетчерских централизаций и многих других микропроцессорных устройств. При этом воздушные линии электропередач выполняют роль антенны, стягивающей на себя прямые удары молнии и индуцированные перенапряжения при электромагнитной индукции близких грозowych разрядов в объекты и землю.



Традиционные методы и способы защиты технических средств и служебно-технических зданий от воздействий атмосферного электричества и коммутационных перенапряжений на железных дорогах России пришли в противоречие с допустимыми уровнями перенапряжений для микроэлектронных устройств. Зачастую устройства защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП) не в состоянии защитить аппаратуру ЖАТ от грозовых перенапряжений. Как показывает статистика [2], за 2018 год отмечено 395 случаев отказов УЗИП при 863 зарегистрированных грозовых перенапряжениях. Таким образом, около 45 % УЗИП в случае грозовых ПН выходят из строя и не способны защитить устройства ЖАТ.

Для современных электронных систем ЖАТ защитные характеристики применяемых элементов не всегда обеспечивают необходимый уровень защиты наиболее чувствительных полупроводниковых элементов. Основными причинами низкой надежности существующих устройств защиты являются их электрические характеристики, которые не согласованы с допустимой энергией, действующей на УЗИП. Энергия атмосферных перенапряжений превышает допустимые уровни энергий для УЗИП. Для рассеяния таких энергий требуется создание систем защиты от импульсных перенапряжений, которые представляют собой набор устройств защиты от импульсных перенапряжений, должным образом подобранных, согласованных и установленных. Эти устройства формируют систему защиты, обеспечивающую снижение количества отказов электрических и электронных систем [13].

### **3. Активный метод защиты УЭП-МПК**

Растущие с каждым годом финансовые потери ОАО «РЖД» от атмосферных ПН требуют пересмотра традиционных способов защиты от опасных электромагнитных воздействий (ОЭМВ) – напряжений и токов в цепях устройств ЖАТ, вызывающих повреждения технического средства (пробой изоляции, тепловое и/или динамическое разрушение), а также поражение электрической энергией обслуживающего персонала [14, 15].

Как было отмечено выше, электропитающая установка – последний «сдерживатель» качества электропитания, от которого осуществляется питание разного рода микропроцессорных устройств СЦБ. В состав современных УЭП также входит микропроцессорная техника: выпрямители, инверторы, конвертеры, контроллеры, платы преобразования частоты – все это микроэлектронные устройства, которые так же подвержены ОЭМВ со стороны трансформаторной подстанции при попадании грозового разряда в контактную сеть. За 2018 год в два раза увеличилось количество вышедших из строя выпрямителей УЭП, выросло число отказов контроллеров.

По мнению авторов, чтобы сократить ущерб от ОЭМВ, следует применять автоматические радиотехнические системы локализации гроз, позволяющие по-

лучать характеристики молнии в реальном масштабе времени по мере нарастания и распространения грозового фронта. Системы локации гроз позволяют определять основные характеристики молний на расстоянии до 200 км с погрешностью до 1 км. Создание такой системы на железнодорожном транспорте даст возможность определить наиболее активные по воздействию грозы участки железной дороги и обосновать требования к защите от атмосферных перенапряжений на таких участках [13, 16].

### **3.1. Синхронизация с имеющимися грозопеленгационными сетями посредством глобальной компьютерной сети Интернет**

Российские региональные центры исследования гроз многие годы ведут мониторинг грозовой активности. В настоящее время существует множество систем грозопеленгации [17–24], в т. ч. коммерческие (ГПС «Алвес», «Верея-МР», WWLLN, NLDN (Vaisala), Euclid, Boltek, GLN (TOA Systems), «Росгидромет» и др.) и общедоступные (Blitzortung). Взаимодействие холдинга ОАО «РЖД» с одной из систем позволит вести мониторинг грозовой активности по всей сети железных дорог России.

Пример успешного проекта – взаимодействие Кольского научного центра РАН, который с 2013 года ведет мониторинг грозовой активности по территории Мурманской области, с общедоступной сетью грозопеленгации Blitzortung [25, 26].

Проект сети грозопеленгации Blitzortung был инициирован в начале 2000-х годов профессором Дюссельдорфского университета Эгоном Ванке. Он представлял собой распределенную сеть детекторов молниевых разрядов, позволяющую с высокой точностью определять место удара молнии в землю. В конце 2005 года был создан прототип сети из нескольких детекторов, а на начало 2021-го в сети зарегистрировано свыше 2000 устройств более чем в 80 странах мира. Из них приблизительно 1600 работают постоянно и поставляют данные из всех точек планеты.

Детектор Blitzortung является четырехканальным приемником сигналов низкочастотных диапазонов (3–300 кГц). Электромагнитная волна, генерируемая молниевым разрядом, улавливается тремя ортогональными магнитными антеннами и одной электрической, причем могут быть задействованы от одного до четырех приемных каналов. Аналоговые сигналы усиливаются, фильтруются, оцифровываются с частотой дискретизации 500 кГц и проходят предварительную обработку в микроконтроллере устройства для выделения молниеподобных сигналов из всего потока принятого электромагнитного излучения и определения точного времени получения детектором этих сигналов. Для выяснения места удара молнии в землю сеть Blitzortung использует только информацию о координатах детектора и времени регистрации молниевого разряда. Все детекторы снабжены GPS-приемниками, которые и обеспечивают высокую точ-

ность определения координат и времени. Каждый зарегистрированный сигнал снабжается временной меткой, которая вместе с координатами детектора посылается на сервер сбора данных. Связь детекторов с серверами реализуется через Интернет посредством сетевого интерфейса. Серверы осуществляют хранение и обработку полученных от детекторов данных и их визуализацию на сайтах [www.blitzortung.org](http://www.blitzortung.org) и [www.lightningmaps.org](http://www.lightningmaps.org).

Место удара молнии в землю вычисляется с помощью метода ТОВА (Time of Arrival), основанного на измерении задержки распространения радиосигнала между источником (молнией) и приемником (детектором). Если несколько детекторов принимают один и тот же сигнал в разные моменты времени, то, зная скорость распространения сигнала (в случае электромагнитной волны в атмосфере это скорость света), можно построить семейство кривых, на которых лежат все точки возможного расположения источника этого сигнала. Точка пересечения этих кривых и будет координатой удара молнии в землю. Каждая кривая (в данном случае это гипербола) строится на основании разницы во времени получения сигнала двумя детекторами. Для определения координат разряда требуется как минимум пересечение двух гипербол, т. е. теоретически сигнал должен быть принят как минимум тремя детекторами.

Недостаток системы в том, что каналы передачи погодных данных не являются надежными и поверенными устройствами. Кроме того, точность получения координаты разряда ограничена из-за малого числа регистраторов, расположенных в широкой полосе российских железных дорог, что делает эту систему непригодной для надежного обеспечения грозобезопасности ОАО «РЖД».

### **3.2. Однопунктовый грозопеленгатор на посту электрической централизации**

В силу высокой протяженности российских железных дорог синхронизация с имеющимися грозопеленгационными сетями не всегда может дать точный результат по определению грозовой активности. В таком случае более эффективен метод регистрации разрядов молний с помощью однопунктового грозопеленгатора дальнего радиуса действия, например, StormTracker канадской фирмы Voltek имеет заявленный изготовителем радиус детектирования до 480 км. Грозопеленгатор принимает радиоволны, возникающие вследствие разряда молнии, в диапазоне очень низких частот с помощью ЕН-антенны. Однопунктовый сверхдлинноволновой грозопеленгатор-дальномер (ГПД) оригинальной конструкции включает вычислительный комплекс с программными модулями, используемыми для отображения в реальном времени пространственно-временной картины развивающейся грозовой активности и оценки степени ее грозоопасности. Он обладает преимуществом более точного и эффективного локального (в радиусе до 100 км от конкретного объекта) обнаружения грозовой активности, определения стадии развития грозы, наличия опасных молниевых

вспышек. Будучи установленным в составе СТДМ УЭП на посту электрической централизации, может подать сигнал на контроллер системы УЭП-МПК для перехода железнодорожной станции на работу от РАЭС или (при ее отсутствии) от аккумуляторного резерва. При проектировании железнодорожной станции, как правило, закладывается двухчасовой аккумуляторный резерв, а согласно статистическим данным [27], средняя ширина грозового фронта составляет не более 16 км с продолжительностью грозы 1–1,5 часа. Это означает, что на время опасной грозовой активности устройства электропитания ЖАТ автономно и безопасно продолжают свою работу, исключая проникновение ОЭМВ со стороны высоковольтной линии.

Преимуществами однопунктовых ГПД являются их автономность, мобильность, экономичность, простота в эксплуатации, относительная дешевизна. В этой связи их использование на объектах железнодорожного транспорта, по мнению авторов, не только возможно, но и предпочтительно.

При разработке ГПД основная проблема возникает при реализации достаточно точного дальномерного алгоритма [28]. Для определения пеленга на молниевый разряд из пункта приема (местоположения ГПД) традиционно используется соотношение горизонтальных магнитных составляющих электромагнитного излучения, в качестве датчиков которых применяются скрещенные магнитные рамки. Для определения расстояния до молниевого разряда предпочтительно применение одного из так называемых E–H-алгоритмов, обладающих наилучшей точностью среди других известных методов однопунктовой дальнометрии. В их основе лежит использование различной зависимости от дальности вертикальной электрической (E) и горизонтальной магнитной (H) компонент электромагнитного излучения молниевого разряда, что позволяет избавиться от влияния на точность оценки дальности вариаций параметров источника излучения. К настоящему времени разработан целый ряд модификаций E–H-дальномеров и пеленгаторов, отличающихся способом извлечения информации об оцениваемой дальности и азимуте на источник молниевого разряда. Описание принципов построения и краткий анализ их основных характеристик содержится в работе [27].

## **Заключение**

Проведенные исследования показали, что атмосферные (грозовые) перенапряжения ежегодно наносят огромный урон железнодорожной инфраструктуре. Только на примере изучения последствий грозовых перенапряжений в хозяйстве ЖАТ можно отметить значительные экономические потери ОАО «РЖД» в результате вышедшего из строя оборудования и существенных задержек движения поездов.

Введение в систему технической диагностики и мониторинга УЭП функции локации гроз с возможностью регистрации опасной грозовой активности

позволяет реализовать активный метод защиты вводов питания устройств инфраструктуры обеспечения движения поездов при близких грозовых разрядах. На время прохождения грозового фронта с опасными характеристиками разрядов устройства железнодорожной автоматики отключаются от внешних фидеров питания энергоснабжения и переходят на питание от автономных источников – аккумуляторного резерва или резервной автономной электростанции.

Создание комплексной системы диагностики и мониторинга, включающей удаленный мониторинг грозовой активности с возможностью телемеханического перехода на независимые резервные источники электропитания позволит снизить затраты на техническую эксплуатацию устройств защиты от перенапряжений, сохранить и повысить надежность работы микропроцессорных устройств и инфраструктуры перевозочного процесса и сократить потери железных дорог при задержках поездов, связанных с отказами средств защиты от перенапряжений и аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики.

Дальнейшие перспективные направления исследований могут идти по пути выбора оптимального однопунктового грозопеленгатора для постов электрической централизации по критериям дальности действия, надежности, точности. Необходимо произвести расчет экономической эффективности реализации идеи и создать модель СТДМ с функцией активного метода защиты вводов электропитания, после чего приступить к созданию опытного образца.

### Библиографический список

1. *Никитин А. Б.* Обобщение тенденций развития устройств электрической централизации и опыта тиражирования компьютерных систем оперативного управления движением поездов на станциях / А. Б. Никитин, С. В. Бушуев // *Транспорт Урала.* – 2006. – № 2. – С. 2–8.
2. Анализ эксплуатационной деятельности хозяйства автоматики и телемеханики по итогам 2018 года // *Управление автоматики и телемеханики центральной дирекции инфраструктуры.* – М., 2019. – 96 с.
3. *Никитин А. Б.* Концепция защиты устройств железнодорожной автоматики и телемеханики от перенапряжений / А. Б. Никитин, О. А. Наседкин, А. Д. Манаков, В. А. Шатохин // *Ж.-д. трансп. Серия «Сигнализация и связь». ЭИ/ЦНТИ.* – 2006. – Вып. 3. – С. 1–25.
4. *Кравченко В. И.* Грозозащита радиоэлектронных средств: справочник / В. И. Кравченко. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
5. *Михайлов М. И.* Влияние внешних электромагнитных полей на цепи проводной связи и защитные мероприятия / М. И. Михайлов. – М.: Связьиздат, 1959. – 583 с.
6. Правила защиты установок проводной связи энергосистем от опасных напряжений и токов (Схемы защиты и нормативные указания). – М., 1966. – 20 с.
7. Правила защиты устройств проводной связи, железнодорожной сигнализации и телемеханики от опасного и мешающего влияния линий электропередачи. Ч. 1. Общие положения. Опасные влияния. – М.: Энергия, 1966. – 40 с.
8. Правила защиты устройств проводной связи, железнодорожной сигнализации и телемеханики от опасного и мешающего влияния линий электропередачи. Ч. 2. Мешающие влияния. – М.: Связь, 1972. – 56 с.



9. *Снегуров В. С.* Способ защиты от грозовых перенапряжений централизованных электронных систем железнодорожной автоматики и телемеханики / В. С. Снегуров, А. В. Снегуров, В. А. Шатохин // Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте: сборник докладов «ТрансЖАТ-2006». – СПб., 23–26 августа. – С. 195–198.
10. *Махов Д. А.* Модель опасной грозы. Вторая Российская конференция по молниезащите / Д. А. Махов, Д. Ю. Казаков. – М.: Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского (ОАО «ЭНИН»), 22–24 сентября 2010 г.
11. *Манаков А. Д.* Задачи концепции защиты от перенапряжений инфраструктуры обеспечения движения поездов / А. Д. Манаков, А. Б. Никитин, О. А. Наседкин, В. А. Шатохин // Развитие элементной базы и совершенствование методов построения устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. – 2014. – № 1. – С. 5–13.
12. *Манаков А. Д.* Воздействие перенапряжений на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики АО «Узбекистон темир йуллари» / А. Д. Манаков, А. А. Рахмонбердиев // Автоматика на транспорте. – 2019. – № 3. – С. 338–355.
13. ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010. Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1. Общие принципы. – М.: Стандартинформ, 2011. – 46 с.
14. *Кравченко К. В.* Защита систем ЖАТ от грозовых и коммутационных перенапряжений / К. В. Кравченко // Автоматика, связь, информатика. – 2011. – № 4. – С. 25–28.
15. Правила защиты устройств проводной связи, железнодорожной сигнализации и телемеханики от опасного и мешающего влияния линий электропередачи. Ч. 1. Общие положения. Опасные влияния. – М.: Энергия, 1966. – 40 с.
16. *Махов Д. А.* Модель опасной грозы. Модернизация процессов перевозок систем автоматизации и телекоммуникаций на транспорте / Д. А. Махов, Д. Ю. Казаков // Труды межрегиональной научно-практической конференции с международным участием. Под ред. А. И. Годяева. Хабаровск, 9–10 декабря 2010 г. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2010. – Т. 2. – С. 112–121.
17. *Морозов В. Н.* Исследования в области атмосферного электричества и пеленгации гроз / В. Н. Морозов [и др.] // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – 2009. – № 560. – С. 213–242.
18. *Московенко В. М.* Применение системы грозопеленгации «Верей-МР» в интересах электроэнергетики России / В. М. Московенко, Б. П. Знаменщиков, С. В. Золотарев // Новое в российской электроэнергетике. – 2012. – № 2. – С. 15–23.
19. *Dowden R. L.* VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites / R. L. Dowden, J. B. Brundell, C. J. Rodger // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2002. – Vol. 64. – No. 7. – P. 817–830.
20. National Lightning Detection Network NLDN. – URL: <https://www.vaisala.com/en/products/data-subscriptions-and-reports/data-sets/nldn/> (дата обращения: 10.04.2021).
21. *Schulz W.* The European lightning location system EUCLID. Part 1: Performance analysis and validation / W. Schulz [et al.] // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. – 2016. – No. 16. – Pp. 595–605.
22. Boltek. Lightning Detection Systems. – URL: <https://www.boltek.com/> (дата обращения: 10.04.2021).
23. Global Lightning Network – TOA Systems. – URL: <http://toasystems.com/our-network/global-lightning/> (дата обращения: 10.04.2021).
24. *Wanke E.* World-Wide Low-Cost CommunityBased Time-of-Arrival Lightning Detection and Lightning Location Network / E. Wanke, R. Andersen, T. Volgnandt. – 2016. – URL: <http://www.blitzortung.org/> (дата обращения: 10.04.2021).
25. *Бурцев А. В.* Сопоставление результатов регистрации различных систем грозопеленгации в Кольском регионе / А. В. Бурцев, Г. П. Фастий, В. В. Ярошевич // Труды Кольского научного центра РАН. – 2018. – № 3–16 (9).



26. *Бурцев А. В.* Развитие системы мониторинга грозовой активности на Кольском полуострове / А. В. Бурцев, Г. П. Фастий, В. В. Ярошевич // Труды Кольского научного центра РАН. – 2018. – № 8 (17).
27. *Кононов И. И.* Радиотехнические методы местоопределения грозовых очагов / И. И. Кононов, И. А. Петренко, В. С. Снегуров. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 222 с.
28. *Кононов И. И.* Альтернативное обеспечение грозобезопасности на объектах водного транспорта / И. И. Кононов, Д. М. Крутой, И. Е. Юсупов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2013. – № 3 (19).

**A. D. Manakov,  
V. A. Shatokhin,  
A. A. Poroshin**

*Department of Automation and Telemechanics on Railways  
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University*

## **ACTIVE PROTECTION METHOD FOR POWER SUPPLY OF MICROPROCESSOR COMPLEXES OF RAILWAY AUTOMATION AND REMOTE CONTROL**

The article discusses the issues of increasing the reliability, safety, and survivability of power supply for railway automation and remote control devices. The authors have analyzed failures in the automation and remote control facilities in recent years, estimated the proportion of device failures due to lightning overvoltages, and highlighted an upward trend in the railway automation and remote control failures due to switching and lightning overvoltages. The design of modern uninterruptible power supply devices is provided with a description of the main structural units. Methods are proposed for the implementation of active protection for power supply of railway automation and remote control by introducing the thunderstorm locating functionality into the technical diagnostics and monitoring system. This solution will enable registration of hazardous thunderstorm activity and maintaining the devices' serviceability and efficiency, and will ensure the continuity and safety of the transportation process, which will help reduce damage incurred due to hazardous electromagnetic effects, including lightning overvoltages. The article suggests synchronizing the thunderstorm location system with the existing lightning detection networks through the Internet, a global computer network, as well as the option of installing a single-point lightning detector at an electrical interlocking post.

Railway automation power supply systems, atmospheric overvoltage, electromagnetic effects, a system for technical diagnostics and monitoring of thunderstorm activity, an active protection method

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-522-538

### **References**

1. *Nikitin A. B. & Bushuyev S. V.* (2006) Obobshcheniye tendentsiy razvitiya ustroystv elektricheskoy tsentralizatsii i opyta tirazhirovaniya komp'yuternykh sistem operativnogo upravleniya dvizheniyem poyezdov na stantsiyakh [Generalization of trends in the development of electrical interlocking devices and the experience of replicating computer systems for train

- traffic operational management at stations]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], no. 2, pp. 2–8. (In Russian)
2. *Analiz ekspluatatsionnoy deyatel'nosti khozyaystva avtomatiki i telemekhaniki po itogam 2018 goda* [Analysis of the operational activities of the automation and remote control facilities at the end of 2018]. (2019). Automation and Telemechanics Office of the Central Infrastructure Directorate. Moscow, 96 p. (In Russian)
  3. *Nikitin A. B., Nasedkin O. A., Manakov A. D. & Shatokhin V. A.* (2006) Kontsepsiya zashchity ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki ot perenapryazheniy [Overvoltage protection concept of railway automation and remote control]. *Zh.-d. transp. Seriya "Signalizatsiya i svyaz"* [Railway Transport Journal. "Signaling and communication" Series], EI/CSTI, iss. 3, pp. 1–25. (In Russian)
  4. *Kravchenko V. I.* (1991) Grozozaschita radioelektronnykh sredstv: Spravochnik [Lightning Protection of Radio-Electronic Facilities: Handbook]. Moscow, Radio i svyaz, 264 p. (In Russian)
  5. *Mikhaylov M. I.* (1959) Vliyaniye vneshnikh elektromagnitnykh poley na tsepi provodnoy svyazi i zashchitnyye meropriyatiya [Effect of external electromagnetic fields on wire communication circuits and protective measures]. Moscow, Svyaz'izdat, 583 p. (In Russian)
  6. *Pravila zashchity ustanovok provodnoy svyazi energosistem ot opasnykh napryazheniy i tokov (Skhemy zashchity i normativnyye ukazaniya)* [Rules for the protection of wireline installations of power systems from hazardous voltages and currents (Protection circuits and regulatory instructions)]. (1966). Moscow, 20 p. (In Russian)
  7. *Pravila zashchity ustroystv provodnoy svyazi, zheleznodorozhnoy signalizatsii i telemekhaniki ot opasnogo i meshayushchego vliyaniya liniy elektroperedachi. Ch. 1. Obshchiye polozheniya. Opasnyye vliyaniya* [Rules for the protection of wireline devices, railway signaling and remote control from the hazardous and interfering influence of power lines. P. 1. General Provisions. Hazardous influences]. Moscow, Energiya [Energy], 1966, 40 p. (In Russian)
  8. *Pravila zashchity ustroystv provodnoy svyazi, zheleznodorozhnoy signalizatsii i telemekhaniki ot opasnogo i meshayushchego vliyaniya liniy elektroperedachi. Ch. 2. Meshayushchiye vliyaniya* [Rules for the protection of wireline devices, railway signaling and remote control from the hazardous and interfering influence of power lines. P. 2. Interfering influences]. (1972). Moscow, Svyaz', 56 p. (In Russian)
  9. *Snegurov V. S., Snegurov A. V. & Shatokhin V. A.* (2006) Sposob zashchity ot grozovykh perenapryazheniy tsentralizovannykh elektronnykh sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Method of protection against lightning overvoltage of interlocked electronic railway automation and remote control systems]. *Avtomatika i telemekhanika na zheleznodorozhnom transporte – sbornik dokladov "TransZhAT-2006"* [Railway automation and remote control – a collection of papers of "TransZHAT-2006"]. Saint-Petersburg, August 23–26, pp. 195–198. (In Russian)
  10. *Makhov D. A., Kazakov D. Yu.* (2010) Model' opasnoy grozy [Model of a dangerous thunderstorm]. *Vtoraya Rossiyskaya konferentsiya po molniyezashchite* [II Russian Conference on Lightning Protection], Moscow, G. M. Krzhizhanovsky Power Engineering Institute (JSC "ENIN"), September 22–24 (In Russian)
  11. *Manakov A. D., Nikitin A. B., Nasedkin O. A. & Shatokhin V. A.* (2014) Zadachi kontseptsii zashchity ot perenapryazheniy infrastruktury obespecheniya dvizheniya poyezdov [Objectives of the concept of overvoltage protection of the train traffic maintenance infrastructure]. *Razvitiye elementnoy bazy i sovershenstvovaniye metodov postroyeniya ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki* [Development of the element base and improvement of designing methods for railway automation and remote control], no. 1, pp. 5–13. (In Russian)
  12. *Manakov A. D. & Rakhmonberdiyev A. A.* (2019) Vozdeystviye perenapryazheniy na ustroystva zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki AO "Uzbekiston temir y'ullari" [Impact of

- overvoltage on the railway automation and remote control of JSC “Uzbekiston temir yullari”]. *Avtomatika na transporte* [Automatic Equipment in Transport], no. 3, pp. 338–355. (In Russian)
13. *GOST R MEK 62305–1-2010 Menedzhment riska. Zashchita ot molnii. Chast’ 1. Obshchiye printsipy* [GOST R IEC 62305–1-2010 Risk management. Protection against lightning. Part 1. General principles]. (2011). Moscow, Standartinform, 46 p. (In Russian)
  14. *Kravchenko K. V.* (2011) Zashchita sistem ZhAT ot grozovykh i kommutatsionnykh perenapryazheniy [Protection of railway automation and remote control systems against lightning and switching overvoltages]. *Avtomatika, svyaz’, informatika* [Automation, communication, computer science], no. 4, pp. 25–28. (In Russian)
  15. *Pravila zashchity ustroystv provodnoy svyazi, zheleznodorozhnoy signalizatsii i telemekhaniki ot opasnogo i meshayushchego vliyaniya liniy elektroperedachi. Ch. 1. Obshchiye polozheniya. Opasnyye vliyaniya* [Rules for the protection of wireline devices, railway signaling and remote control from the hazardous and interfering influence of power lines. P. 1. General Provisions. Hazardous influences]. (1966). Moscow, Energiya [Energy], 40 p. (In Russian)
  16. *Makhov D. A. & Kazakov D. Yu.* (2010) Model’ opasnogo grozy. Modernizatsiya protsessov perevozok sistem avtomatizatsii i telekommunikatsiy na transporte [Model of a dangerous thunderstorm. Modernization of transportation processes of automation and telecommunication systems in transport]. *Trudy mezhrayonnykh nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Proceedings of the Interregional Scientific and Practical Conference with International Participation]. Edited by A. I. Godyayev, Khabarovsk, December 9–10, 2010. Khabarovsk, Far Eastern State Transport University Publ., vol. 2, pp. 112–121. (In Russian)
  17. *Morozov et al.* (2009) Issledovaniya v oblasti atmosfernogo elektrichestva i pelengatsii groz [Research in the field of atmospheric electricity and detection of thunderstorms]. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A. I. Voyeykova* [Proceedings of the Voeikov Main Geophysical Observatory], no. 560, pp. 213–242. (In Russian)
  18. *Moskovenko V. M., Znamenshchikov B. P., Zolotarev S. V.* (2012) Primeneniye sistemy grozopelengatsii “Vereya-MR” v interesakh elektroenergetiki Rossii [Application of the Vereya-MR lightning detection system for the benefit of the Russian electrical power-engineering]. *Novoye v rossiyskoy elektroenergetike* [New in the Russian Electrical Power-Engineering], no. 2, pp. 15–23. (In Russian)
  19. *Dowden R. L., Brundell J. B., Rodger C. J.* (2002) VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites. *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 64, no. 7, pp. 817–830.
  20. National Lightning Detection Network NLDN. URL: <https://www.vaisala.com/en/products/data-subscriptions-and-reports/data-sets/nldn> (Accessed: April 10, 2021).
  21. The European lightning location system EUCLID. Part 1: Performance analysis and validation / *W. Schulz* [et al.]. (2016). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, no. 16, pp. 595–605.
  22. Boltek. Lightning Detection Systems. URL: <https://www.boltek.com> (Accessed: April 10, 2021).
  23. Global Lightning Network – TOA Systems. URL: <http://toasystems.com/our-network/global-lightning> (Accessed: April 10, 2021).
  24. *Wanke E., Andersen R., Volgnandt T.* (2016) World-Wide Low-Cost CommunityBased Time-of-Arrival Lightning Detection and Lightning Location Network. URL: <http://www.blitzortung.org> (Accessed: April 10, 2021).
  25. *Burtsev A. V., Fastiy G. P. & Yaroshevich V. V.* (2018) Sopostavleniye rezul’tatov registratsii razlichnykh sistem grozopelengatsii v Kol’skom regione [Comparison of the recordings of various lightning detection systems in the Kola region]. *Trudy Kol’skogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], no. 3–16 (9). (In Russian)

26. *Burtsev A. V., Fastiy G. P. & Yaroshevich V. V.* (2018) Razvitiye sistemy monitoringa grozovoy aktivnosti na Kol'skom poluostrove [Development of the thunderstorm activity monitoring system on the Kola Peninsula]. Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN [Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], no. 8 (17). (In Russian)
27. *Kononov I. I., Petrenko I. A. & Snegurov V. S.* (1986) Radiotekhnicheskiye metody mestoopredeleniya grozovykh ochagov [Radiotechnical methods for locating thunderstorms]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 222 p. (In Russian)
28. *Kononov I. I., Krutoy D. M., Yusupov I. E.* (2013) Al'ternativnoye obespecheniye grozobezopasnosti na ob'yektakh vodnogo transporta [Alternative lightning protection at water transport facilities]. The scientific journal "Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova", no. 3 (19). (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии  
доцентом О. А. Наседкиным*

*Поступила в редакцию 23.06.2021, принята к публикации 10.08.2021*

*МАНАКОВ Александр Демьянович* – старший научный сотрудник Центра компьютерных железнодорожных технологий, доктор технических наук, старший научный сотрудник Центра компьютерных железнодорожных технологий, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения императора Александра I  
manakoff\_2@mail.ru

*ШАТОХИН Виталий Анатольевич* – кандидат технических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I  
vital@crtc.spb.ru

*ПОРОШИН Алексей Александрович* – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I  
poroshinscb@yandex.ru

© Манаков А. Д., Шатохин В. А., Порошин А. А., 2021

УДК 681.516.52

**Л. А. Баранов, докт. техн. наук**  
**В. Г. Сидоренко, докт. техн. наук**  
**Л. Н. Логинова, канд. техн. наук**

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

## **ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПАССАЖИРОПОТОКОВ В РАМКАХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГОРОДСКИМИ РЕЛЬСОВЫМИ ТРАНСПОРТНЫМИ СИСТЕМАМИ**

Появление большого числа транспортных пересадочных узлов, изменение конфигурации транспортной системы мегаполиса приводит к увеличению и изменению пассажиропотоков, использующих рельсовый транспорт, что влияет на его функционирование и требует учета при создании и организации работы интеллектуальной системы управления городскими рельсовыми транспортными системами. Анализ опыта исследования пассажиропотоков позволит создать новые алгоритмы прогнозирования пассажиропотоков с использованием современных технологий агентного моделирования и технического зрения. В статье рассмотрена модель стоянки транспортных средств, позволяющая учесть факторы, влияющие на длительность стоянки: пассажиропоток, время незанятости платформы, количество перевозимых пассажиров, количество вагонов в составе поезда. В статье разработаны структурная и математическая модели пассажиропотоков транспортно-пересадочного узла, предназначенные для исследования динамики интеллектуальной системы управления городскими рельсовыми транспортными системами. В качестве примера при построении математической модели рассмотрено взаимодействие пассажиропотоков транспортно-пересадочного узла «Дмитровская», в котором присутствует пересечение пассажиропотоков трех городских рельсовых транспортных систем: трамвайной оборотной станции, станции «Дмитровская», которая относится к Рижскому направлению Московской железной дороги и является остановочным пунктом линии МЦД-2 Московских центральных диаметров, станции «Дмитровская» Московского метрополитена.

Интеллектуальная система, управление транспортными системами, рельсовый транспорт, моделирование, модель стоянки, пассажиропоток, транспортно-пересадочный узел, матрица корреспонденций, агентное моделирование, техническое зрение

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-539-564

### **Введение**

В связи с увеличением численности населения крупных городов и, как следствие, с расширением сети метрополитена и городского железнодорожного



транспорта исследование взаимодействия городских рельсовых транспортных систем (ГРТС) в части синхронизации организации перевозки пассажиров (согласования парности движения, внесения корректив в оперативный график движения поездов в случае возникновения нештатных ситуаций и др.) является актуальной задачей. К ГРТС относятся участки пригородного железнодорожного транспорта в черте городов (например, Московские центральные диаметры (МЦД) и Московское центральное кольцо (МЦК)), линии метрополитена, монорельса и трамвая.

Основой интеллектуальной системы управления (ИСУ) ГРТС [1], которая предназначена для повышения качества обслуживания пассажиров и безопасности движения транспортных средств (ТС), являются алгоритмы централизованного управления движением рельсового транспорта. Для исследования алгоритмов управления целесообразно использовать модели прогнозирования заполненности транспортных узлов. Они позволяют планировать управляющие воздействия для снижения влияния возмущений (задержек ТС пассажирами или по техническим причинам, приводящих к нарушению графика движения) при внедрении систем автоведения.

Целями управления в этом случае становятся минимизация рассогласования между плановым и исполненным графиками движения, уменьшение числа остановок ТС между остановочными пунктами из-за ограничений для команд системы обеспечения безопасности движения (СОБД), уменьшение расхода электроэнергии за счет реализации энергооптимальных режимов управления.

Для автоматического задания времен хода ТС и моментов отправления их из остановочных пунктов центр управления движением ТС ГРТС использует следующие данные, получаемые в результате работы этих моделей: прогноз величины отклонения от плановой длительности стоянки ТС в следующем остановочном пункте до того момента, как оно прибыло в него; прогноз величины отклонения времени хода ТС от заданного до момента окончания движения [2].

При детализации задач управления ГРТС можно выделить несколько контуров управления, объединяющих выявленные процессы развития, планирования, управления и сбора информации (рис. 1). Именно эти процессы подлежат автоматизации в рамках ИСУ ГРТС. Решение задач анализа пассажиропотоков входят в состав процессов изучения спроса на услуги ГРТС (процесс  $p_{d1}$ ), управления сбором доходов (процесс  $p_{c6}$ ) и планирования движения транспортных средств ГРТС (процесс  $p_{c1}$ ). Традиционные для централизованных автоматизированных систем управления движением функции реализуются в рамках ИСУ ГРТС при автоматизации процесса управления движением отдельных транспортных средств (процесс  $p_{m4}$ ), который осуществляется на основе команд управления, формируемых на выходе процесса исполнения графика движения ГРТС (процесс  $p_{m1}$ ).



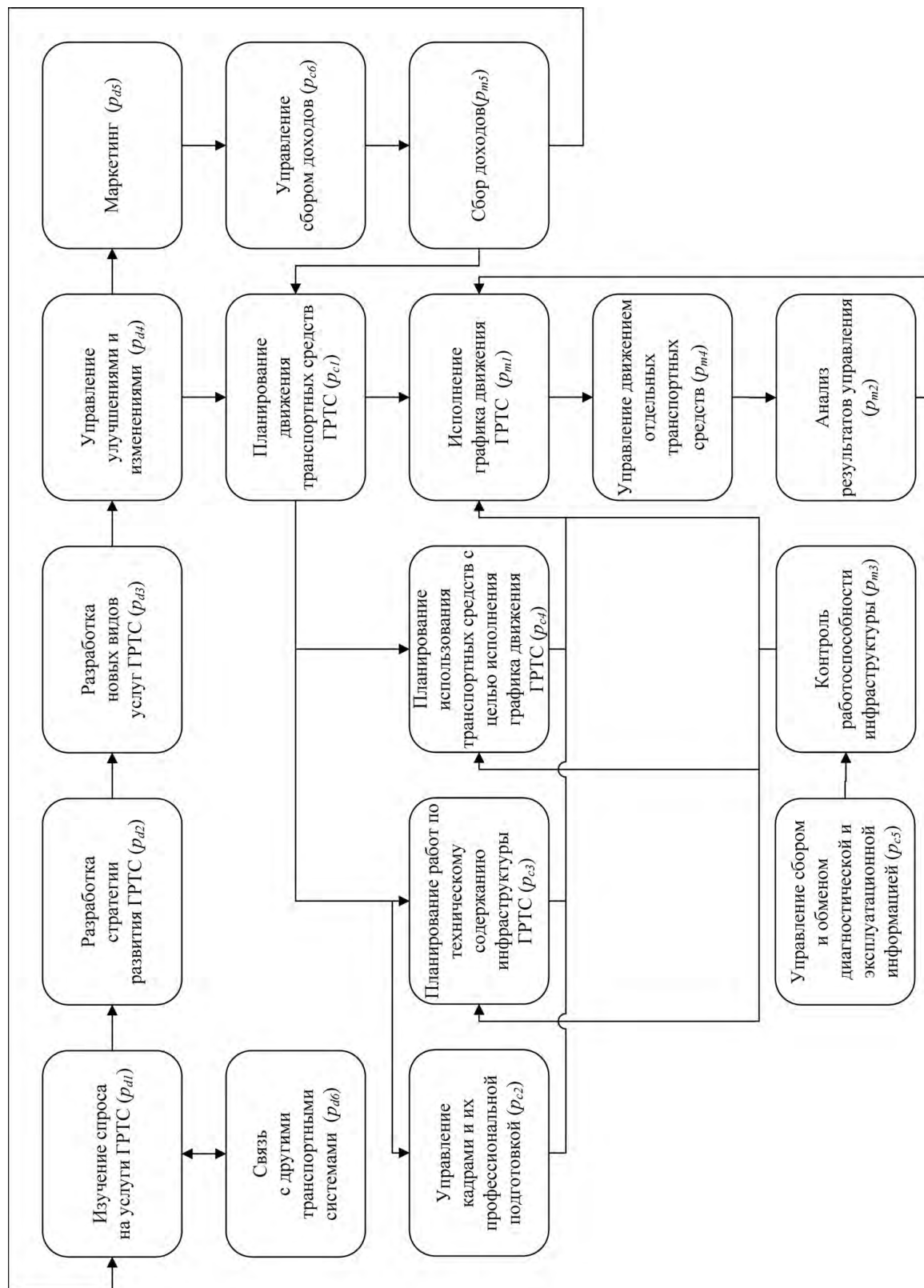


Рис. 1. Контуры управления ГРТС

## 1. Состояние вопроса

В рамках ИСУ ГРТС используется модель стоянки ТС, которая позволяет учесть по возможности максимальное количество факторов, влияющих на время стоянки. К таким факторам относятся пассажиропоток, время незанятости платформы, количество перевозимых пассажиров, количество вагонов в составе поезда. В работе [3] рассмотрена модель стоянки на примере метрополитена, который является одним из основных видов ГРТС.

Как правило, время стоянки поезда на  $j$ -й станции  $T_{cj}$  складывается из времени выхода пассажиров из поезда  $T_{ej}$ , времени посадки пассажиров в поезд  $T_{nj}$ , времени задержки отправления  $T_{зоj}$  (времени, прошедшего с момента формирования команды на закрытие дверей до момента включения тяговых двигателей подвижного состава, включая потери на открытие и закрытие дверей), случайной величины  $T_{сlj}$ , зависящей от недисциплинированных пассажиров, которые совершают посадку или высадку в момент закрытия дверей и т. д, и отклонения длительности стоянки в результате действия СОБД  $T_{сбj}$ :

$$T_{cj} = T_{ej} + T_{nj} + T_{зоj} + T_{сlj} + T_{сбj}. \quad (1)$$

В работе [3] предложена гипотеза о существовании корреляционной зависимости между величинами  $T_{cj}$ ,  $T_{ej}$ ,  $T_{nj}$ ,  $T_{зоj}$  и временем незанятости платформы поездом  $T_{нпj}$ , в течение которого происходит скопление пассажиров на платформе.

Для получения наиболее достоверной информации о закономерностях высадки и посадки пассажиров в зависимости от конструктивных особенностей станций был собран статический материал, разделенный на две группы [3]. К первой относились статистические данные, полученные на станциях, где отсутствуют эскалаторы, так называемые станции мелкого заложения; ко второй — данные о станциях глубокого заложения. Каждая из групп была поделена на две подгруппы. К первой относились данные со станций с незначительным пассажиропотоком в пиковое время, который не приводит к максимальному наполнению вагона. Ко второй подгруппе отнесены данные, собранные со станций, где значительный пассажиропоток приводит к наполнению вагона, близкому к предельному. Для станций первой группы и первой подгруппы характерны существенные изменения пассажиропотоков в утреннее время и вечернее пиковое время. Это объясняется тем, что пассажиропоток значительно увеличивается в моменты пересадки пассажиров с наземного городского транспорта в метрополитен для дальнейшей поездки.

При проведении исследований величины  $T_{cj}$ ,  $T_{ej}$ ,  $T_{nj}$ ,  $T_{зоj}$  и  $T_{нпj}$  рассматривались как система из пяти случайных величин.

Результаты обработки статистики для станций глубокого и мелкого заложения показали отсутствие корреляции между случайными величинами  $T_{ej}$ ,  $T_{зоj}$ ,  $T_{нпj}$  для всех исследуемых станций.

Близость к нулю коэффициента корреляции для случайных величин  $T_{nj}$  и  $T_{nj}$  характерна для станций:

– с большим пассажиропотоком в часы пик, когда в результате переполнения вагонов пассажирами после отправления поезда со станции на платформе остаются пассажиры;

– с небольшим пассажирооборотом в часы пик, когда не происходит переполнения вагонов пассажирами, но из-за опоздания поездов частично сокращается стоянка поезда, до наступления момента окончания посадки в поезд пассажиров, скопившихся на платформе.

Для оценки случайной величины  $T_{coj}$  (задержки поезда) по отправлению собран соответствующий статистический материал. Было замечено, что значения исследуемой величины зависят от условий, при которых происходит формирование и исполнение команды на закрытие дверей подвижного состава. Статистический материал был разбит на три характерные группы. Первая группа относится к случаю, когда закрытие дверей происходило после окончания посадки всех пассажиров, находившихся на платформе, вторая – к случаю, когда закрытие дверей осуществлялось при предельном наполнении вагона пассажирами. Третья группа относится к случаю, когда закрытие дверей происходит в режиме «отсечки» пассажиров.

Был проведен предварительный анализ статистического материала, сделаны гипотезы о том, что случайная величина  $T_{coj}$  распределена по усеченному нормальному закону.

Исследования совпадают с проведенным анализом и позволяют использовать в качестве модели стоянки ТС выражение (1). Время выхода пассажиров из поезда  $T_{ej}$  и время задержки отправления  $T_{coj}$  следует задавать постоянными величинами, равными математическим ожиданиям. При этом время посадки пассажиров в поезд является линейной функцией времени незанятости платформы, где неизвестный коэффициент при  $T_{nj}$  определяется экспериментально в результате обработки соответствующего статистического материала для каждой платформы линии метрополитена. Величина  $T_{coj}$  – случайная величина с математическим ожиданием, равным нулю, и усеченным нормальным законом распределения.

Анализ выполненных исследований в работе [3] показал возможность использования при анализе динамики системы централизованного управления движением поездов следующих моделей стоянок:

- детерминированной модели, в которой фактическое отклонение времени хода поезда от графикового на  $j$ -й станции постоянно;
- случайной модели, в которой фактическое отклонение времени хода поезда от графикового на  $j$ -й станции распределено по заданному закону распределения;
- комбинированной модели, в которой фактическое отклонение времени хода поезда от графикового на  $j$ -й станции является суммой случайной вели-

чины с заданным законом распределения и величины, линейно зависимой от времени незанятости платформы.

Использование разнообразных моделей стоянок дает возможность исследовать поведение ИСУ ГРТС при появлении возмущений на линии.

Модель стоянки, в которой отклонение поезда по отправлению является детерминированной величиной, описывается постоянной величиной на  $j$ -й станции  $T_{demj}$  [4–6]:

$$T_{cj}^{\phi}[n] = T_{cj}^{nl}[n] + T_{demj}, \quad (2)$$

где  $T_{cj}^{\phi}[n]$  – фактическое время стоянки  $n$ -го поезда на  $j$ -й станции,

$T_{cj}^{nl}[n]$  – плановое время стоянки  $n$ -го поезда на  $j$ -й станции,

$T_{demj}$  – детерминированное отклонение времен хода поездов от графикового на  $j$ -й станции.

Величина  $T_{demj}$  выбирается из условий наличия ресурса линии по времени хода, стоянке и интервалу отправления.

В модели стоянки, где задержка поезда  $T_{coj}$  будет случайной величиной, отклонение поезда по отправлению определяется по одному из трех законов распределения: усеченному нормальному, треугольному или равномерному [4, 6, 7]:

$$T_{cj}^{\phi}[n] = T_{cj}^{nl}[n] + T_{coj}, \quad (3)$$

где  $T_{coj}$  – случайная величина отклонения поездов по отправлению на  $j$ -й станции.

Комбинированная модель стоянки рассчитывает величину задержки поезда по формуле [7, 8]:

$$T_{cj}^{\phi}[n] = T_{cj}^{nl}[n] + T_{coj} + kT_{inj}[n+1], \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, изменяющийся в диапазоне 0,01–0,1.

В ИСУ ГРТС при использовании графиковых, интервальных и графиково-интервальных алгоритмов ограничением на управление является величина допустимого интервала по отправлению на  $j$ -й станции, по истечении которого может быть дана команда на отправление  $n$ -го поезда [6, 7]. Величина данного интервала зависит от фактической длительности стоянки  $[n-1]$ -го поезда на  $(j+1)$ -й станции  $T_{c(j+1)}^{\phi}[n-1]$ . Эта зависимость определяется по первой временной характеристике [4–6]. Вместе с тем в момент принятия решения об отправлении  $n$ -го поезда с  $j$ -й станции  $[n-1]$ -й поезд может находиться на перегоне, следовательно, величина  $T_{c(j+1)}^{\phi}[n-1]$  неизвестна.

Замена фактической длительности стоянки  $[n-1]$ -го поезда на  $(j+1)$ -й станции на графиковую при формировании управления может привести к допол-

нительным остановкам  $n$ -го поезда на перегоне по запрещающим сигналам СОБД. Последнее приводит к дополнительным энергетическим потерям, сбоем в движении поездов, т. к. остановка поезда на перегоне, как правило, приводит к невозможности реализации заданного времени хода. Кроме того, изменение режима движения по запрещающим показаниям СОБД потенциально ухудшает показатели безопасности движения поездов.

Для вычисления оценки величины фактической стоянки  $T_{c(j+1)}^{\phi}[n-1]$  необходима математическая модель стоянки, обеспечивающая требуемую точность расчета. Для таких моделей нужно знать зависимость изменения длительности стоянки от времени незанятости платформы, а также закон распределения плотности вероятности случайной составляющей задержки поезда  $F_c$  [8]. В общем случае эта информация недоступна. Проведенные измерения величин  $F_c$  для разных станций с дальнейшей их статистической обработкой показали, что стохастические модели индивидуальны для каждой станции, их числовые характеристики нестационарны. В работе [8] предложена адаптивная модель стоянки, которая с заданной погрешностью автоматически определяет в любой момент величину  $F_{c(j+1)}[n-1]$ , которая будучи суммированной с длительностью стоянки  $T_{c(j+1)}^e[n-1]$ , заданной графиком движения, позволяет получить оценку величины  $T_{c(j+1)}^{\phi}[n-1]$ .

Рассмотренный в работе [8] способ прогнозирования величины отклонения длительности стоянки от плановой удобен, т. к. прогноз не зависит от изменения длительности графиковых стоянок, которые могут быть внесены центральным постом управления в связи с изменением размеров движения.

В работе [9] приведена математическая модель экстраполяторов, работающих в реальном масштабе времени, при аппроксимации отсчетов по методу наименьших квадратов, и рассмотрены экстраполяторы, использующие многочлены Чебышева и многочлены Кравчука. Показано, что использование многочленов Кравчука дает удобную возможность управлять работой экстраполятора путем изменения «весовых» коэффициентов. Проведенный анализ работы экстраполятора, функционирующего в реальном времени, позволяет оценить влияние порядка экстраполяции, числа отсчетов случайного процесса, их статистической связи, шага временной дискретизации, времени прогноза на среднеквадратическую оценку погрешности прогноза [9].

Модель стоянки ТС ГРТС должна учитывать многообразие факторов, на которые влияет пассажиропоток (см. рис. 2).

Зарубежный опыт в создании имитационных моделей рельсовых транспортных систем для исследования пассажиропотока, несомненно, велик. В работах [10–14] приводится описание моделей транспортных систем. Современные подходы с использованием нейронных сетей и других методов искусственного интеллекта для изучения сложных областей уязвимости трафика и устойчивости транспортной системы предложены в работе [13]. На примере городов Кано и Лагос (Нигерия) авторы разработали современный метод моделирования





Рис. 2. Вид пассажиропотоков и факторы влияния

городского движения и дискретного прогнозирования заторов [13]. Вопросам разработки модели пассажирского железнодорожного транспорта посвящен исследовательский проект «Принципы прогнозирования дорожного движения с учетом других видов транспорта», реализованный в рамках польского проекта *Rozwój Innowacji Drogowych* (Развитие дорожных инноваций) [14]. Изучению непосредственно пассажиропотока как средству исследования интеллектуальных транспортных систем посвящена работа [15], в которой авторы проводят моделирование пассажиропотока транспортных систем, используя метод мультиграфов.

## 2. Задачи моделирования пассажиропотока транспортных пересадочных узлов

Появление большого числа транспортных пересадочных узлов (ТПУ) приводит к увеличению и изменению направления пассажиропотоков, использующих рельсовый транспорт.

Под ТПУ ГРТС будем понимать пассажирский комплекс, выполняющий функции перераспределения пассажиропотоков между разными видами рельсового транспорта и направлениями движения пассажиропотока. В крупных



городах ТПУ возникают для того, чтобы наилучшим образом организовать перевозочный процесс и обеспечить удобство пассажиров.

Информация о пассажиропотоке должна формироваться как на основании статистических данных о «плановом» изменении числа пассажиров в течение дня в зависимости от дня недели и времени года, так и с учетом проведения массовых мероприятий.

Моделирование чрезвычайных происшествий позволяет заранее предвидеть проблемы, возникающие при эвакуации людей, и в конечном счете спасти человеческие жизни [16]. Известны работы [17, 18], в которых реализованы модели пассажиропотока при проведении крупномасштабных культурно-массовых мероприятий.

Для создания корректной модели ТПУ следует принимать во внимание такие особенности моделируемой системы, как [19, 20]:

- неравномерность распределения нагрузки на терминалы ТПУ;
- графики прибытия поездов пригородного железнодорожного транспорта в черте города (например, Московских центральных диаметров (МЦД) и Московского центрального кольца (МЦК)), метрополитена и трамваев (залповое распределение пассажиров во времени);
- неравномерность распределения пассажиров в составе электропоездов МЦК, МЦД и метрополитена (в вагонах ближе к выходу пассажиров больше);
- процентное соотношение пассажиров, имеющих и не имеющих проездных документов;
- процентное соотношение пассажиров, приобретающих билеты в кассах и автоматах;
- учет льготных категорий граждан, покупающих билеты только в кассах при предоставлении необходимых документов (что увеличивает время обслуживания в кассах).

При разработке модели пассажиропотоков ТПУ необходимо [17]:

- выбрать подход к моделированию ТПУ по источникам формирования;
- построить модель формирования входного пассажиропотока, учитывающую характер образования составляющих и различную скорость движения пассажиров.

ТПУ – сложная система, в которой каждый пассажир или посетитель может независимо от других принимать решение о том, что необходимо сделать на следующем этапе, исходя из анализа своего собственного поведения или состояния среды (ТПУ) в целом на данном этапе [19].

Математическая схема массового обслуживания является одним из самых распространенных подходов к исследованию сложных дискретных процессов со случайными переменными методом имитационного моделирования (ИМ). Такой подход широко распространен в исследованиях перевозочного и технологических процессов обеспечения движения поездов на железнодорожном транспорте и метрополитене [21, 22].

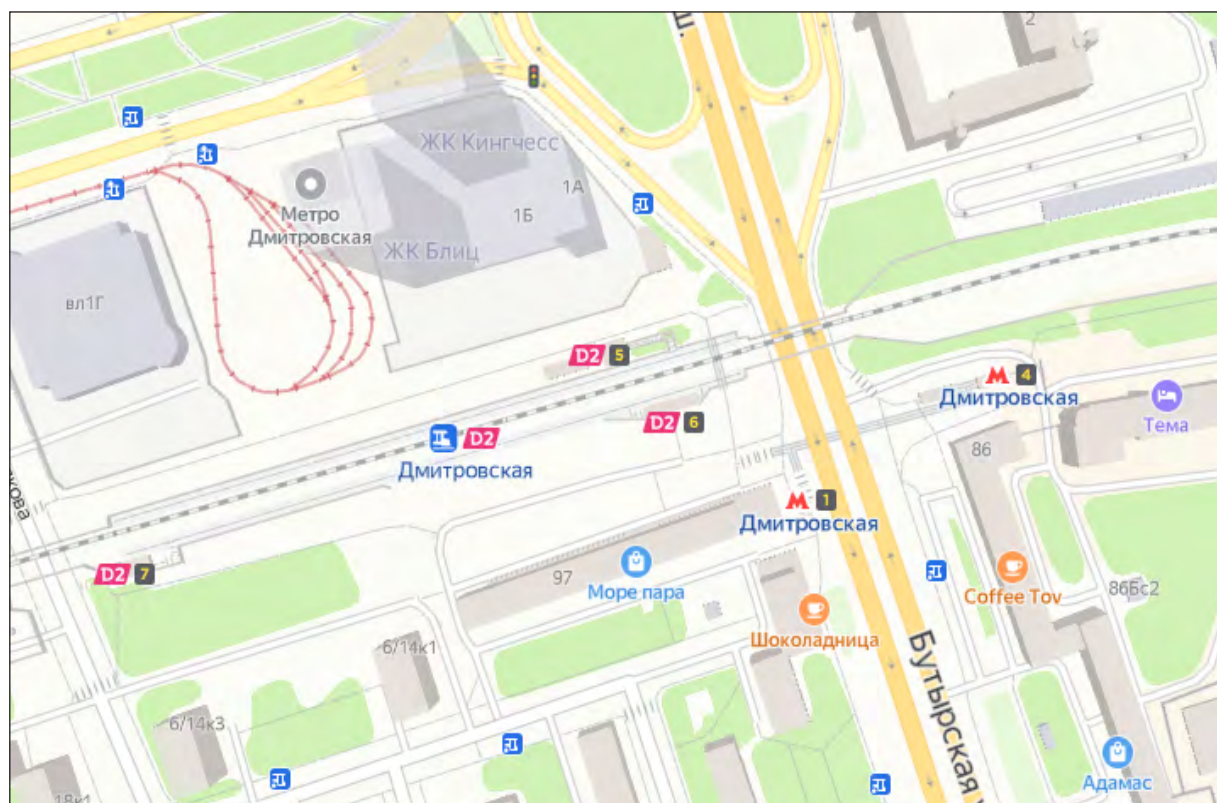
Для моделирования индивидуальных участников системы, которыми в нашем случае будут ТПУ, часто используется агентное моделирование [19, 20, 23–26]. Именно сосредоточение на индивидуальном участнике выгодно отличает агентное моделирование от абстрактного метода системной динамики и дискретно-событийного метода, ориентированного на процессы.

В агентном моделировании на первом этапе устанавливаются параметры активных объектов – агентов и определяется их поведение; на втором этапе устанавливаются связи между агентами, задается окружающая среда и запускается моделирование. Индивидуальные действия каждого из агентов образуют глобальное поведение моделируемой системы.

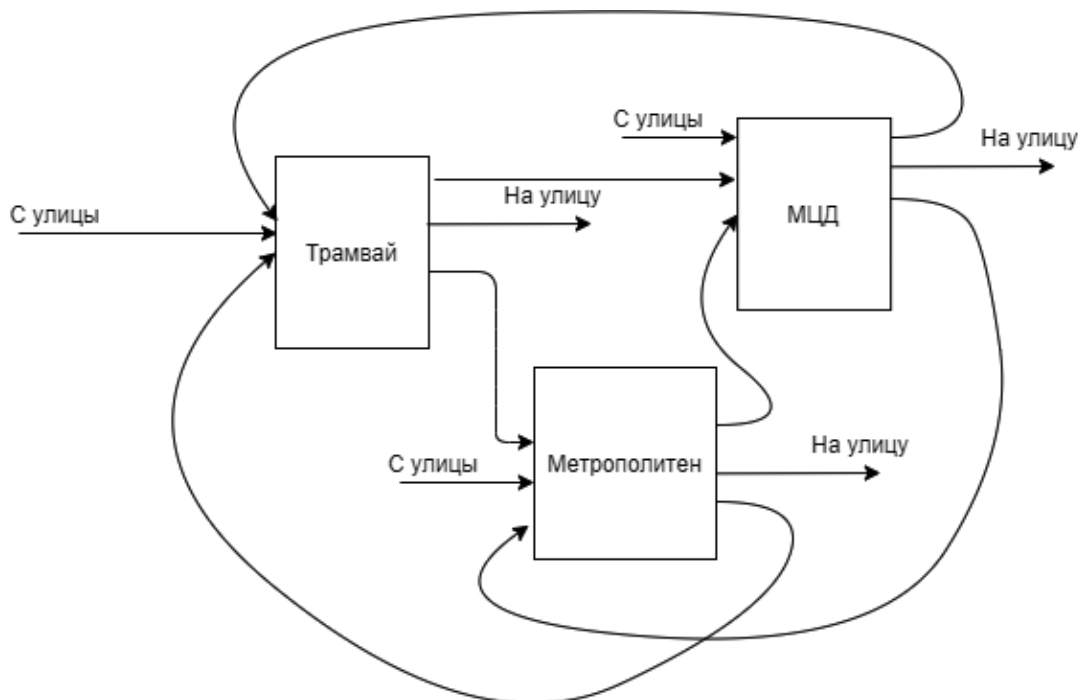
Рассмотрим в качестве примера взаимодействие пассажиропотоков ТПУ ГРТС Дмитровская, в которой присутствуют пересечение (см. рис. 3):

- пассажиропотока от трамвайной оборотной станции (ГРТС1);
- пассажиропотока станции Дмитровская, которая является не только станцией Рижского направления Московской железной дороги, но и остановочным пунктом линии МЦД-2 Московских центральных диаметров (ГРТС2);
- пассажиропотока станции «Дмитровская» Московского метрополитена (ГРТС3).

На рисунке 3 приведена схема ТПУ «Дмитровская», схематичное направление пассажиропотоков в этом ТПУ представлено на рисунке 4.



**Рис. 3.** Местоположение ТПУ «Дмитровская»



**Рис. 4.** Схематичное направление пассажиропотоков ТПУ ГРТС «Дмитровская»

### 3. Математическая модель ТПУ ГРТС

При построении математической модели ТПУ ГРТС следует учитывать, что в общем случае во взаимодействии принимают участие  $G$  элементов ГРТС, где  $G \geq 2$ . На схеме (рис. 4) можно выделить три основных типа движения пешеходных потоков:

- входной пассажиропоток ГРТС;
- выходной пассажиропоток ГРТС;
- пассажиропоток ГРТС, направляющийся на пересадку в иную ГРТС, входящую в ТПУ.

Прежде чем приступить к описанию модели, введем обозначения, представленные в таблице 1.

На рисунке 5 приведена структурная схема взаимодействия пешеходных потоков в ТПУ ГРТС для общего случая.

Построим математическую модель ТПУ. Плотность потока пассажиров, проходящих через сечение в пространстве, соответствующее выходу из  $m$ -го ГРТС, за единицу времени,  $OPP_m(t)$  определяется по формуле 5. Буквенные обозначения расшифровываются согласно таблице 1.

$$OPP_m(t) = \sum_{n=1}^{N_T} \Big|_{t_{N_T} \leq t} \sum_{g=0}^G \alpha_{mg} ITP_{mn}(t - \theta_{mn}^{TP}), \quad m = 1 \dots G, \quad (5)$$

где  $\alpha_{mg}$  – доля пассажиропотока,двигающаяся на пересадку из  $m$ -й ГРТС на  $g$ -ю ГРТС ( $m \neq g, g \neq 0$ ), на выход на улицу ( $g = 0$ ) или остающаяся внутри  $m$ -й ГРТС ( $m = g$ ):

$$\sum_{g=0}^G \alpha_{mg} = 1, m = 0 \dots G. \quad (6)$$

$N_T$  – количество рассматриваемых поездов, прибывших до момента времени  $t$ :  
 $t_{N_T} \leq t$ ;

$I\Gamma P_n$  – плотность потока на выходе из  $n$ -го ТС; она представлена в модели последовательностью прямоугольных импульсов [27] с периодом повторения, равным периоду прибытия ТС, и имеющих амплитуду, определяемую следующим выражением:

$$I\Gamma P_{mn}(t) = \begin{cases} \frac{dx_{mn}}{dt} \approx \frac{x_{mn}}{T_{mn}}, & \text{если } t_n \leq t \leq t_n + T_n \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (7)$$

**Таблица 1.** Обозначения, используемые в математической модели ТПУ ГРТС

Буквы, используемые в математической модели	Значения букв
$I$	Первая буква в обозначении пассажиропотоков на входе в ГРТС ТПУ
$O$	Первая буква в обозначении пассажиропотоков на выходе из ГРТС ТПУ
$P$	Вторая или третья буква в обозначении пассажиропотока, который направлен на пересадку из одной ГРТС ТПУ в другую или связан с движением пассажиров в (из) ГРТС
$T$	Вторая буква в обозначении пассажиропотока, который направлен из ТС на выход к платформе остановочного пункта ГРТС, или третья буква в обозначении пассажиропотока, который направлен с платформы остановочного пункта ГРТС в ТС
$\theta_{xx}$	Величина запаздывания пассажиропотока, движущегося внутри или между ГРТС, определяемыми значениями индексов
$\delta_{xx}$	Величина запаздывания, определяемая взаимодействием пассажиров, движущихся внутри или между ГРТС, определяемыми значениями индексов
$n$	Номер ТС ГРТС ТПУ
$G$	Число ГРТС ТПУ, в общем случае $G \geq 2$

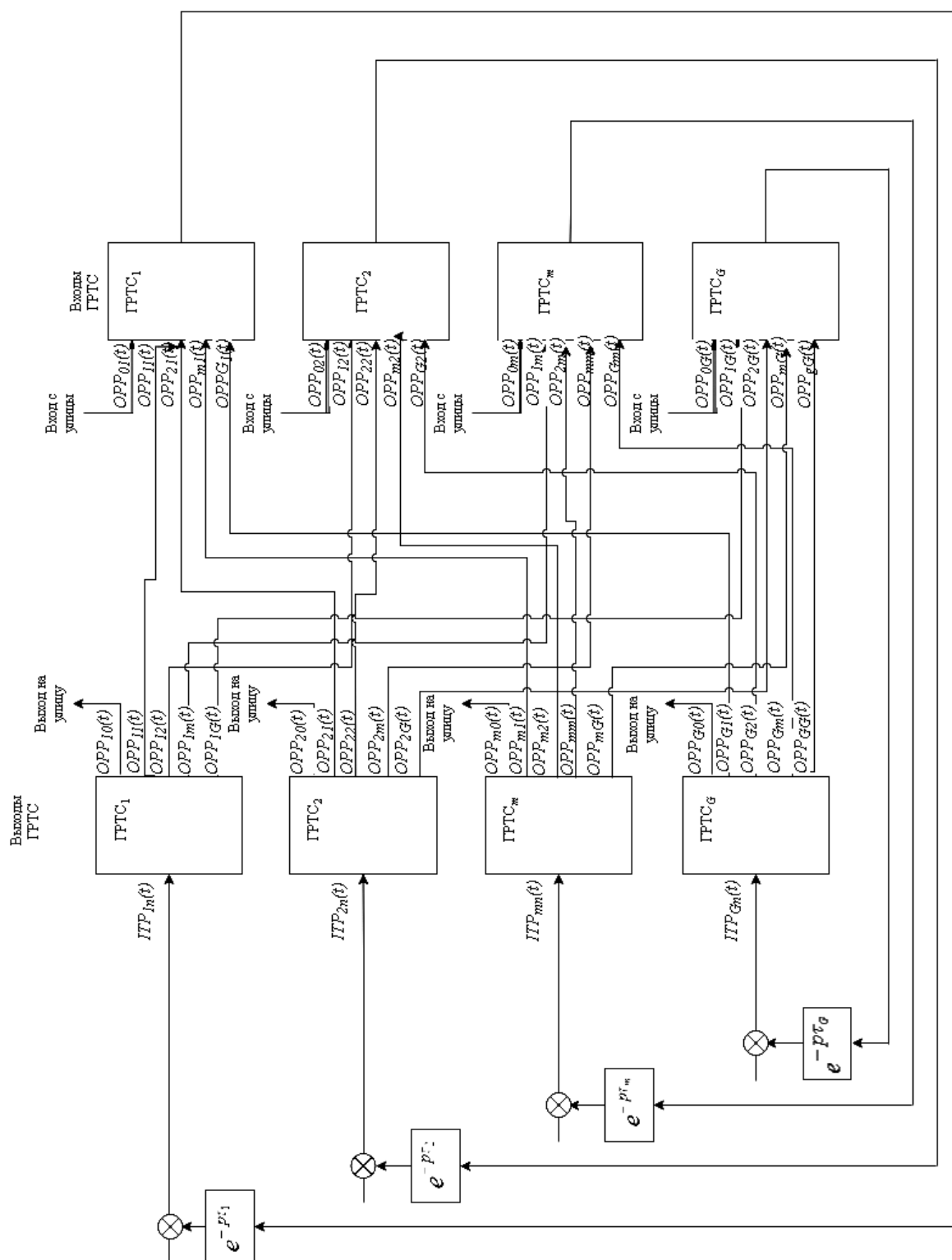


Рис. 5. Схема взаимодействия пешеходных потоков в ТПУ ГРТС для общего случая



$$\int_{t_{mn}}^{t_{mn}+T_{mn}} ITP_{mn}(t)dt = x_{mn}, \quad (8)$$

где  $x_{mn}$  – количество пассажиров, вышедших из  $n$ -го ТС;

$t_{mn}$  – время прибытия  $n$ -го ТС;

$T_{mn}$  – длительность стоянки  $n$ -го ТС.

Плотность пассажиропотока на выходе из ТС на платформу остановочного пункта ГРТС и на выходе после прохождения систем обслуживания примерно одинакова. Отличие заключается в величине запаздывания функции  $ITP_{mn}(t)$  – интервале времени  $\theta_{mn}^{TP}$ , которое затрачивается на прохождение всех элементов инфраструктуры и на потерю времени в очередях. Она имеет вид:

$$\theta_{mn}^{TP} = \sum_{i=1}^{N_{im}} (T_i + \tau_i) + \frac{S_m}{V} + \delta_{mn}^{TP}, \quad (9)$$

где  $S_m$  – сумма отрезков пути между системами обслуживания на пути к выходу  $m$ -й ГРТС;

$N_{im}$  – количество систем обслуживания внутри  $m$ -й ГРТС;

$V_g$  – скорость движения пешеходного потока;

$i$  – номер системы обслуживания внутри  $m$ -й ГРТС;

$T_i$  – интервал времени, затрачиваемый на прохождение  $i$ -й системы обслуживания;

$\tau_i$  – интервал времени, затрачиваемый на ожидание прохождения  $i$ -й системы обслуживания, является функцией величины

$$\sum_{n=0}^{N_T-1} \alpha_{mg} x_n. \quad (10)$$

Ограничения на управление являются:

– максимальная плотность потока людей, которые могут пройти через выход  $m$ -й ГРТС в момент времени  $t$ :

$$OPP_m(t) - OPP_{m\max} \leq 0, m = 1 \dots G, \quad (11)$$

где  $OPP_{m\max}$  – максимальное число людей, которые могут пройти через выход  $m$ -й ГРТС в момент времени  $t$ .

– максимальная плотность потока людей, которые могут пройти через  $i$ -ю систему обслуживания в момент времени  $t$ ,  $c_i(t)$ :

$$c_i(t) - c_{\max}[n] \leq 0, i = 1 \dots N_{im}, \quad (12)$$

где  $c_{\max}$  – максимальное число людей, которые могут пройти через  $i$ -ю систему обслуживания в момент времени  $t$ .

Плотность пешеходного потока, проходящего через сечение в пространстве за единицу времени, в  $g$ -ю ГРТС  $IPP_g(t)$  определяется по формуле 13:

$$IPP_g(t) = \sum_{m=0}^G \alpha_{mg} OPP_m(t - \theta_{mg}^{PP}), \quad g = 1 \dots G, \quad (13)$$

где  $\theta_{mg}^{PP}$  – величина запаздывания функции  $OPP_m$  (время, затрачиваемое на прохождение всех элементов инфраструктуры и ожидание в очередях, при движении из  $m$ -й ГРТС в  $g$ -ю ГРТС). Она имеет вид:

$$\theta_{mg}^{PP} = \sum_{j=1}^{N_{jmg}} (T_j + \tau_j) + \frac{S_{mg}}{V} + \delta_{mg}^{PP}, \quad (14)$$

где  $S_{mg}$  – сумма отрезков пути из  $m$ -й ГРТС в  $g$ -ю ГРТС;

$j$  – номер системы обслуживания на пути из  $m$ -й ГРТС в  $g$ -ю ГРТС;

$N_{jmg}$  – количество систем обслуживания на пути из  $m$ -й ГРТС в  $g$ -ю ГРТС.

Плотность потока людей, убывающих на ТС,  $IPT_m(t)$  определяется по формуле (15). Буквенные обозначения расшифровываются согласно таблице 1.

$$IPT_m(t) = \frac{1}{T_n} \int_0^t \sum_{m=1}^{N_m} IPP_m(t - \theta_{mn}^{PT}) dt - \sum_{n=1}^{N_T | t_{S_e} \leq t_{N_T} \leq t} u_n, \quad (15)$$

где  $u_n$  – плотность потока людей на входе в  $n$ -е ТС.

В любой момент времени должно выполняться условие отсутствия переполнения платформы остановочного пункта ГРТС:

$$\int_0^t IPP_m(t - \theta_{mn}^{PT}) dt - \sum_{n=1}^{N_T | t_s \leq t_{N_T} \leq t} u_n \leq K_{\max}, \quad (16)$$

где  $K_{\max}$  – максимальная вместимость платформы.

Разработанные математические модели позволяют решать задачи безопасного планирования и анализа функционирования объектов инфраструктуры ГРТС.

Один из принципов, на котором строятся матрицы корреспонденции ТПУ ГРТС, заключается в том, что пассажир, уехавший из пункта отправления, обязательно в него приедет. Этот факт нашел отражение на рисунке 5 в использовании элементов запаздывания ( $e^{-p\tau_m}$ ).

Общее количество передвижений из одного района в другой (независимо от того, по каким путям совершается передвижение) называется межрайонной корреспонденцией (или просто корреспонденцией). Определим для ТПУ

ГРТС понятие матрицы корреспонденций: количество передвижений пассажиропотоков из одного ГРТС в другой будем называть матрицей корреспонденции/корреспонденцией. Это могут быть различные перемещения пассажиров между любыми парами ТПУ ГРТС с разными целями. Совокупность всех корреспонденций образует матрицу корреспонденций, размерность которой равна числу ГРТС ТПУ. Матричная форма взаимозависимости входных и выходных потоков ГРТС может быть представлена в формуле 17, если пренебречь запаздываниями:

$$\begin{bmatrix} IPP_0 \\ IPP_1 \\ IPP_2 \\ \dots \\ IPP_m \\ \dots \\ IPP_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{00} & \alpha_{10} & \alpha_{20} & \dots & \alpha_{m0} & \dots & \alpha_{Gm} \\ \alpha_{01} & \alpha_{11} & \alpha_{21} & \dots & \alpha_{m1} & \dots & \alpha_{G1} \\ \alpha_{02} & \alpha_{12} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2m} & \dots & \alpha_{Gm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{0m} & \alpha_{1m} & \alpha_{2m} & \dots & \alpha_{mm} & \dots & \alpha_{Gm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{0G} & \alpha_{1G} & \alpha_{2G} & \dots & \alpha_{mG} & \dots & \alpha_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} OPP_0 \\ OPP_1 \\ OPP_2 \\ \dots \\ OPP_m \\ \dots \\ OPP_G \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Входной информацией к модели расчета матрицы корреспонденций являются общие объемы прибытия и отправления в каждом ТПУ ГРТС. Проблема оценки объема прибытий и отправок пассажиропотоков разных групп связана с пространственным размещением объектов посещения и подвижностью населения, т. е. средним количеством поездок, совершаемых с теми или иными целями. Эта оценка строится на основе имеющихся демографических и социально-экономических данных, а также результатов обследований. Расчет матриц корреспонденций осуществляется с применением гравитационных или энтропийных моделей, обследованием классическими методами с помощью натуральных экспериментов (талонные, анкетирование и т. п.) и автоматизированными методами [26–31]. Так, например, работа [24] посвящена вопросам оценки и восстановления матрицы корреспонденций в загруженных транспортных сетях, выявлены наиболее эффективные методы оптимального расположения датчиков регистрации номерных знаков ТС на сети для получения максимального объема информации, необходимой при восстановлении матрицы корреспонденций.

#### 4. Системы технического зрения как новые источники информации для заполнения матрицы корреспонденции

В настоящее время в России широко внедряются различные системы мониторинга пассажиропотока и распознавания лиц. Полученные подобными

системами данные могут быть использованы и для построения матриц корреспонденций внутри ТПУ.

За последнее десятилетие доля использования компьютерного/машинного/технического зрения при организации движения городского транспорта и при управлении транспортной безопасностью, например с целью пресечения правонарушений граждан, многократно возросла. Системы машинного зрения в современном комплексе управления локомотивом или электропоездом используются как [32–35]:

– система помощи машинисту, которая подсказывает показания светофора по ходу движения и определяет наличие препятствий;

– управляющая система, которая определяет препятствия, запрещающие показания светофора, и формирует команды на изменение скорости или торможение. Применение современных устройств компьютерного мониторинга на тяговом подвижном составе позволит осуществлять идентификацию объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта во время движения поезда [36].

Обобщенный функционал систем технического зрения применительно к ГРТС представлен на рисунке 6.

Система технического зрения также может использоваться для отслеживания направления взгляда и скорости реакции сотрудника в течение всего рабочего



Рис. 6. Применение систем технического зрения

дня. Благодаря набору данных о скорости движения глаз система рассчитывает рациональное время работы для каждого машиниста и рекомендует — завершать или продолжать его смену. Потенциальное направление в расширении функционала подобных программ — контроль прохода пассажиров на территорию метрополитена с возможностью взимания платы за проезд по результатам распознавания лица, идентификация преступников, находящихся в розыске, диагностика состояния здоровья человека для оказания оперативной медицинской помощи. В рамках ИСУ ГРТС системы технического зрения позволят определять загруженность остановочных пунктов и рассчитывать эффективное время для проследования ТС участка между двумя остановочными пунктами. Системы технического зрения также следует рассматривать в качестве новейшего способа получения данных о пассажиропотоке, как следствие — для формирования матрицы корреспонденций.

### **Заключение**

В работе исследован отечественный и зарубежный опыт в области моделирования, анализа и прогнозирования пассажиропотоков транспортных систем, определено место модели пассажиропотока в структуре ИСУ ГРТС. Показано, что модель стоянки ТС ГРТС должна учитывать всё многообразие факторов, на которые влияет пассажиропоток.

В работе предложена структура модели пассажиропотока ТПУ ГРТС для исследования качества функционирования ИСУ ГРТС; построена математическая модель ТПУ ГРТС; представлена матричная форма взаимозависимости входных и выходных потоков ГРТС.

Входной информацией модели расчета матрицы корреспонденций являются объемы прибытия и отправления пассажиров в каждом ТПУ ГРТС. Проблема оценки объема прибытий и отправок пассажиров разных групп связана с пространственным размещением объектов посещения и подвижностью населения. В качестве способа получения данных о пассажиропотоке и формирования матрицы корреспонденций предложено использовать системы технического зрения. Представлен обобщенный функционал систем технического зрения применительно к ГРТС.

Следующий этап работы — построение имитационных моделей ТПУ на основе разработанных математических выражений с использованием технологий агентного моделирования.

### **Благодарности**

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



**Библиографический список**

1. *Баранов Л. А.* Интеллектуальное централизованное управление движением внеуличного городского железнодорожного транспорта в условиях интенсивного движения / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, Е. П. Балакина, Л. Н. Логинова // *Надежность*. – 2021. – Т. 21. № 2. – С. 17–23. DOI 10.21683/1729-2646-2021-21-2-17-23.
2. *Баранов Л. А.* Энергооптимальное управление движением транспортных средств / Л. А. Баранов, Н. А. Кузнецов, В. М. Максимов // *Электротехника*. – 2016. – № 9. – С. 12–18.
3. *Межох А. К.* Модель стоянки поезда в системе автоматического управления движением поездов метрополитена / А. К. Межох // *Тр. МИИТа*. – 1978. – Вып. 619. – С. 25–28.
4. *Баранов Л. А.* Алгоритмы управления движением поездов метрополитена с помощью управляющего вычислительного комплекса / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, А. К. Межох // *Тр. МИИТ*. – 1978. – Вып. 612. – С. 40–46.
5. *Баранов Л. А.* Потенциальная оценка пропускной способности железнодорожных линий по системам безопасности. Сборник докладов 7-й международной научно-технической конференции ЮЖЕЛ – 2000 / Л. А. Баранов. – Югославия, 2000. – С. 43–48.
6. *Баранов Л. А.* Интервальные и временные характеристики перегонов линии метрополитена / Л. А. Баранов, Е. П. Балакина, Л. Н. Воробьева // *Безопасность движения поездов: Труды VII научно-практической конференции*. – М.: МИИТ, 2006. – С. VII-2–VII-3.
7. *Баранов Л. А.* Алгоритмы для поездов метрополитена / Л. А. Баранов, Е. П. Балакина, Л. Н. Воробьева // *Мир транспорта*. – 2007. – Т. 5. № 2 (18). – С. 104–113.
8. *Баранов Л. А.* Адаптивная модель длительности стоянки поезда метрополитена для формирования ограничений на управление / Л. А. Баранов, П. Воробьев // *Труды XI-й международной научно-практической конференции «Безопасность движения поездов»*, 21–22 октября 2010 г., МИИТ.
9. *Баранов Л. А.* Прогнозирование случайных процессов на базе многочленов, ортогональных на множестве равноотстоящих точек / Л. А. Баранов, Е. П. Балакина // *Электротехника*. – 2020. – № 9. – С. 39–46.
10. *Dras M., Kavakli M., Richards D., Barles J., Tychsen A.* An Overview of Training Simulation Research and Systems. In Richards D, Johnson L, Sklar E, Wilensky U, editors, *Proceedings of Fourth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi Agent Systems, Workshop1 Agent-Based Systems for Human Learning (ABSHL) 2005*. The Netherlands: University Utrecht. 2005. pp. 3–10.
11. *Balsys K., Valinevicius A., Eidukas D.* Imitation Model of Traffic Flows//*Electronics and Electrical Engineering*. – Kaunas: Technologija, 2011. – No. 6 (112). – P. 65–68. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/267793827\\_Imitation\\_Model\\_of\\_Traffic\\_Flows](https://www.researchgate.net/publication/267793827_Imitation_Model_of_Traffic_Flows) [accessed Jul 11 2021].
12. *Silver D., Bagnell J. A., Stentz A.* High Performance Outdoor Navigation from Overhead Data using Imitation Learning. *Robotics: Science and Systems 2008 Zurich, CH, June 25–28, 2008*. Available from: <http://www.roboticsproceedings.org/rss04/p34.pdf> [accessed Jul 11 2021].
13. *Otuoze S. H.; Hunt D. V.L., Jefferson I.* Neural Network Approach to Modelling Transport System Resilience for Major Cities: Case Study Lagos and Kano (Nigeria). *Sustainability* 2021, 13, 1371. <https://doi.org/10.3390/su13031371> (PDF) Neural Network Approach to Modelling Transport System Resilience for Major Cities: Case Studies of Lagos and Kano (Nigeria). Available from: [https://www.researchgate.net/publication/348862589\\_Neural\\_Network\\_Approach\\_to\\_Modelling\\_Transport\\_System\\_Resilience\\_for\\_Major\\_Cities\\_Case\\_Studies\\_of\\_Lagos\\_and\\_Kano\\_Nigeria](https://www.researchgate.net/publication/348862589_Neural_Network_Approach_to_Modelling_Transport_System_Resilience_for_Major_Cities_Case_Studies_of_Lagos_and_Kano_Nigeria) [accessed May 01 2021].

14. *Brzeziński A., Dybicz T., Waltz A.* Railway passenger traffic model. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 17 (4), 5–17. DOI: 10.22630/ASPA.2018.17.4.36 (PDF) Railway passenger traffic model. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/330389767\\_Railway\\_passenger\\_traffic\\_model](https://www.researchgate.net/publication/330389767_Railway_passenger_traffic_model) [accessed Jul 11 2021].
15. *Navin A., Nima Jafari Navimipour, Mirnia M.* “Using Labeled Hyper Multi Digraph for Tabriz Traffic Modeling: Data-Oriented Approach”, *Journal of Applied Science*, vol. 9, no. 15, pp. 2808–2814, 2009, ISSN 1812–5654.
16. *Carrothers G. A. P.* An historical review of the gravity and potential concepts of human interaction // *Journal of the American Institute of Planners*. – 1956. – V. 22. – P. 94–102.
17. *Искаков Т. А.* Имитационное моделирование функционирования транспортного узла / Т. А. Искаков // Труды пятой научно-технической конференции с международным участием ИСУЖТ. – 2016. – С. 221–225.
18. *Арсланов М. А.* Математическая модель организации перевозок пассажиров в остановочно-пересадочных пунктах при многократном изменении пассажиропотоков / М. А. Арсланов, Ш. М. Минатуллаев, А. А. Филиппов // Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ». – 2018. – № 15 (3). – С. 362–371. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-3-362-371>.
19. *Евреенова Н. Ю.* Моделирование функционирования транспортно-пересадочного узла / Н. Ю. Евреенова // Мир транспорта. – 2014. – Т. 12. – № 5 (54). – С. 170–176.
20. *Пивень О. И.* Имитационная модель для выбора оптимальных параметров функционирования транспортно-пересадочных узлов / О. И. Пивень // Молодежный научный вестник. – 2018. – № 8 (33). – С. 53–57.
21. *Василенко М. Н.* Имитационная модель обслуживания пассажиропотоков на метрополитене / М. Н. Василенко, Д. С. Марков, В. Б. Соколов и др. // Конструирование, сертификация и техническая эксплуатация устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики: сб. науч. тр. – СПб.: ПГУПС, 2003. – С. 17–25.
22. *Марков Д. С.* Метод формализации имитационных моделей технологических процессов в хозяйстве автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте / Д. С. Марков, А. А. Лыков // Изв. ПГУПС. – 2012. – Вып. 1. – С. 23–28.
23. *Кузнецов Н. А.* Методы анализа и синтеза модульных информационно-управляющих систем: монография / Н. А. Кузнецов, В. В. Кульба, С. С. Ковалевский, С. А. Косяченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 800 с.
24. *Морозов А. С.* Построение матрицы пассажирских корреспонденций по данным о валидациях билетов и навигационным отметкам / А. С. Морозов, А. А. Черников // Транспортное планирование и моделирование. Цифровое будущее управления транспортом: Сборник трудов III Международной научно-практической конференции, Москва, 24–25 мая 2018 года / Под редакцией С. В. Жанказиева. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2018. – С. 96–108.
25. *Раевская А. П.* Методы оценки матрицы корреспонденций в загруженных транспортных сетях / А. П. Раевская, А. Ю. Крылатов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2016. – № 1 (236). – С. 31–40. DOI 10.5862/JCSTCS.236.4.
26. *Копылова Е. В.* Алгоритм назначения остановок поездов Дальнего следования в пригородных зонах крупных железнодорожных узлов / Е. В. Копылова, О. Н. Мадяр // Транспортное дело России. – 2018. – № 2. – С. 114–117.
27. *Искаков Т. А.* Математическая модель взаимодействия клиентских групп пешеходов внутри транспортного узла / Т. А. Искаков, В. Г. Сидоренко // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 6. – С. 32–35.

28. *Копылова Е. В.* Адаптация метода организации пассажиропотоков для крупных агломераций / Е. В. Копылова // Наука и техника транспорта. – 2021. – № 2. – С. 81–86.
29. *Марков Д. С.* Методика получения динамической матрицы корреспонденций пассажиропотоков на метрополитене / Д. С. Марков // Сб. тезисов 62-й научно-технической конференции с участием студентов, молодых специалистов и ученых, ПГУПС. – 2002.
30. *Мадяр О. Н.* Моделирование спроса на транспортное обслуживание в пригородной зоне тяготения пассажиропотоков для пассажирских поездов дальнего следования / О. Н. Мадяр // Научные тенденции: Вопросы точных и технических наук сборник научных трудов по материалам X международной научной конференции. Международная Научно-Исследовательская Федерации «Общественная наука». Санкт-Петербург. – 2017. – С. 48–50.
31. *Мадяр О. Н.* Методология комплексного анализа пассажиропотока при назначении остановок поездам дальнего следования в их пригородной зоне / О. Н. Мадяр // Всероссийская научно-практической конференции «Неделя науки–2017». В 2 ч. Ч. 2. – М.: РУТ, 2017. – Т. X. – 60 с. – № IV66-IV67.
32. Машина всё видит и понимает [Режим доступа: <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1541901>] (дата обращения: 01.06.2021).
33. Техническое зрение: новые форматы взаимодействия [Режим доступа: <http://www.vniias.ru/press-centre/325-tekhnicheskoe-zrenie-novye-formaty-tsifrovogo-vzaimodejstviya>] (дата обращения: 01.06.2021).
34. *Охотников А. Л.* Беспилотное управление локомотивом: вчера, сегодня и завтра / А. Л. Охотников, П. А. Попов // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 8. – С. 12–17. DOI: 10.34649/AT.2019.8.8.002.
35. *Попов П. А.* Поезд без машиниста – российские перспективы / П. А. Попов, А. Л. Охотников // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 8. – С. 4–6. DOI: 10.34649/AT.2019.8.8.001.
36. *Фоменко В. К.* Применение технологии «Машинное зрение» на тяговом подвижном составе / В. К. Фоменко, В. А. Минаков // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 11. – С. 21–23.

**Leonid A. Baranov,**  
**Valentina G. Sidorenko,**  
**Ludmila N. Loginova**

*Department of Control and Information Security  
Russian University of Transport, Moscow*

### **Passenger flows modeling approaches within the framework of the functioning of the Intelligent control system of urban rail transportation systems**

The emergence of a large number of transport interchange hubs, changes in megalopolis transport system's configuration leads to increasing number of passengers and changing in passenger flows using rail transport, which affects its functioning and requires consideration when creating and organizing

the operation of an intelligent control system for urban rail transport systems. The analysis of the experience in the passenger flows study will make it possible to create new algorithms for forecasting passenger traffic using modern technologies of agent-based modelling and technical vision. The article discusses a parking vehicles model, which allows to consider the factors affecting the duration of parking: passenger traffic, platform unoccupied time, the number of passengers carried, the number of wagons in the train. The article develops structural and mathematical models of passenger flows of a transport interchange hub, designed to study the dynamics of an intelligent control system for urban rail transport systems. As an example, when constructing a mathematical model, the interaction of passenger flows within the Dmitrovskaya transport-interchange hub was considered, in which there is an intersection of passenger flows of three urban rail transport systems: a tramway station, Dmitrovskaya station, which is a station of the Riga direction of Moscow railway and a stopping point of the MCD-2 line of the Moscow Central Diameters, the Dmitrovskaya station of the Moscow Metro.

Intelligent system, management of transport systems, rail transport, modeling, parking model, passenger traffic, transport hub, correspondence matrix, agent-based modeling, technical vision

**Acknowledgments.** The reported study was funded by RFBR, Sirius University of Science and Technology, JSC Russian Railways and Educational Fund "Talent and success", project number 20-37-51001.

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-539-564

## References

1. Baranov L. A., Sidorenko V. G., Balakina E. P., Loginova L. N. (2021) Intellektual'noye tsentralizovannoye upravleniye dvizheniyem vneulichnogo gorodskogo zhelezнодорожного транспорта в условиях интенсивного движения [Intelligent centralized traffic management of a rapid transit system under heavy traffic]. *Nadezhnost' [Dependability]*, vol. 21, no. 2, pp. 17–23. Available at: <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-2-17-23> (In Russian)
2. Baranov L. A., Maksimov V. M., Kuznetsov N. A. (2016) Energooptimal'noye upravleniye dvizheniyem transportnykh sredstv [Energy-optimal control of vehicle traffic]. *Elektrotehnika [Electrical Engineering]*, vol. 87, no. 9, pp. 498–504. (In Russian)
3. Mezhokh A. K. (1978) Model' stoyanki poyezda v sisteme avtomaticheskogo upravleniya dvizheniyem poyezdov metropolitena [The time-varying parameters of the dwell time in the system of automatic control of metro trains]. *The proceedings of The Russian University of Transport (RUT (MIIT))*, iss. 619, pp. 25–28. (In Russian)
4. Baranov L. A., Erofeev E. V., Mezhokh A. K. (1978) Algoritmy upravleniya dvizheniyem poyezdov metropolitena s pomoshch'yu upravlyayushchego vychislitel'nogo kompleksa [The motion control algorithms of metro trains with the help of the computer controlled information complex]. *The proceedings of The Russian University of Transport (RUT (MIIT))*, iss. 612, pp. 40–46. (In Russian)
5. Baranov L. A. (2000) Potentsial'naya otsenka propusknoy sposobnosti zhelezнодорожных линий по системам безопасности [Potential estimation of traffic capacity according to the automatic train control system]. *Sbornik докладов 7-й международно-научно-технической конференции YUZHEL–2000 [Proceedings of the 7th international scientific and technical conference YUZHEL–2000]*, Yugoslavia, pp. 43–48.
6. Baranov L. A., Balakina E. P., Vorobyeva L. N. (2006) Interval'nyye i vremennyye kharakteristiki peregonov linii metropolitena [Interval and time characteristics of metro running lines]. *Bezopasnost' dvizheniya poyezdov. Trudy VII nauchno-prakticheskoy konferentsii [Railway traffic safety. Proceedings of the VII<sup>th</sup> scientific-practical conference]*. Moscow, The Russian University of Transport (RUT (MIIT)) Publ., pp. VII-2–VII-3.



7. Baranov L. A., Balakina E. P., Vorobyeva L. N. (2007) Algoritmy dlya poyezdov metropolitena [Algorithms for Metro Trains]. *Mir transporta [World of Transport and Transportation Journal]*, no. 2, pp. 104–113. (In Russian)
8. Baranov L. A., Vorobyev P. I. (2010) Adaptivnaia model' dlitel'nosti stoianki poezda [Adaptive Train Duration Model]. *Proceedings of the interregional scientific-practical conference with international participation. Habarovsk*, vol. 2, pp. 9–10. (In Russian)
9. Baranov L. A., Balakina E. P. (2020) Prognozirovaniye sluchaynykh protsessov na baze mnogo-chlenov, ortogonal'nykh na mnozhestve ravnootstoyashchikh toчек [The random processes prediction based on orthogonal polynomials on the set of equally spaced points]. *Elektrotehnika [Electrical Engineering]*, no. 9, pp. 39–46. (In Russian)
10. Dras M., Kavakli M., Richards D., Barles J., Tychsen A. (2005) An Overview of Training Simulation Research and Systems. *Proceedings of Fourth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi Agent Systems, Workshop1 Agent-Based Systems for Human Learning (ABSHL)*. The Netherlands, University Utrecht, pp. 3–10.
11. Balsys K., Valinevicius A., Eidukas D. (2011) Imitation Model of Traffic Flows. *Electronics and Electrical Engineering*. Kaunas: Technologija, no. 6 (112), pp. 65–68. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/267793827\\_Imitation\\_Model\\_of\\_Traffic\\_Flows](https://www.researchgate.net/publication/267793827_Imitation_Model_of_Traffic_Flows) (accessed July 11, 2021).
12. Silver D., Bagnell J. A., Stentz A. (2008) High Performance Outdoor Navigation from Overhead Data using Imitation Learning. *Robotics: Science and Systems 2008 Zurich*, CH, June 25–28, 2008. Available at: <http://www.roboticsproceedings.org/rss04/p34.pdf> (accessed: July 11, 2021).
13. Otuoze S. H.; Hunt D. V. L., Jefferson I. (2021) Neural Network Approach to Modelling Transport System Resilience for Major Cities: Case Study Lagos and Kano (Nigeria). *Sustainability*, 13, p. 1371. <https://doi.org/10.3390/su13031371> (PDF) Neural Network Approach to Modelling Transport System Resilience for Major Cities: Case Studies of Lagos and Kano (Nigeria). Available at: [https://www.researchgate.net/publication/348862589\\_Neural\\_Network\\_Approach\\_to\\_Modelling\\_Transport\\_System\\_Resilience\\_for\\_Major\\_Cities\\_Case\\_Studies\\_of\\_Lagos\\_and\\_Kano\\_Nigeria](https://www.researchgate.net/publication/348862589_Neural_Network_Approach_to_Modelling_Transport_System_Resilience_for_Major_Cities_Case_Studies_of_Lagos_and_Kano_Nigeria) (accessed: May 01, 2021).
14. Brzeziński A., Dybicz T., Waltz A. (2021) Railway passenger traffic model. *Acta Sci. Pol. Architectura*, 17 (4), pp. 5–17. DOI: 10.22630/ASPA.2018.17.4.36 (PDF) Railway passenger traffic model. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/330389767\\_Railway\\_passenger\\_traffic\\_model](https://www.researchgate.net/publication/330389767_Railway_passenger_traffic_model) (accessed: July 11, 2021).
15. Navin A., Nima Jafari Navimipour, Mirnia M. (2009) Using Labeled Hyper Multi Digraph for Tabriz Traffic Modeling: Data-Oriented Approach. *Journal of Applied Science*, vol. 9, no. 15, pp. 2808–2814. ISSN 1812-5654.
16. Carrothers G. A. P. (1956) An historical review of the gravity and potential concepts of human interaction. *Journal of the American Institute of Planners*, vol. 22, pp. 94–102.
17. Iskakov T. A. Simulation modeling of functioning of the transport node [Imitatsionnoe modelirovaniye funktsionirovaniya transportnogo uzla]. *Trudy pyatoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem intellektualnye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte kompyuternoe i matematicheskoe modelirovaniye ISUZHT [Proceedings of the fifth scientific and technical conference with international participation «Intelligent control systems for railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZHT)»]*, pp. 221–225. (In Russian)
18. Arslanov M. A., Minatullaev S. M., Filippov A. A. (2018) Matematicheskaya model' organizatsii perevozok passazhirov v ostanovochno-peresadochnykh punktakh pri mnogokratnom izmene-nii passazhiropotokov [Mathematical model of the organization of passengers' transporta-



- tion in stopping-trans-relocation points with a multiple change of passenger traffic]. *Nauchnyy retsenziruyemyy zhurnal "Vestnik SibADI" [The Russian Automobile and Highway Industry Journal]*, no.15 (3), pp. 362–371. (In Russian) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-3-362-371>.
19. Evreenova N. Yu. (2014) Modelirovaniye funktsionirovaniya transportno-peresadochnogo uzla [Simulation of transport interchange hub operation]. *Mir transporta [World of Transport and Transportation Journal]*, vol. 12, no. 5 (54), pp. 170–176. (In Russian)
  20. Piven O. I. (2018) Imitatsionnaya model' dlya vybora optimal'nykh parametrov funktsionirovaniya transportno-peresadochnykh uzlov [Imitating model for the choice of optimum parameters of functioning of transport hubs]. *Molodezhnyy nauchnyy vestnik [Youth Scientific Bulletin]*, no. 8 (33), pp. 53–57. (In Russian)
  21. Vasilenko M. N., Markov D. S., Sokolov V. B., Sorokin K. G. (2003) Imitatsionnaya model' obsluzhivaniya passazhiropotokov na metropolitene [Simulation model of passenger handling for subway]. *Konstruirovaniye, sertifikatsiya i tekhnicheskaya ekspluatatsiya ustroystv i sistem zh. d. avtomatiki i telemekhaniki: sbornik nauchnykh trudov PGUPS [Engineering, certification and technical operation of railway automation and remote control devices and systems, collection of scientific papers of PTSU]*, St. Petersburg, pp. 17–25. (In Russian)
  22. Markov D. S., Lykov A. A. (2012) Metod formalizatsii imitatsionnykh modeley tekhnologicheskikh protsessov v khozyaystve avtomatiki i telemekhaniki na zheleznodorozhnom transporte [Method for formalization of simulation models of technological processes within railway transport automation and remote control facilities]. *Izvestiya PGUPS [Proceedings of PSTU]*, iss. 1, pp. 23–28. (In Russian)
  23. Kuznetsov N. A., Kulba V. V., Kovalevskiy S. S., Kosyachenko S. A. (2002) *Metody analiza i sinteza modul'nykh informatsionno-upravlyayushchikh system [Methods for analysis and synthesis of modular information management systems]*. Moscow, Fizmatlit Publ., 800 p. (In Russian)
  24. Morozov A. S., Chernikov A. A. (2018) Postroyeniye matritsy passazhirskikh korrespondentsiy po dannym o validatsiyakh biletov i navigatsionnym otmetkam [City transit origin-destination estimation using automated fare collection and vehicle location systems]. *Transportnoye planirovaniye i modelirovaniye. Tsifrovoye budushcheye upravleniya transportom: Sbornik trudov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 24–25 maya 2018 goda [Transport planning and modeling. The digital future of transport management: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference, Moscow, May 24–25, 2018.]*. Ed. by S. V. Zhankaziev. Moscow, Moscow automobile and road construction state technical university Publ., pp. 96–108. (In Russian)
  25. Krylatov A. Yu., Rayevskaya A. P. (2016) Metody otsenki matritsy korrespondentsiy v zagruzhennykh transportnykh setyakh [OD-matrix estimation for urban traffic area control]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye. [Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University scientific and technical reports. Computing, Telecommunications and Control]*, no. 1 (236), pp. 31–40. DOI 10.5862/JCSTCS.236.4. (In Russian)
  26. Kopylova E. V., Madyar O. N. (2018) Algoritm naznacheniya ostanovok poyezdov Dal'nego sledovaniya v prigorodnykh zonakh krupnykh zheleznodorozhnykh uzlov [Algorithm of destination of traffic stations in the suburban areas of large railroad nodes]. *Transportnoye delo Rossii [Transport business of Russia]*, no. 2, pp. 114–117. (In Russian)
  27. Iskakov T. A., Sidorenko V. G. (2016) Matematicheskaya model vzaimodeystviya klientskikh grupp peshekhodov vnutri transportnogo uzla [Mathematical model of interaction of client groups of pedestrians within the transport hub]. *Elektronika i elektrooborudovanie trans-*

- porta* [Electronics and electrical equipment of the transport], no. 6, pp. 32–35. (In Russian)
28. Kopylova E. V. (2021) Adaptatsiya metoda organizatsii passazhiropotokov dlya krupnykh aglomeratsiy [Adaptation of passenger flow organization method for large agglomerations]. *Nauka i tekhnika transporta*. [Science and Technology in Transport], no. 2, pp. 81–86. (In Russian)
  29. Sokolov V.A., Sokolov V.B., Maksimenko O. Yu. (2002) Metodika polucheniya dinamicheskoy matritsy korrespondentsiy passazhiropotokov na metropolitene [The method for the dynamical matrix calculating of the mobility plan of the passenger traffic flow]. *Sbornik tezisov 62-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s uchastiyem studentov, molodykh spetsialistov i uchennykh, PGUPS* [Collection of abstracts of the 62<sup>nd</sup> scientific and technical conference with the participation of students, young specialists and scientists]. Saint Petersburg, Petersburg University of Railways Publ. (In Russian)
  30. Madyar O. N. (2017) Modelirovanie sprosa na transportnoe obsluzhivanie v prigorodnoy zone tyagoteniya passazhiropotokov dlya passazhirskih poezdov dal'nego sledovaniya [Demand evaluation for transport services in the suburban gravity zones of the passenger traffic flow for long-distance slow passenger trains]. *Nauchnye tendentsii: Voprosy tochnykh i tekhnicheskikh nauk sbornik nauchnykh trudov po materialam X mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Mezhdunarodnaya Nauchno-Issledovatel'skaya Federatsiya «Obshchestvennaya nauka»* [Scientific trends: Questions of exact and technical sciences. collection of scientific papers based on the materials of the X international scientific conference. International Research Federation “Social Science”], pp. 48–50. (In Russian)
  31. Madyar O. N. (2017) Metodologiya kompleksnogo analiza passazhiropotoka pri naznachenii ostanovok poyezdov dal'nego sledovaniya v ikh prigorodnoy zone [Complex analysis methodology of the passenger traffic flow when choosing stopping patterns at stations for long-distance slow passenger trains in the suburban zone, v 2 chastyakh, chast' 2]. *Vserossiyskaya nauchno-prakticheskoy konferentsiya «Nedelya nauki–2017»* [All-Russian scientific and practical conference “Week of Science–2017”, in 2 parts, part 2]. Moscow, The Russian University of Transport (RUT (MIIT)) Publ., vol. X, p. 60, no. IV66–IV67. (In Russian)
  32. *Mashina vso vidit i ponimayet* [The machine sees and understands everything]. <https://gudok.ru/newspaper/?ID=1541901> (accessed: June 01, 2021). (In Russian)
  33. *Tekhnicheskoye zreniye: novyye formaty vzaimodeystviya* [Synthetic vision: new interaction modes]. <http://www.vniias.ru/press-centre/325-tekhnicheskoe-zrenie-novye-formaty-tsifrovogo-vzaimodeystviya> (accessed: June 01, 2021). (In Russian)
  34. Okhotnikov A. L., Popov P. A. (2019) Bepilotnoye upravleniye lokomotivom: vchera, segodnya i zavtra [Self-driving: yesterday, today and tomorrow]. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, communication, informatics], no. 8, pp. 12–17. (In Russian) DOI: 10.34649/AT.2019.8.8.002.
  35. Okhotnikov A. L., Popov P. A. (2019) Poyezd bez mashinista – rossiyskiye perspektivy [Autonomous train – the Russian perspective]. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, communication, informatics], no. 8, pp. 4–6. (In Russian)
  36. Fomenko V.K., Minakov V.A. Primeneniye tekhnologii “Mashinnoye zreniye” na tyagovom podvizhnom sostave [Application of technology of “machine vision” on railway transport]. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, communication, informatics], no. 11, pp. 21–23. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии  
доцентом Д. В. Ефановым  
Поступила в редакцию 05.07.2021, принята к публикации 26.07.2021*

*БАРАНОВ Леонид Аврамович* — доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта  
baranov.miit@gmail.com

*СИДОРЕНКО Валентина Геннадьевна* — доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта  
valenfalk@mail.ru

*ЛОГИНОВА Людмила Николаевна* — кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта  
ludmilanv@mail.ru

© Баранов Л. А., Сидоренко В. Г., Логинова Л. Н., 2021

УДК 656.1/5

**А. В. Баните**

**Д. С. Деряга**

*Высшая школа транспорта*

*Института машиностроения, материалов и транспорта,*

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

**О. В. Леоненко, канд. техн. наук**

*Кафедра «Транспортные и технологические машины»,*

*Белорусско-Российский университет*

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГОРОДСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ**

Статья посвящена перспективам повышения качества движения в узле городской улично-дорожной сети посредством внедрения интеллектуальных транспортных систем, в особенности автоматических систем управления дорожным движением (АСУДД). Проанализированы проблемы внедрения интеллектуальных транспортных систем в городских условиях с учетом действующей нормативной базы. Приведена классификация локальных АСУДД по возможностям адаптации светофорного регулирования к изменяющимся параметрам транспортных потоков. Для решения задачи целесообразности внедрения АСУДД предлагается методика, включающая в себя построение имитационных моделей для более точного прогнозирования эффекта от внедрения локальной АСУДД на рассматриваемом участке городской улично-дорожной сети. Применение методики продемонстрировано на примере пересечения проспекта Энгельса и Суздальского проспекта в Санкт-Петербурге. Проанализированы два варианта организации управления фазами светофорных объектов – статичного и адаптированного по времени суток. Оценено влияние внедрения АСУДД на среднюю скорость транспортных средств и характеристики заторов в рассматриваемом узле на основе имитационного моделирования в PTV Vissim. В соответствии с произведенным анализом описаны перспективы внедрения адаптивных локальных АСУДД в рассматриваемом транспортном узле.

Интеллектуальные транспортные системы, адаптивные системы управления дорожным движением, светофорное регулирование, улично-дорожная сеть

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-565-583

### **Введение**

Городские транспортные системы, включающие объекты транспортной инфраструктуры, транспортные средства, а также интеллектуальные транспортные системы, – важные элементы обеспечения устойчивого развития городов. Эффективность функционирования транспортной системы города напрямую

зависит от качества организации дорожного движения в улично-дорожной сети (УДС) – совокупности транспортных связей, по которым осуществляются грузовые и пассажирские перевозки [1]. Для решения задач оптимизации УДС представляется в виде ориентированного графа, узлами которого (узлами УДС) являются пересечения дорог, а ребрами – дороги. При этом организация движения в узлах УДС оказывает существенное влияние на качество движения по всей УДС города.

В настоящее время наблюдается значительный рост нагрузки на городские транспортные системы, вызванный влиянием совокупности следующих факторов:

1) увеличение плотности населения, связанное с трендом многоэтажного строительства, а также с возведением новых городов на месте бывших деревень и поселков;

2) ярко выраженная маятниковая миграция населения, приводящая к усугублению проблемы заторов в часы пик;

3) непрерывный рост автомобилизации. Согласно статистическим данным, в 2019 году в Санкт-Петербурге на 1000 человек приходилось 315 собственных легковых автомобилей [2].

Качество организации дорожного движения – фактор, определяющий надежность и безопасность индивидуальных поездок, пассажирских и грузовых перевозок [3].

В соответствии с транспортной стратегией Российской Федерации на период до 2030 года [4] необходимо повышать качество транспортных систем с помощью рационального распределения транспортных потоков, постепенно отходя от классического подхода – строительства новых дорог и развязок. Таким образом, приоритетным направлением развития УДС городов становится внедрение автоматизированных систем управления дорожным движением как части городских интеллектуальных транспортных систем (ИТС) [5].

В перспективе для эффективного управления транспортными системами необходим мониторинг и прогнозирование состояния их параметров [6–8]. Однако в случаях, когда транспортная система является масштабной (район, город), внедрение подобных систем может приводить к излишним затратам бюджета на внедрение ИТС.

В целях реализации национального проекта «Внедрение интеллектуальных транспортных систем, предусматривающих автоматизацию процессов управления дорожным движением в городских агломерациях, включающих города с населением свыше 300 тысяч человек (ИТС-300)» разработана программа внедрения ИТС [9] сроком до 2024 года. Оценка проектов по локальному внедрению АСУДД производится на основании комплекса критериев, но ведущая роль в оценивании отведена экономическим показателям и показателям технической оснащенности города, демонстрирующей его готовность к внедрению проектов ИТС. Оценивается, например, наличие таких подсистем, как метео-



мониторинг, мониторинг транспортных потоков, весогабаритного контроля транспортных средств.

Несмотря на качественную оценку локальных проектов, крайне малое внимание уделяется техническому эффекту от внедрения ИТС. Итогом может стать ситуация, когда проект формально отвечает всем требованиям, а после внедрения ИТС качественные показатели работы городской транспортной системы остаются неизменными или даже ухудшаются.

Один из важнейших этапов создания и внедрения ИТС – применение АСУДД, цель которых состоит в эффективном управлении светофорными объектами [10]. Можно выделить следующие варианты реализации АСУДД:

- статические светофорные объекты, для которых фазы рассчитываются на основании прогнозируемой нагрузки;
- адаптируемые по времени светофорные объекты, для которых характерно изменение фаз в определенное время суток с наибольшей транспортной активностью, однако эти фазы также статичны, т. к. отсутствует обратная связь по действительным показателям интенсивности потоков;
- адаптируемые светофорные объекты с обратной связью по интенсивности транспортного потока;
- локальные АСУДД, объединенные в системы [13].

В качестве обратной связи для управления фазами светофоров используются данные об интенсивности транспортных потоков. Эти данные могут быть получены с помощью различных интеллектуальных датчиков: индукционных петель, камер с возможностью распознавания транспортных средств, и т. д. [12].

Несмотря на всю перспективность автоматизированных систем управления, не для всех пересечений транспортных потоков будет эффективно их внедрение, поскольку значительные временные задержки при движении транспортных средств на этих пересечениях могут быть обусловлены специфической конфигурацией дорог, плохим состоянием дорожного покрытия, исчерпанием пропускной способности дорог [13]. Соответственно, применение АСУДД на таких участках неоправданно.

Цель работы – определить целесообразность внедрения локальной АСУДД на конкретном участке УДС Санкт-Петербург – пересечении проспекта Энгельса и Суздальского проспекта. Для достижения цели поставлены задачи:

- 1) создать методику исследования пересечений;
- 2) провести анализ параметров транспортных потоков на пересечении проспекта Энгельса и Суздальского проспекта;
- 3) выбрать эффективный вариант реализации АСУДД;
- 4) оценить целесообразность внедрения локальной АСУДД.

Выбор пересечения обусловлен высокой интенсивностью транспортных потоков, а также значимой ролью во внутригородских корреспонденциях. Исследование проводилось с помощью программы имитационного моделирования PTV Vissim.

## 1. Методика исследования

Методика исследования участка УДС города с целью оценки целесообразности внедрения АСУДД состоит из нескольких этапов.

### 1. Выбор участка УДС

Анализируются открытые статистические источники о состоянии транспортной системы города для выявления участков УДС с неудовлетворительными показателями транспортного движения. В результате для рассмотрения выбирается конкретный участок среди множества выявленных.

### 2. Сбор исходных данных и построение имитационной модели

Производится сбор исходных данных на основе визуального метода с последующим построением графических схем рассматриваемого участка УДС. На основании собранных данных создается имитационная модель пересечения с ее последующей калибровкой.

### 3. Выявление «узких мест» на основе данных моделирования

Под «узкими местами» понимаются элементы пересечения с недостаточной пропускной способностью, приводящие к возникновению транспортных заторов.

На этом этапе происходит сбор статистики имитационного моделирования по всему рассматриваемому участку УДС. На основе полученной статистики определяются «узкие места», после чего идет сбор конкретизирующей статистики по каждому такому месту рассматриваемого участка УДС.

### 4. Анализ возможных вариантов для расшивки «узких мест»

Выявляются возможные варианты для оптимизации «узких мест» с последующим проведением модельных экспериментов путем реализации каждого из вариантов и сбором соответствующей статистики. На ее основании делается сравнительный анализ рассмотренных вариантов и выбор наиболее эффективного варианта реализации АСУДД.

### 5. Анализ целесообразности внедрения АСУДД

Анализируется вся полученная статистика предыдущих этапов и определяется целесообразность внедрения АСУДД на рассматриваемом участке УДС.

К исходным данным рассматриваемого пересечения отнесены интенсивности транспортного потока, продолжительность светофорных фаз, конфигурация пересечения, правила дорожного движения, действующие на участке. Средне-часовая интенсивность определяется согласно ГОСТ 32965–2014 «Дороги автомобильные общего пользования» визуальным методом. Метод заключается в визуальном определении интенсивности движения и фиксации вручную или на электронном носителе количества транспортных средств за единицу времени (в настоящем исследовании используется мера измерения 1 час). Преимущества метода — экономичность, мобильность, возможность получения данных без специального оборудования и навыков [14, 15]. Из недостатков можно выделить низкую точность и большую зависимость от субъективных обстоятельств. Также

для определения исходных данных применяется метод натурного обследования транспортных потоков [16].

## 2. Результаты исследования

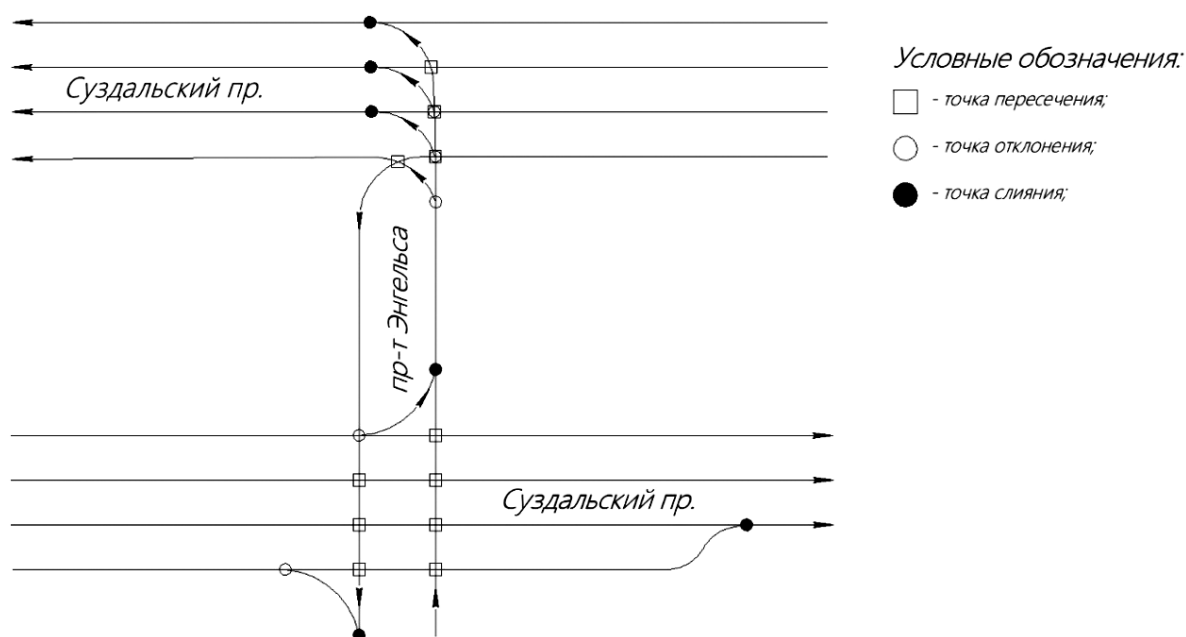
На основании обследования выбранного объекта УДС была построена принципиальная схема потоков (рис. 1), установлена схема организации дорожного движения (в упрощенном виде представлена на рис. 2) и определены места постоянной дислокации технических средств организации дорожного движения. Построенная принципиальная схема транспортных потоков позволяет выделить все имеющиеся направления движения транспортных средств, определить конфликтные точки и собрать статистические данные о характеристиках транспортных потоков путем натурного обследования.

Упрощенная схема организации движения отражает взаимное расположение технических средств организации дорожного движения, на основании которого в дальнейшем была построена имитационная модель пересечения в текущей конфигурации.

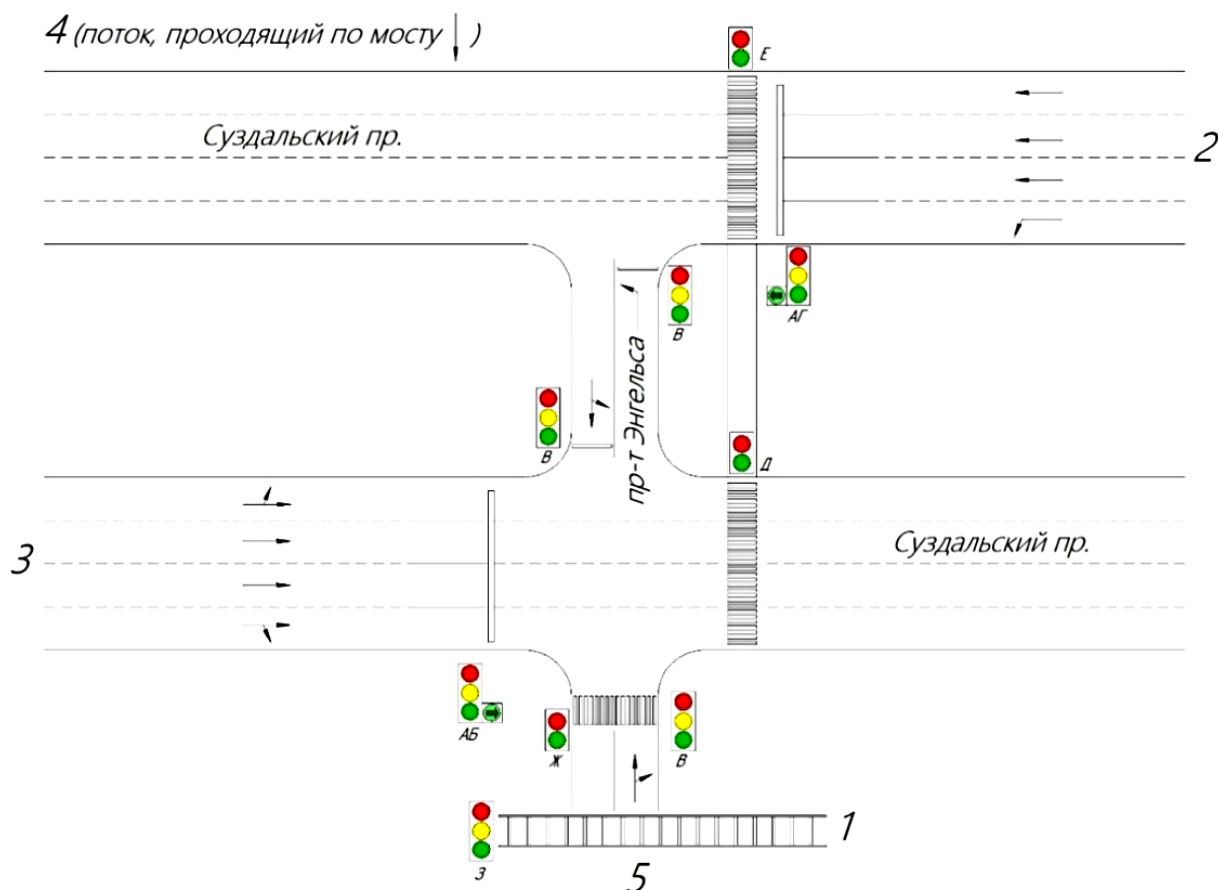
По визуальному методу была определена среднечасовая интенсивность транспортных потоков по всем направлениям, представленная в таблице 1.

Определение продолжительности светофорных фаз выполнялось также путем натурного обследования, результаты измерений представлены на рисунке 3.

После сбора всех необходимых данных была построена имитационная модель исследуемого пересечения (рис. 4) и произведена калибровка модели путем



**Рис. 1.** Принципиальная схема потоков на пересечении проспекта Энгельса и Суздальского проспекта



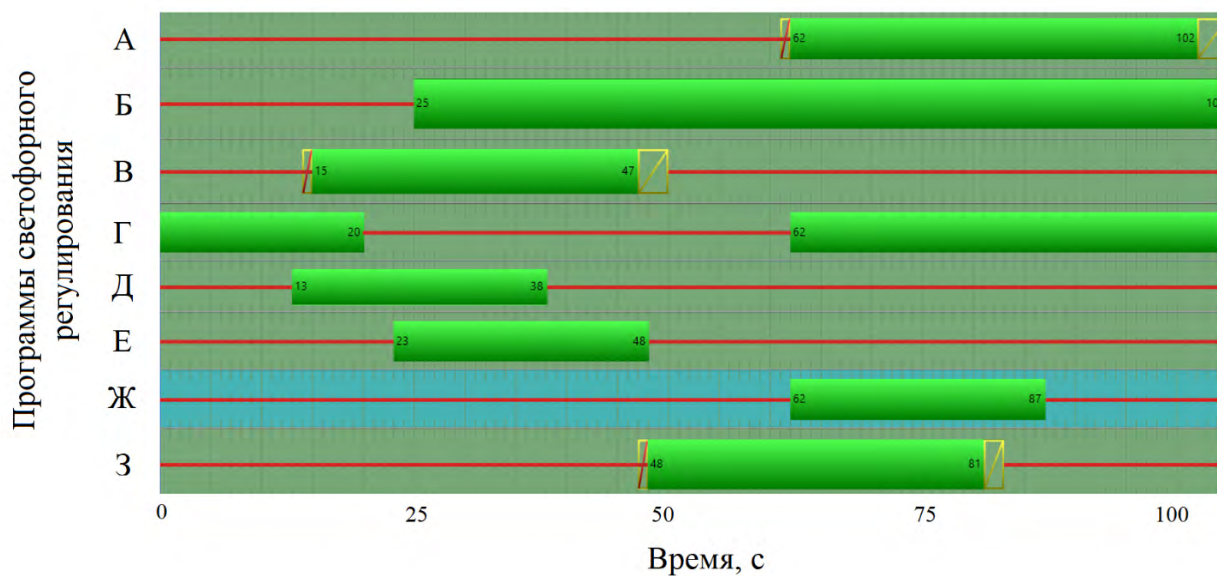
**Рис. 2.** Упрощенная схема организации дорожного движения на пересечении проспекта Энгельса и Суздальского проспекта в текущей конфигурации

**Таблица 1.** Среднечасовая интенсивность транспортных потоков

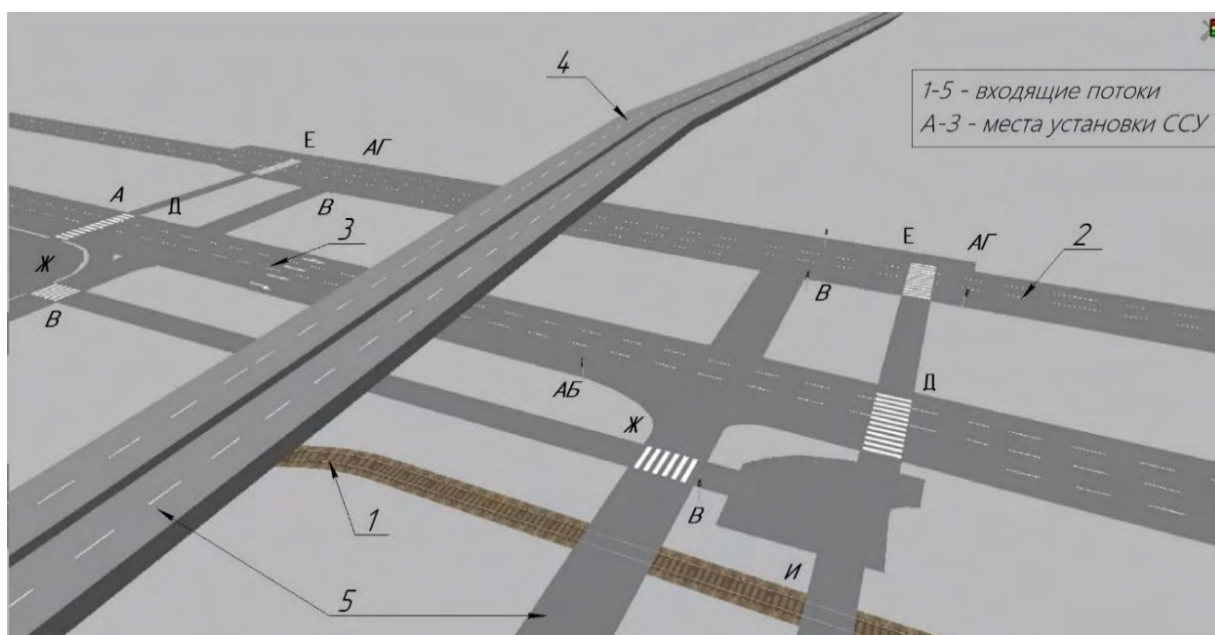
Вид транспорта	Направление	Среднечасовая интенсивность, 1/ч
Общественный (трамвай)	1	60
Индивидуальный	2	3000
Индивидуальный	3	2800
Индивидуальный	4	2000
Индивидуальный	5	1500

последовательных итерационных вычислений и уточнения исходных данных для соответствия параметров модели реальному пересечению [17].

По результатам моделирования произведена оценка пропускной способности узла транспортной системы и проанализирована возможность осуществления перераспределения транспортных потоков. На рисунке 5 представлены эпюры средних скоростей на исследуемом пересечении.



**Рис. 3.** Диаграмма светофорного регулирования с указанием времени начала и окончания фаз, с

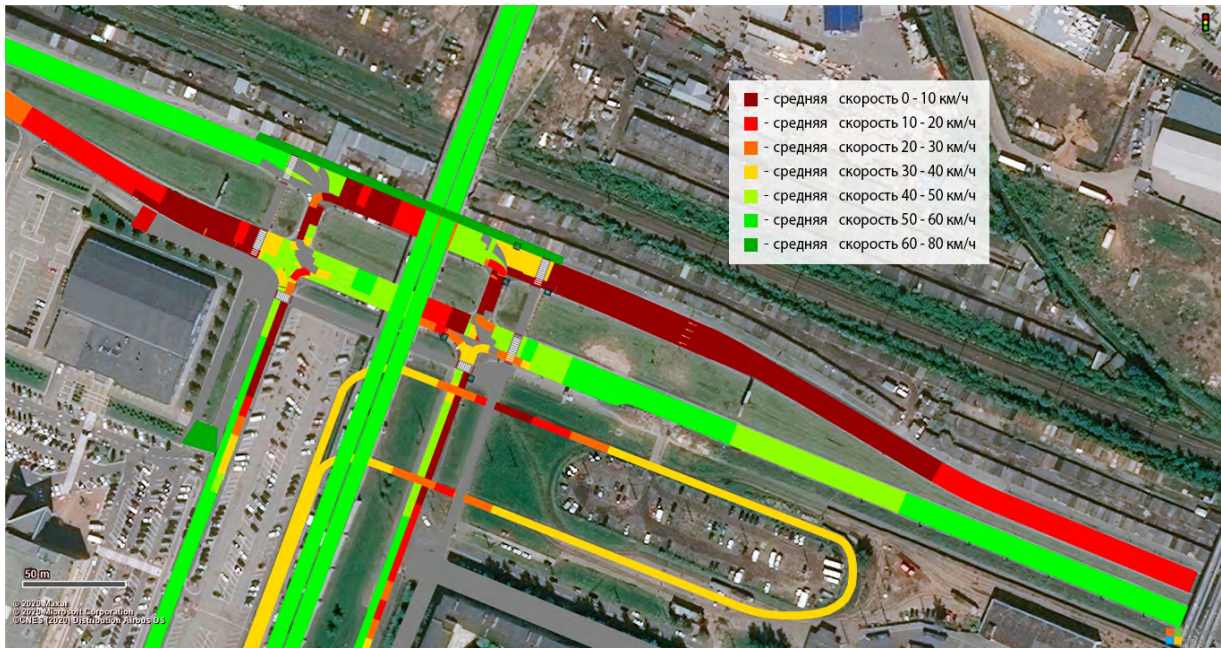


**Рис. 4.** Имитационная модель пересечения проспекта Энгельса и Суздальского проспекта в существующей конфигурации

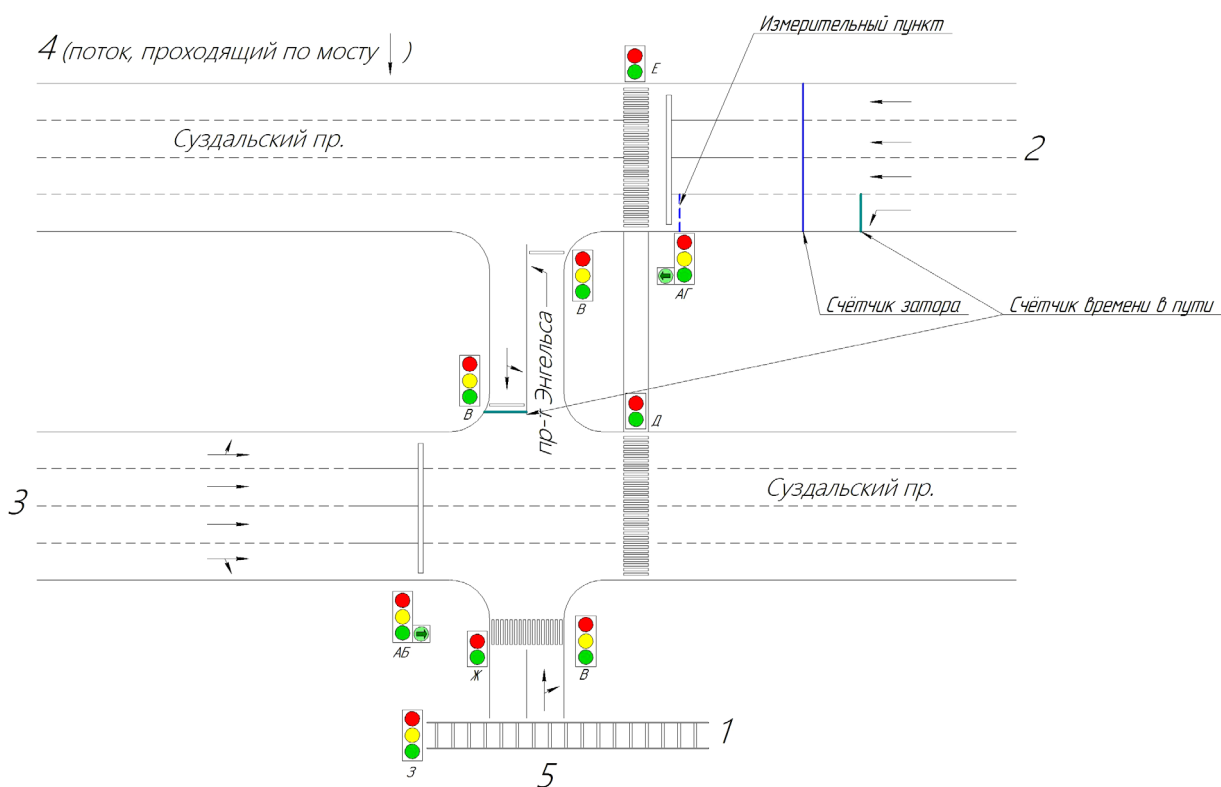
Согласно результатам моделирования (см. рис. 5) и наблюдениям за реальным объектом, наиболее «узким» местом является левый поворот с Суздальского проспекта на проспект Энгельса, вследствие чего замедляется движение на всем участке дороги. Дальнейшие исследования производились для этого участка.

Для сбора статистических данных в процессе моделирования использовались следующие измерительные элементы PTV Vissim: счетчик длины затора,





**Рис. 5.** Эпюры средних скоростей на пересечении проспекта Энгельса и Суздальского проспекта в текущей конфигурации



**Рис. 6.** Месторасположение измерительных элементов (счетчиков) на модели пересечения проспекта Энгельса и Суздальского проспекта в текущей конфигурации

**Таблица 2.** Результаты моделирования пересечения проспекта Энгельса и Суздальского проспекта в текущей конфигурации

№	Измеряемый параметр	Полученное значение
1	Среднее время в пути транспортного средства, с	91,51
2	Средняя скорость транспортного средства, км/ч	24,86
3	Среднее время простоя транспортного средства, с	37,43
4	Средняя длина затора, м	207,02
5	Среднее время нахождения транспортного средства в заторе, с	159,42

счетчики времени в пути транспортных средств и измерительные пункты. Расположение счетчиков в модели представлено на рисунке 6.

Средние параметры движения транспортных средств, полученные в результате моделирования 60 минут функционирования рассматриваемой транспортной системы в текущей конфигурации, представлены в таблице 2.

С целью снижения транспортной нагрузки на «узкое» место рассматриваемого пересечения были рассмотрены варианты совершенствования организации движения:

- синхронизация фаз светофорных объектов Г и А в зоне левого поворота с Суздальского проспекта на проспект Энгельса;
- организация дополнительной зоны разворота, которая теоретически должна снизить нагрузку на перекресток на 5%;
- синхронизация фаз светофорных объектов и организация дополнительной зоны разворота из предыдущих вариантов одновременно.

Для синхронизации циклов светофорных объектов в зоне левого поворота и смежных участков определялись значения времени зеленой фазы согласно ОДМ 218.6.003–2011 «Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах».

Длительность промежуточного такта для левой стрелки светофорного объекта Г рассчитывалась по формуле:

$$t_{\text{п}} = \frac{V_a}{7,2 \cdot a_t} + \frac{3,6(l_i + l_a)}{V_a} = \frac{40}{7,2 \cdot 4} + \frac{3,6(50 + 4)}{40} \approx 6 \text{ с,}$$

где  $V_a$  – средняя скорость транспортных средств при подходе к перекрестку и в зоне перекрестка, км/ч;  $a_t$  – среднее замедление транспортных средств при включении запрещающего сигнала, м/с<sup>2</sup>;  $l_i$  – расстояние до дальней конфликтной точки, м;  $l_a$  – средняя длина транспортного средства, м.

Для светофорного объекта А длительность промежуточного такта равна:

$$t_{\text{п}} = \frac{60}{7,2 \cdot 4} + \frac{3,6(27+4)}{60} \approx 4 \text{ с.}$$

Для светофорного объекта В длительность промежуточного такта равна:

$$t_{\text{п}} = \frac{20}{7,2 \cdot 4} + \frac{3,6(20+4)}{20} \approx 5 \text{ с.}$$

По причине низкой пешеходной проходимости в зоне перекрестка промежуточный такт не определялся.

Фазовые коэффициенты для зеленой фазы рассматриваемых светофорных объектов рассчитывались по формуле [18]:

$$y_n = \frac{N_n}{M_n},$$

где  $N_n$  – интенсивность движения на рассматриваемом направлении по данным натурных замеров,  $N_n = 450$  авт./час;

$M_n$  – поток насыщения этого направления, приняли  $M_n = 1900$  авт./час для одной полосы шириной 3,5–3,6 м, согласно методическим рекомендациям по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения.

В результате расчета фазовый коэффициент для светофорного объекта Г равен 0,24, для объектов А и В – 0,31 и 0,19 соответственно.

Длительность цикла светофорного регулирования определялась по формуле:

$$T_{\text{ц}} = \frac{(1,5 \cdot t_{\text{п1...п2}} + 5)}{(1 - y_{\text{п1...п2}})} = \frac{(1,5 \cdot (6 + 4 + 5) + 5)}{(1 - (0,24 + 0,31 + 0,19))} \approx 115 \text{ с.}$$

Согласно ГОСТ 23457–86, длительность цикла светофорного регулирования должна лежать в пределах  $25 \text{ с} \leq T_{\text{ц}} \leq 120 \text{ с}$ .

Суммарная длительность основных тактов равна [19]:

$$T_{\text{о}} = \frac{t_{\text{п1...п2}} \cdot (0,5 + y_{\text{п1...п2}}) + 5}{1 - (y_{\text{п1...п2}})} = \frac{15 \cdot 1,24 + 5}{1 - 0,74} = 90 \text{ с.}$$

Длительность зеленой фазы определяли с учетом особенностей конкретного перекрестка по формуле:

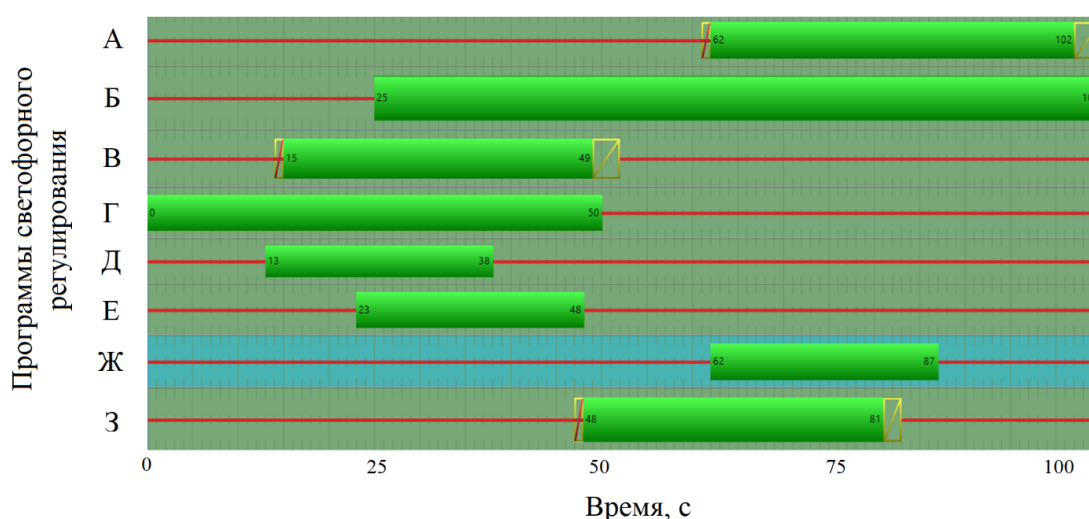
$$t_{\text{о}} = T_{\text{о}} \cdot \frac{y_{\text{ни}}}{y_{\text{общ}}},$$

где  $y_{\text{общ}}$  – сумма фазовых коэффициентов.

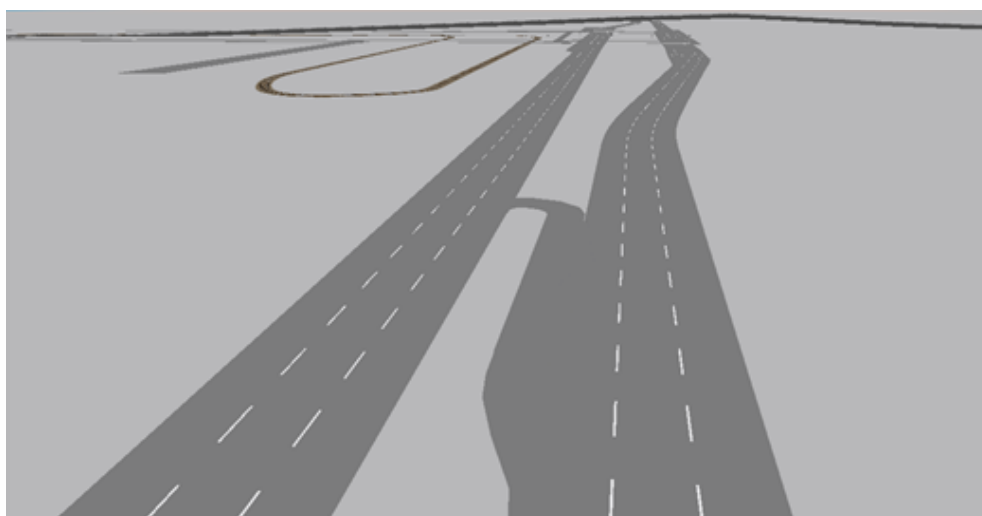
Для светосигнальных устройств Г, А, В значения зеленой фазы равны 30, 40, 25 секунд соответственно.

По правилам дорожного движения водители, поворачивающие по зеленой стрелке, должны уступить дорогу пешеходам и транспорту, движущемуся по основному сигналу светофора. Ввиду того, что не более 7% транспортного потока по направлению 5 (см. рис. 2) двигаются одновременно с транспортными средствами, поворачивающими по левой стрелке на проспект Энгельса, была увеличена продолжительность зеленого сигнала до 50 с. Одновременно была увеличена продолжительность зеленого сигнала светофора В на 10 с. Итоговые фазы светофорного регулирования представлены на рисунке 7.

На рисунке 8 представлена организация дополнительной зоны разворота, расположенной в 280 м от рассматриваемого перекрестка.



**Рис. 7.** Рассчитанные фазы светофорного регулирования на пересечении проспекта Энгельса и Суздальского проспекта



**Рис. 8.** Организация дополнительной зоны разворота на Суздальском проспекте

В результате моделирования всех трех вариантов совершенствования организации движения на «узком» месте рассматриваемого пересечения были получены средние параметры движения транспортных средств, представленные в таблице 3. Графическая интерпретация полученных результатов приведена на рисунке 9.

В результате анализа полученных результатов было выявлено, что синхронизация фаз по сравнению с существующим вариантом сокращает среднее время в пути на 45 %, а показатели средней скорости и времени простоя улучшаются на 10 % и 18 % соответственно. Строительство дополнительной зоны разворота показывает улучшения в сравнении с существующим вариантом до следующих значений: время в пути – 18 %, средняя скорость – 9 %, время простоя – 14 %, однако практически не улучшает ситуацию с показателем времени простоя.

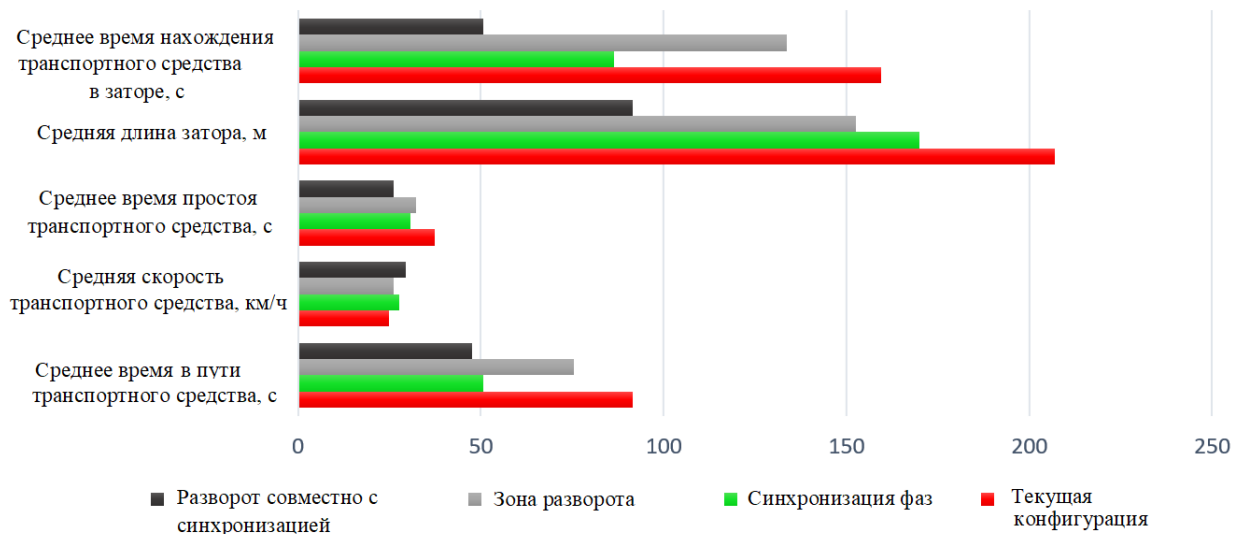
Совместный вариант использования синхронизации фаз и строительства дополнительной полосы разворота показывает наилучшие показатели, но в сравнении с применением только синхронизации фаз – это преимущество лежит в пределах 10 %, и показатель времени в пути практически одинаков.

С учетом необходимости финансовых вложений в строительство дополнительной полосы разворота, вероятного увеличения транспортных задержек

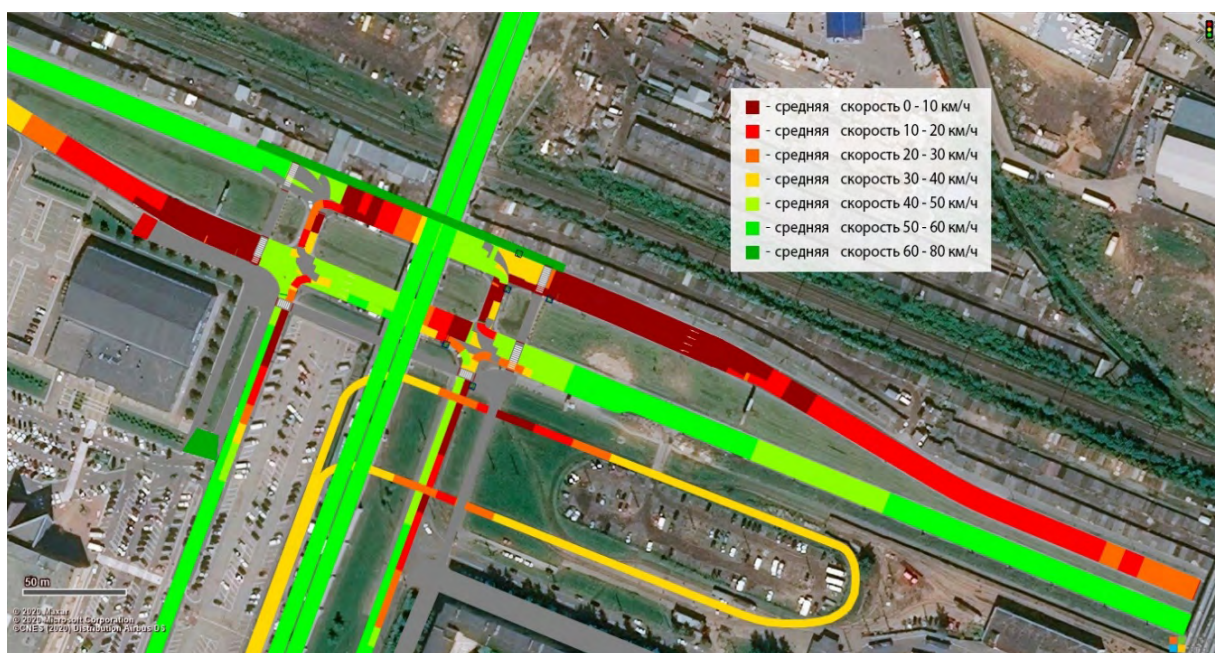
**Таблица 3.** Результаты моделирования пересечения проспекта Энгельса и Суздальского проспекта в текущей конфигурации с вариантами совершенствования организации движения

	Текущая конфигурация	1-й вариант: синхронизация фаз	2-й вариант: зона разворота	3-й вариант: разворот совместно с синхронизацией
Среднее время в пути транспортного средства, с	91,51	50,68	75,55	47,63
Средняя скорость транспортного средства, км/ч	24,86	27,68	26,75	29,51
Среднее время простоя транспортного средства, с	37,43	30,72	32,35	26,29
Средняя длина затора, м	207,02	170,01	152,50	91,62
Среднее время нахождения транспортного средства в заторе, с	159,42	86,40	133,68	50,71





**Рис. 9.** Диаграмма результатов моделирования пересечения проспекта Энгельса и Суздальского проспекта в текущей конфигурации с вариантами совершенствования организации движения



**Рис. 10.** Эпюры средних скоростей транспортных средств при синхронизации светофорных объектов на пересечении проспекта Энгельса и Суздальского проспекта

на рассматриваемом пересечении в процессе строительных работ, а также сравнительно небольшого улучшения показателей движения относительно варианта синхронизации фаз, требующего на данный момент только одноразовой коррекции фаз светофорных объектов, было принято решение отказаться от использования вариантов улучшения, связанных с организацией дополнительной зоны разворота.

Синхронизация фаз светофора проводилась для интенсивностей транспортных потоков, характеризующимися пиковыми нагрузками на рассматриваемом пересечении, а именно в часы пик. Предлагаемое решение для улучшения качества движения на рассматриваемом пересечении – синхронизация фаз светофорных объектов для обеспечения слаженности и уменьшения конфликтности транспортных потоков.

На рисунке 10 представлены эпюры средних скоростей для выбранного варианта организации движения – синхронизации светофорных объектов.

Представленные эпюры средних скоростей также подтверждают выводы о значительном улучшении движения на пересечении, несмотря на пиковые интенсивности. Зоны с низкими скоростями движения (до 10 км/ч) сформированы транспортными средствами, скапливающимися перед светофорными объектами. Из-за продолжительного цикла светофорного регулирования сокращение протяженности таких зон не представляется возможным.

С учетом полученного эффекта относительно движения на данном участке УДС наилучшим способом первоначального внедрения конфигурации АСУДД является светофорное регулирование, адаптированное по времени, т. е. совмещение двух режимов работы фаз светофорного регулирования. Во время пиковых нагрузок, совпадающих с утренними и вечерними часами пик, необходимо использовать синхронизированные фазы светофора, а в остальное время суток применять существующие фазы светофоров, рассчитанные на основании пропускной способности. Дальнейшее внедрение автоматизированной системы управления дорожным движением на исследованном участке улично-дорожной сети может быть целесообразно, т. к. даже незначительное управление фазами светофорных объектов привело к существенному улучшению качества дорожного движения.

## **Заключение**

На основании предложенной методики оценки целесообразности внедрения АСУДД был проведен анализ проблемного пересечения проспекта Энгельса и Суздальского проспекта в Санкт-Петербурге, рассмотрены варианты улучшения качества движения, предложена эффективная относительно выявленных интенсивностей движения конфигурация АСУДД для последующего внедрения.

Эффективной конфигурацией оказалось применение адаптированного по времени светофорного регулирования, позволяющего корректировать движение на пересечении в зависимости от транспортных нагрузок, но не имеющего обратной связи, соответственно и без возможности влиять на процесс управления дорожным движением. Внедрение адаптивного светофорного регулирования с обратной связью позволит контролировать и распределять потоки транспортных средств с большей точностью благодаря информирова-

нию о состоянии пересечения. В то же время вложения в организацию такого регулирования будут существенно выше предлагаемого регулирования без обратной связи. При использовании более экономичного варианта улучшения качества движения небольшими вложениями производится пробный прогон применения простейших интеллектуальных транспортных систем. Это может сыграть огромную роль в дальнейшем анализе пересечения для последующего внедрения локальных проектов АСУДД.

Вследствие предположительного установления средней скорости на большей части рассматриваемого пересечения не ниже 10–20 км/ч произойдет улучшение важных показателей городского комфорта и экологичности (снижение уровня шума и расхода топлива), что в свою очередь может привести к увеличению привлекательности окрестных земель и последующего появления деловых зон.

Не существует универсального решения для городских УДС, однако представленное исследование позволило сделать определенный вывод о необходимости внедрения интеллектуальных транспортных систем. Решения такого рода необходимо принимать комплексно, ожидаемый эффект и затраты должны находиться как минимум в точке безубыточности, несмотря на то что итоговое результирующее воздействие транспортных проектов на совокупность социальных и экономических факторов довольно сложно оценить.

### Библиографический список

1. Горев А. Э. Основы транспортного моделирования / А. Э. Горев, К. Бёттгер, А. В. Прохоров, Р. Р. Гизатуллин. – СПб.: Издательско-полиграфическая компания «КОСТА», 2015. – 118 с.
2. Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 29.07.2021). – Текст: электронный.
3. Стахин Д. Р. Метод по определению рисков при перевозке опасных грузов / Д. Р. Стахин, Д. Г. Плотников // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2020. – № 9. – С. 517–528. DOI: 10.1872/MMF-2020-36.
4. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года [Распоряжение Правительства РФ от 22 ноября 2008 года № 1734-р], 2008.
5. Плотников Д. Г. Подход к оптимизации структуры системы управления транспортными потоками / Д. Г. Плотников, А. В. Баните, Д. Р. Стахин // Транспорт России: проблемы и перспективы–2020: материалы Международной научно-практической конференции. – СПб.: ИПТ РАН, 2020. – С. 45–48.
6. Ефанов Д. В. Универсальные системы мониторинга как жизненно важные составляющие высокоиммунных транспортных систем / Д. В. Ефанов, Г. В. Осадчий, Д. Г. Плотников, А. В. Шинкаренко // Транспорт Российской Федерации. – 2020. – № 5 (90). – С. 20–26.
7. Осадчий Г. В. Принципы построения универсальной платформы непрерывного мониторинга технического состояния инфраструктурных объектов / Г. В. Осадчий, А. В. Шинкаренко, Д. Г. Плотников, А. В. Баните // Автоматика на транспорте. – 2020. – Т. 6. – № 4. – С. 484–498. DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-484-498.

8. *Куфтинова Н. Г.* Прогнозирование транспортных потоков агломераций на основе нейронной сети / Н. Г. Куфтинова, А. В. Остроух, Н. Е. Суркова, К. А. Баринев // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2020. – № 11. – С. 40–45. DOI: 10.25791/asu.11.2020.1235.
9. Методики оценки и ранжирования локальных проектов в целях реализации мероприятия «Внедрение интеллектуальных транспортных систем, предусматривающих автоматизацию процессов управления дорожным движением в городских агломерациях, включающих города с населением свыше 300 тысяч человек» в рамках федерального проекта «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства» национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги», 2020. – 67 с.
10. *Akabane A.* Towards a distributed and infrastructure-less vehicular traffic management system / A. Akabane // Computer Communications. – 2020. – Т. 151. – С. 306–319.
11. *Chavhan S.* Prediction based traffic management in a metropolitan area / S. Chavhan, P. Venkataram // Journal of traffic and transportation engineering. – 2020. – Т. 7, № 4. – С. 447–466.
12. *Ефанов Д. В.* Система прогнозирования состояния переезда для мобильных навигационных устройств / Д. В. Ефанов, Д. Г. Плотников, Г. В. Осадчий // Автоматика, связь, информатика. – 2018. – № 9. – С. 15–19.
13. *Sathiyaraj R.* An efficient intelligent traffic light control and deviation system for traffic congestion avoidance using multi-agent system / R. Sathiyaraj, A. Bharathi // Transport. – 2020. – Т. 35, №. 3. – С. 327–335.
14. *Якимов М. Р.* Инновационные технологии сбора данных интенсивности движения транспортных и пассажирских потоков / М. Р. Якимов // Инновационный транспорт. – 2016. – № 2 (20). – С. 38–41. DOI: 10.20291/2311-164X-2016-2-38-41.
15. *Бровин Н. Н.* Определение коэффициента погрешности при исследовании интенсивности транспортного потока натурным методом / Н. Н. Бровин // Управление качеством в транспортной и социальной сферах: Сборник научных трудов транспортного факультета по материалам ХLI студенческой научной конференции ОГУ, Оренбург, 2–9 апреля 2019 года / Под редакцией В. И. Рассохи. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2019. – С. 139–141.
16. *Андронов Р. В.* Определение интенсивности транспортных потоков при помощи системы баллов карт пробок / Р. В. Андронов, Д. А. Гензе, Е. Н. Легостаева, Е. В. Белоусова // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2019. – № 4. – С. 5–12. DOI: 10.15593/24111678/2019.04.01.
17. *Касаткина Е. В.* Компьютерное моделирование потоков в городской транспортной сети / Е. В. Касаткина, К. В. Кетова // Интеллектуальные системы в производстве. – 2021. – Т. 19, № 1. – С. 89–99. DOI: 10.22213/2410-9304-2021-1-89-99.
18. *Попова И. М.* Совершенствование и расчет светофорного цикла для сокращения автомобильных пробок с использованием фазового коэффициента / И. М. Попова, И. К. Данилов // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. – 2016. – Т. 3, № 1 (4). – С. 298–301. DOI: 10.12737/17768.



**A.V. Banite**  
**D.S. Deriaga**

*Higher School of Transport  
Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport  
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University*

**O.V. Leonenko**

*Department «Transport and Technological Machines»  
Interstate Educational Institution of Higher Education «Belarusian-Russian University»*

## **IMPROVEMENT OF THE URBAN TRANSPORTATION SYSTEM BY THE INTRODUCTION OF ADAPTIVE TRAFFIC CONTROL SYSTEMS**

The article is devoted to the prospects of improving the quality of traffic in the junction of the urban street and road network through the introduction of intelligent transport systems, especially automatic traffic control systems (ATCS). The paper analyzes the problems of implementing intelligent transport systems in urban conditions, taking into account the current regulatory framework. The classification of local automated traffic control systems according to the adaptability of traffic light regulation to the changing parameters of traffic flows is given. For the decision of a problem of practicability of introduction of ACSDS, the technique including construction of imitation models for more exact forecasting of effect of introduction of local ACSDS on the considered site of an urban street-road network is offered. The application of the methodology is demonstrated on the example of the intersection of Engels Avenue and Suzdal Avenue in St. Petersburg. Two variants of the organization of control of phases of traffic light objects are analyzed: static and adapted according to the time of day. The influence of ADCS implementation on average speed of vehicles and characteristics of traffic jams in the junction in question was estimated based on simulation modeling in PTV Vissim. In accordance with the analysis, the prospects of introducing adaptive local ACSDS in the considered transport junction are described.

Intelligent transport systems, adaptive traffic control systems, traffic light control, road network

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-565-583

### **References**

1. Gorev A. E., Böttger K., Prokhorov A. V., Gizatullin R. R. (2015) *Osnovy transportnogo modelirovaniya: Prakticheskoye posobiye* (seriya «Biblioteka transportnogo inzhenera») [*Basics of transport modeling: A practical guide* (series “Library of transport engineers”)]. Saint Petersburg, Izdatel'sko-poligraficheskaya kompaniya “KOSTA” [Publishing and Printing Company “KOSTA ”], 168 p. (In Russian)
2. *Federal'naya sluzhba statistiki* [*Federal State Statistics Service*]. Available at: <https://rosstat.gov.ru> (accessed: July 29, 2021) (In Russian)
3. Stakhin D. R., Plotnikov D. G. (2020) Metod po opredeleniyu riskov pri perezovzke opasnykh gruzov [Method for determining risks when transporting dangerous goods]. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka I obrazovaniye* [*Modern mechanical engineering. Science and education*], no. 9, pp. 517–528. (In Russian) DOI: 10.1872/MMF-2020-36.
4. *Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda: utverzhennaya rasporyazheniyem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 22 noyabrya 2008 g. № 1734-r: v red. rasporyazheniy Pravitel'stva RF ot 12.05.2018 № 893-r* [*Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030: approved. by order of the Government of the Russian Federation of November 22, 2008*]. (In Russian)



5. Banite A. V., Stakhin D. R., Plotnikov D. G. (2020) Podkhod k optimizatsii struktury sistemy upravleniya transportnymi potokami [Method for optimizing the structure of a traffic management system]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy* [*Transport of Russia: problems and prospects*]. *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., pp. 45–48 (In Russian)
6. Efanov D. V., Osadchiy G. V., Plotnikov D. G., Shinkarenko A. V. (2020) Universal'nyye sistemy monitoringa kak zhizненно vazhnyye sostavlyayushchiye vysokoimunnykh transportnykh sistem [Universal monitoring systems as vital components of high-immune transport systems. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [*Transport of the Russian Federation*], no. 5, pp. 20–26. (In Russian)
7. Osadchiy G. V., Shinkarenko A. V., Plotnikov D. G., Banite A. V. (2020) Printsipy postroyeniya universal'noy platformy nepreryvnogo monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya infrastruktury ob'yektov [Principles of building a universal platform for continuous monitoring of the technical condition of infrastructure facilities]. *Avtomatika na transporte* [*Transport Automation*], vol. 6, no. 4, pp. 484–498. (In Russian)
8. Kuffinova N. G., Ostroukh A. V., Surkova N. E., Barinov K. A. (2020) Prognozirovaniye transportnykh potokov aglomeratsiy na osnove neyronnoy seti [Prediction of Suburban Transport Flows Based on a Neural Network]. *Promyshlennyye avtomaticheskie sistemy upravleniya i kontrolyery* [*Industrial Automatic Control Systems and Controllers*], no. 11, pp. 40–45. (In Russian) DOI: 10.25791/asu.11.2020.1235.
9. Metodiki otsenki i ranzhirovaniya lokal'nykh proyektov v tselyakh realizatsii meropriyatiya «Vnedreniye intellektual'nykh transportnykh sistem, predusmatrivayushchikh avtomatizatsiyu protsessov upravleniya dorozhnym dvizheniyem v gorodskikh aglomeratsiyakh, vklyuchayushchikh goroda s naseleniyem svyshe 300 tysyach chelovek» v ramkakh federal'nogo proyekta «Obshchesistemnyye mery razvitiya dorozhnogo khozyaystva» natsional'nogo proyekta «Bezopasnyye i kachestvennyye avtomobil'nyye dorogi» [Methods for assessing and ranking local projects in order to apply for the project «The Implementation of intelligent transport systems to provide automation in traffic management processes within urban agglomerations including cities with a population of over 300 thousand people» under the scope of the federal project «System-wide measures for the development of road facilities» which is a national project «Safe and high-quality highways»], 67 p.
10. Akabane A. (2020) Towards a distributed and infrastructure-less vehicular traffic management system. *Computer Communications*, vol. 151, pp. 306–319.
11. Chavhan S., Venkataram P. (2020) Prediction based traffic management in a metropolitan area. *Journal of traffic and transportation engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 447–466.
12. Efanov D. V., Plotnikov D. G., Osadchiy G. V. (2018) Servis prognozirovaniya vremennykh parametrov raboty zheleznodorozhnogo pereyezda [Service for forecasting the time parameters of the railway crossing]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [*Transport of the Russian Federation*], no. 4 (77), pp. 31–36. (In Russian)
13. Sathiyaraj R., Bharathi A. (2020) An efficient intelligent traffic light control and deviation system for traffic congestion avoidance using multi-agent system. *Transport*, vol. 35, no. 3, pp. 327–335.
14. Yakimov M. R. (2016) Innovatsionnyye tekhnologii sbora dannykh intensivnosti dvizheniya transportnykh i passazhirskikh potokov [Innovative technologies of data collection on traffic intensity and passenger flows]. *Innovatsionnyy transport* [*Innotrans*], no. 2 (20), pp. 38–41. (In Russian) DOI: 10.20291/2311-164X-2016-2-38-41.
15. Brovin N. N. (2019) Opredeleniye koeffitsiyenta pogreshnosti pri issledovanii intensivnosti transportnogo potoka naturnym metodom [Determination of the error coefficient in the study

- of the traffic flow intensity by the full-scale method]. *Upravleniye kachestvom v transportnoy i sotsial'noy sferakh*: Sbornik nauchnykh trudov transportnogo fakul'teta po materialam XLI studencheskoy nauchnoy konferentsii. OGU, Orenburg, 2–9 aprelya 2019 goda. Pod redaktsiyey V.I. Rassokhi [*Quality management in the transport and social spheres*: Collection of scientific papers of the transport faculty based on the materials of the XLI student scientific conference of OSU, Orenburg, April 2–9, 2019. Ed. by V.I. Rassokhi]. Orenburg, Orenburg state university Publ., pp. 139–141. (In Russian)
16. *Andronov R. V., Genze D. A., Legostaeva E. N., Belousova E. V.* (2019) Opredeleniye intensivnosti transportnykh potokov pri pomoshchi sistemy ballov kart probok [Determination of traffic flow intensity using the system of points of traffic jam maps]. *Transport. Transportnyye sooruzheniya. Ekologiya* [*Transport. Transport facilities. Ecology*], no. 4, pp. 5–12. (In Russian) DOI: 10.15593/24111678/2019.04.01.
  17. *Kasatkina E. V., Ketova K. V.* (2021) Komp'yuternoye modelirovaniye potokov v gorodskoy transportnoy seti [Computer simulation of flows in the urban transport network]. *Intellektual'nyye sistemy v proizvodstve* [*Intelligent systems in production*], vol. 19, no. 1, pp. 89–99. (In Russian) DOI: 10.22213/2410-9304-2021-1-89-99.
  18. *Popova I. M., Danilov I. K.* (2016) Sovershenstvovaniye i raschet svetofornogo tsikla dlya sokrashcheniya avtomobil'nykh probok s ispol'zovaniyem fazovogo koeffitsiyenta [Improvement and calculation of traffic signal cycle to reduce congestion by using a phase coefficient]. *Al'ternativnyye istochniki energii v transportno-tekhnologicheskoy kompleks: problemy i perspektivy ratsional'nogo ispol'zovaniya* [*Alternative energy sources in the transport-technological complex problems and prospects of rational use*], vol. 3, no. 1 (4), pp. 298–301. (In Russian) DOI: 10.12737/17768.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии  
профессором И. М. Кокуриным*

*Поступила в редакцию 21.08.2021, принята к публикации 19.09.2021*

*БАНИТЕ Аушра Владовна* — ассистент Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого  
banite\_av@spbstu.ru

*ДЕРЯГА Денис Сергеевич* — магистрант Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого  
deryagadenis@mail.ru

*ЛЕОНЕНКО Олег Викторович* — кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортные и технологические машины» Межгосударственного образовательного учреждения высшего образования «Белорусско-Российский университет»  
olegleonenko@gmail.com

© Баните А. В., Деряга Д. С., Леоненко О. В., 2021

УДК: 656.224:656.223.18:004.942

**А. И. Сафронов, канд. техн. наук**

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

**Е. В. Лысенко**

*Подразделение «Управление талантами»,  
Российский университет транспорта, Москва*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАНА ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА В УТРЕННИЙ ЧАС ПИК НА ЗАМКНУТОЙ БОЛЬШОЙ КОЛЬЦЕВОЙ ЛИНИИ МОСКОВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА**

Выполнен анализ характеристик строящейся Большой кольцевой линии Московского метрополитена с точки зрения планирования перевозочного процесса. Проведено исследование характеристик всех действующих электродепо Московского метрополитена, оправдывающих планы строительства двух новых электродепо («Аминьевского» и «Нижегородского»), а также реконструкции одного из существующих электродепо («Замоскворецкого»), расположенных в городской черте Москвы – внутри кольцевой автомобильной дороги (МКАД), в окрестностях третьего транспортного кольца и за его пределами. Для нужд моделирования поперегонно измерена протяженность замкнутой Большой кольцевой линии при условии передачи участка движения поездов от станции «Деловой Центр» до станции «Хорошёвская» перспективной Рублёво-Архангельской линии метрополитена. В соответствии с результатами проведенных измерений рассчитаны времена хода по перегонам замкнутой Большой кольцевой линии, позволившие впоследствии определить количество единиц электроподвижного состава, необходимых для обслуживания Большой кольцевой линии в утренний час пик.

График движения поездов; график оборота электроподвижного состава; автоматизация; планирование перевозочного процесса; метрополитен; моделирование; электродепо

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-584-616

### **Введение**

Московский метрополитен, будучи комплексной транспортной системой, востребован среди пассажиров. При этом транспортное предприятие испытывает большие эксплуатационные нагрузки [1]. Планирование работы метрополитена требует тщательной подготовки как к перевозкам пассажиров, происходящим в течение дня, так и к ремонтам (диагностикам) путевой инфраструктуры, проводимым по завершении дневных перевозок.

Подготавливаемый план работы метрополитена, помимо учета технологических ограничений, должен обеспечивать комфортные пассажирские перевозки и не менее комфортные условия труда обслуживающего персонала. Упомянутым планом работы метрополитена, в частности, является плановый график движения (ПГД) пассажирских поездов метрополитена [2, 3].

ПГД – это основа технологии организации движения поездов по линии метрополитена. ПГД, составляемый для каждой линии, индивидуален. Разветвленность, протяженность и вид линии метрополитена в совокупности определяют уровень сложности составления ПГД [4].

Вопросу автоматизации составления ПГД пассажирских поездов метрополитена при использовании персонального компьютера уделяется немалое внимание начиная с последней четверти XX века [5, 6]. Развитием этих работ стал цикл, посвященный автоматизации составления графика оборота электроподвижного состава [7], являющегося неотъемлемой частью планирования перевозочного процесса.

В начале XXI века вычислительных мощностей персональных компьютеров оказалось достаточно для создания и внедрения в промышленную эксплуатацию автоматизированной системы для составления ПГД («АРМ Графиста») [8–13]. Внедрение «АРМ Графиста» позволило в деталях изучить технологический процесс планирования пассажирских перевозок по линиям метрополитена и принципы построения ПГД [14]. Тогда были найдены и апробированы рациональные методики автоматизации построения ПГД [15, 16], сформулированы критерии качества составления ПГД [4, 17].

Развитие новых информационных технологий [18–21] позволило:

- перейти к совершенствованию методов составления ПГД [22–25], а также графиков, технологически связанных с ним: графика оборота [26, 27] и графика работы локомотивных бригад [28–30];

- выстроить новые архитектуры автоматизации синтеза ПГД при использовании аппарата параллельных вычислений [31–34];

- расширить применение графовых методов решения задач планирования от классической логистической модели до построения графовых деревьев заполнения/освобождения точек ночной расстановки [35–38].

Существует проблема составления особых ПГД, например, для работы в праздничные дни, когда востребованность единиц электроподвижного состава на некоторых участках линий может заметно увеличиваться [39]. Есть риск не обеспечить стандартными ПГД должное обслуживание пассажиров в выходные либо понести убытки из-за неоправданного перерасхода ресурсов в будни [40, 41]. Необходимо помнить, что некоторые линии метрополитена в принципе имеют значительно больший пассажиропоток. Сценарии планирования перевозочного процесса на линиях с высокими значениями пассажиропотока существенно отличаются от классических сценариев планирования [39, 42].

Помимо удовлетворения ограничениям, накладываемым работой системы интервального регулирования, что, фактически, является аспектом безопасности движения поездов (важно не путать с информационной безопасностью на железнодорожном транспорте [43]), ПГД должен строиться таким образом, чтобы обеспечивать комфортные пассажироперевозки. Качественным ПГД при этом будет считаться тот, в который при прочих равных условиях заложен ресурс для восстановления движения поездов после возникновения сбойных ситуаций в процессе фактического движения поездов по линии метрополитена согласно составленному ПГД [44–54].

В условиях наличия на кафедре «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ) обширной базы знаний и мощного алгоритмического аппарата, позволяющего проводить автоматизированное построение ПГД пассажирских поездов по Кольцевой линии, предпринята попытка качественной проверки устойчивости разработанных алгоритмов при работе с другой линией метрополитена, также обладающей кольцевой топологией.

Действующая Кольцевая линия Московского метрополитена сильно отличается от строящейся Большой кольцевой линии (БКЛ). Например, время полного оборота в час пик на Кольцевой линии составляет менее одного часа (27,5 мин.), а на БКЛ — значительно больше одного часа (1,5 ч.). Кольцевая линия обслуживается единицами электроподвижного состава (маршрутами) из одного физического электродепо, которое рассматривается на ПГД как две неразрывно связанные друг с другом части. Это сделано для четкого отслеживания диспетчером и составителями выходов/заходов маршрутов с конкретного главного пути линии. В общем случае движение по одному главному пути Кольцевой линии рассматривается как движение по радиальной линии, т. е. главные пути на Кольцевой линии большую часть времени движения поездов не зависят друг от друга. На БКЛ запланированы три электродепо, поэтому для нормальной работы с ними при использовании имеющегося программного обеспечения («АРМ Графиста») потребуются рассматривать отображения сразу шести электродепо, сведения о которых попарно неразрывны.

В настоящий момент движение поездов по участкам БКЛ фрагментировано. Большая часть БКЛ сегодня — это радиальная линия с «вилочной» организацией движения, оставшаяся часть функционирует в составе другой радиальной линии (временно).

## **1. Характеристики БКЛ, учитываемые при планировании перевозочного процесса**

О строительстве БКЛ составители генерального плана развития города Москвы впервые задумались в середине XX века. Тогда генеральный план подвергался частым изменениям. В частности, эти изменения не раз сказывались



на трассировке БКЛ. Наиболее яркие примеры – повороты против часовой стрелки трасс Сокольнической, Замоскворецкой, Арбатско-Покровской и Калужско-Рижской линий на окраинах.

Первой с востока на север повернула трасса Арбатско-Покровской линии (соответствующие продления 1961 и 1963). После длительного следования на восток до наземной станции «Первомайская», реконструированной позже в электродепо «Измайлово», через новую наземную станцию «Измайловская» линия прошла сначала до новой, подземной «Первомайской», а позже к Щелковскому шоссе, где завершилась станцией «Щелковская». Станция «Щелковская» остается конечной станцией и в настоящее время, но уже утвержден проект продления Арбатско-Покровской линии до станции «Гольяново», расположенной северо-восточнее, ближе к Московской кольцевой автомобильной дороге [55].

Следующей направление с юго-восточного на восточное сменила Замоскворецкая линия (соответствующие продления 1985 и 2012). В конце XX века линия была продлена от станции «Орехово» до станции «Красногвардейская», долгое время являвшейся конечной. В начале XXI века состоялось продление линии до станции «Алма-Атинская». Станция возведена без оборотных тупиков. Это свидетельствует о том, что дальнейшее продление линии не предполагается.

В 1990 году на север (при следовании на северо-восток) за станцию «Черкизовская» и на юго-восток (при следовании на юго-запад) за станцию «Тёплый стан» состоялись продления со сменой направления Сокольнической и Калужско-Рижской линий соответственно. Анализируя эти действия градостроителей и метростроевцев сегодня, можно заключить, что они оказались преждевременными. Логично было не продлевать Калужско-Рижскую линию за станцию «Тёплый стан», а Сокольническую, напротив, продлить далее на северо-восток вдоль Щёлковского шоссе.

Трассировка большей части из упомянутых участков метрополитена наводит на мысль, что в 80-е годы XX века градостроители всерьез задумались о том, чтобы провести БКЛ вдоль МКАД, однако уменьшение финансовых вложений, выделяемых на строительство метрополитена, вызванное распадом СССР в 1990-е годы, заставило отказаться от возведения сложной и протяженной подземной железнодорожной трассы на окраинах города.

Новый утвержденный Генеральный план развития города Москвы, введенный в действие с момента присоединения юго-западных территорий Московской области, именуемых «Новой Москвой» [56], к территориям, расположенным внутри МКАД, включил в себя трассировку БКЛ, предложенную специалистами в 60-е годы XX века.

В связи с отмеченными выше обстоятельствами развитие современной БКЛ Московского метрополитена следует рассматривать, начиная с даты открытия пассажирского движения на участке «Автозаводская» – «Каховская» Замоскворецкой линии 11 августа 1969 года. Последующее продление Замоскворецкой

линии началось 30 декабря 1984 года, но не далее, на восток от станции «Каховская», а на юг, от станции «Каширская» до станции «Орехово», с организацией «вилочного» движения [39].

20 ноября 1995 года участок «вилочного» движения от станции «Каширская» до станции «Каховская» обособился в самостоятельную Каховскую линию, состоящую всего из трех станций. Новой линии присвоили на схеме Московского метрополитена номер 11 и бирюзовый цвет. Это сочетание параметров перенесено для обозначения действующего участка БКЛ, хотя, согласно хронологии развития событий, это не 11-я, а 14-я линия метрополитена. Строительство БКЛ началось в 2011 году на участке «Деловой центр» – «Нижняя Масловка». В тот период строящаяся линия называлась третьим пересадочным контуром (ТПК). При этом вторым пересадочным контуром является Кольцевая линия Московского метрополитена, а под первым пересадочным контуром понимают все станции пересадок, расположенные внутри Кольцевой линии.

26 февраля 2018 года для пассажиров открылся первый участок БКЛ – от станции «Деловой центр» до станции «Петровский парк». Данный участок движения пассажирских поездов был объединен «вилочным» движением с Солнцевской линией, на тот момент завершавшейся станцией «Раменки». Разветвление происходило по станции «Шелепиха». При движении по Солнцевской линии за станцией «Шелепиха» следовала станция «Парк Победы», при движении по БКЛ – «Деловой центр». Многие пассажиры не заметили, что для них открылась другая, новая станция «Деловой центр», относящаяся к БКЛ. Станция «Деловой центр», относящаяся к Солнцевской линии, была временно законсервирована для строительства оборотных тупиков.

С момента открытия БКЛ обслуживалась маршрутами электродепо «Измайлово» Арбатско-Покровской линии. Объединение с Солнцевской линией являлось стратегическим решением, технологически крайне необходимым, поскольку у БКЛ отсутствовало собственное электродепо. С продлением Солнцевского радиуса от станции «Раменки» до станции «Рассказовка» 20 августа 2018 года участок БКЛ стал обслуживаться маршрутами, приписанными к новому электродепо «Солнцево».

30 декабря 2018 года было запущено движение поездов до станции «Савёловская» («Нижняя Масловка» на протяжении всего времени строительства).

В 2019 году все три станции Каховской линии (обозначалась на схеме метрополитена после запуска движения по БКЛ номером 11 А) закрылись на реконструкцию.

27 марта 2020 года Некрасовская линия продлилась от станции «Косино» до станции «Лефортово». Фактически «Лефортово» и «Авиамоторная» – это станции БКЛ, работающие в составе продленной линии. При этом «Нижегородская» является кроссплатформенной станцией, на которой в настоящее время функционируют только главные пути, расположенные в центре станционного комплекса и относящиеся к Некрасовской линии, а крайние главные пути, от-

носящиеся к БКЛ, не задействованы. 31 декабря 2020 года Некрасовская линия получила продление до станции «Электрозаводская», однако и эта станция, согласно действующему проекту, относится к БКЛ.

Первая схема «вилочного» движения с разветвлением по станции «Шелепиха» действовала на БКЛ до 12 декабря 2020 года. На короткое время, с 12 по 21 декабря 2020 года, участок от станции «ЦСКА» до станции «Деловой центр» был закрыт для пассажиров. Поезда на участке «Савёловская» – «ЦСКА» двигались с увеличенными интервалами. 21 декабря для пассажиров открылись обе станции «Деловой центр». С этого момента Солнцевская линия и БКЛ с точки зрения пассажирского движения стали работать независимо. «Вилочного» движения на БКЛ с 21 декабря 2020 года по 1 апреля 2021 года не было. Поезда следовали от станции «Савёловская» до станции «Деловой центр» и обратно как по обычной радиальной линии.

1 апреля 2021 года «вилочное» движение вновь образовалось на БКЛ, но уже с разветвлением по станции «Хорошёвская». Часть составов продолжали следование от станции «Савёловская» до станции «Деловой центр» (для этого участка выделен второстепенный номер 11 А), другая часть – до станции «Мнёвники» (считается основным участком с номером 11).

После замыкания БКЛ планируется обособление «вилочного» движения от станции «Шелепиха» до станции «Хорошёвская» с внедрением второй камеры съездов. Этот шаг необходим для того, чтобы передать участок планируемой Рублёво-Архангельской линии.

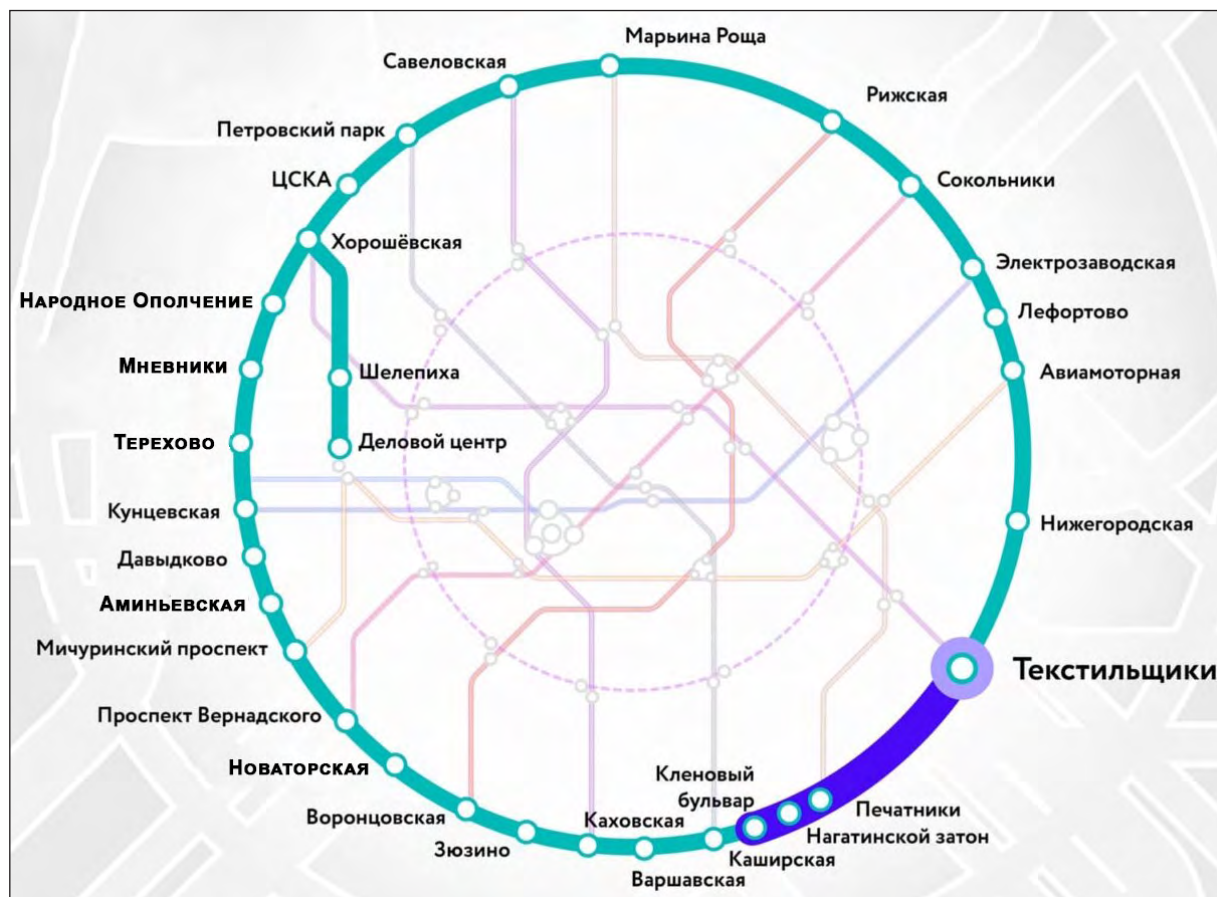
Запуск замкнутой БКЛ должен произойти согласно плановым срокам строительства – в 2022 году.

Сегодня БКЛ – это крупнейший проект в мире в области метростроения. По протяженности БКЛ опередит 10-ю (кольцевую) линию Пекинского метрополитена, которая сейчас удерживает первое место в мире (57,9 км).

На рисунке 1 показана актуализированная схема БКЛ с выделением на ней синим цветом юго-восточного участка строительства, который, по прогнозам, откроется в последнюю очередь и замкнет линию в единый ТПК. Может сложиться так, что замыкание БКЛ случится на северо-востоке. В качестве плановых сроков для обоих участков указан 2022 год.

Северо-восточный участок БКЛ технологически более сложный, поскольку на нем есть две станции очень глубокого залегания. При этом его строительство началось намного раньше начала строительных работ на юго-восточном участке. На юго-восточном участке возводятся станции преимущественно неглубокого залегания, однако сооружение одного из тоннелей протяженностью почти 600 м, которое запланировано под Перервинским плёсом Москвы-реки, может занять более длительное время.

Предполагается, что движение по замкнутой Большой кольцевой линии в каждом направлении будет происходить с различным общим временем хода. Это означает, что маршруты внешнего круга с движением по городу против



**Рис. 1.** Схема БКЛ с обозначением юго-восточного участка строительства

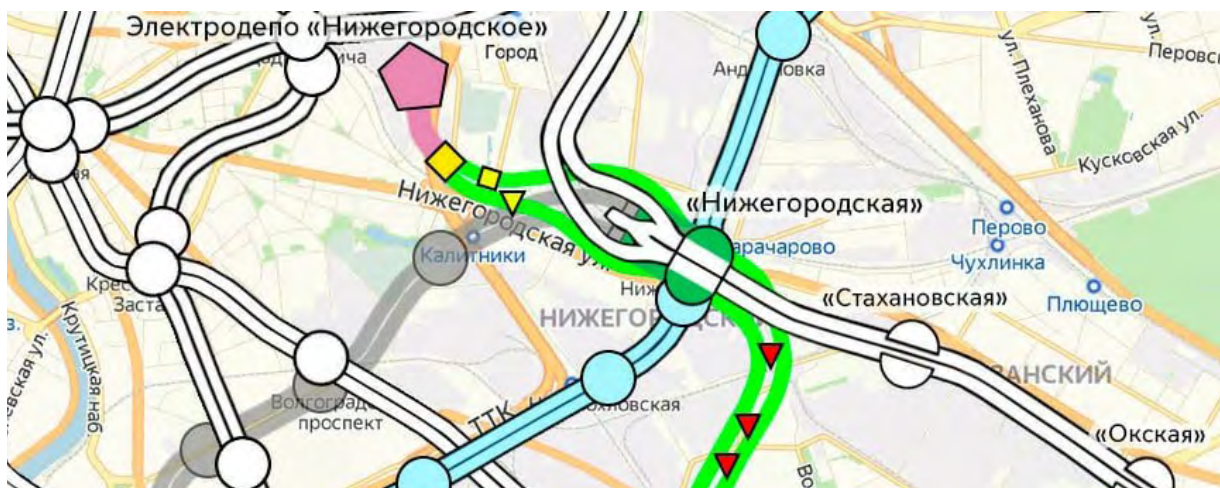
часовой стрелки не будут заходить на участок, связанный с деловым центром «Москва-Сити», а маршруты внутреннего круга с движением по городу по часовой стрелке, напротив, будут. Сначала при движении со стороны станции «Народное ополчение» от станции «Хорошёвская» до «Делового центра», затем от «Делового центра» до станции «Хорошёвская» и последующим движением в сторону станции «ЦСКА».

Как составлять базу данных и строить ПГД в таких новых для Московского метрополитена условиях, пока не ясно, потому и моделирование в настоящей работе выполняется при условии, что участок «Деловой центр» – «Хорошёвская» уже считается переданным Рублёво-Архангельской линии. Движение поездов как по внешнему, так и по внутреннему кругу БКЛ в этом случае выполняется с одинаковым общим временем хода по линии.

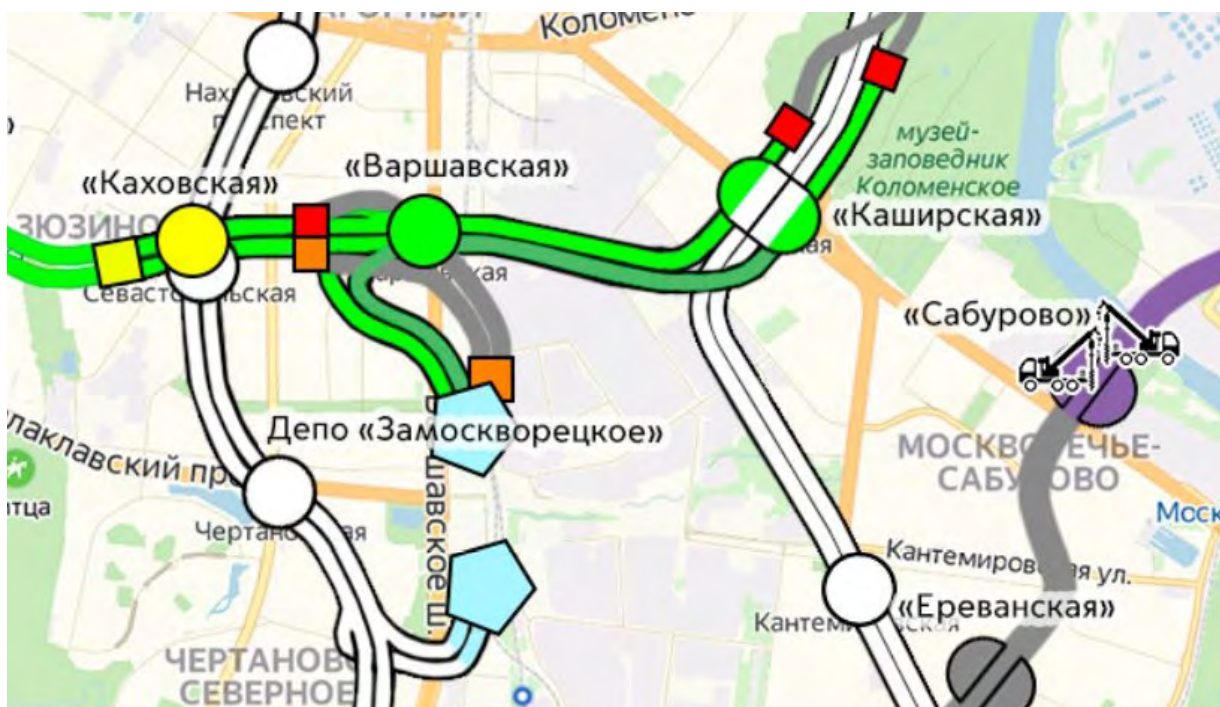
БКЛ будут обслуживать три электродепо: «Нижегородское», «Замоскворецкое» и «Аминьевское».

«Нижегородское» – строящееся электродепо Московского метрополитена. Возводится на месте Московского завода по модернизации и строительству вагонов имени В. Е. Войтовича. Ввод электродепо в эксплуатацию запланирован на 2023 год, схема расположения на карте Москвы приведена на рисунке 2.





**Рис. 2.** Схема расположения и связей электродепо «Нижегородское» с главными путями Большой кольцевой линии

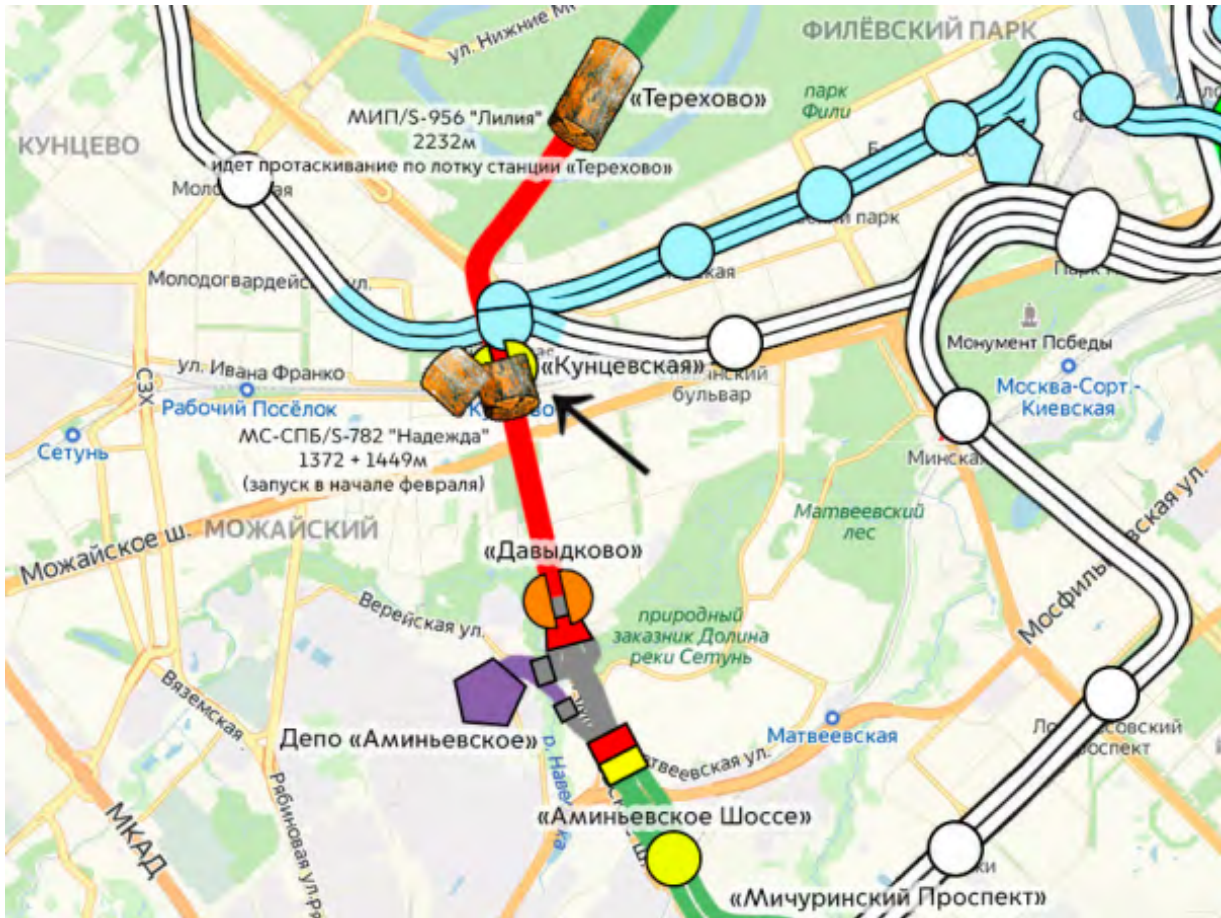


**Рис. 3.** Схема расположения и связей электродепо «Замоскворецкое» с главными путями Большой кольцевой линии

«Замоскворецкое» – существующее электродепо Московского метрополитена, обслуживавшее Замоскворецкую линию. Сейчас объект находится на стадии реконструкции путевого веера и готовится к приему достаточного количества единиц электроподвижного состава для обслуживания БКЛ. Схема расположения на карте Москвы приведена на рисунке 3.

«Аминьевское» – проектируемое электродепо Московского метрополитена, которое построят на западе Москвы. Под электродепо выделен участок площа-





**Рис. 4.** Схема расположения и связей электродепо «Аминьевское» с главными путями Большой кольцевой линии

дью 15,7306 га. Проект электродепо входит в программу реновации промзоны «Очаково», являясь ее неотъемлемой частью. Между электродепо «Аминьевское» и ближайшими станциями БКЛ предполагается строительство служебных соединительных ветвей. Электродепо будет размещаться западнее улицы Генерала Дорохова, между территорией ОАО «РТИ-Каучук» и Вере́йской улицей. Схема расположения на карте Москвы приведена на рисунке 4.

Накопление собранного обобщающего представления о трассировке БКЛ и о сложном пути ее развития со всеми сопутствующими изменениями способствовали более эффективному сбору исходных данных, необходимых для моделирования плана перевозочного процесса по этой линии.

## **2. Подготовка и ввод исходных данных, необходимых для автоматизированного построения «ниток» ПГД утреннего часа пик на БКЛ**

Для построения ПГД вручную инженеры-графисты используют следующие наборы исходных данных [57].

– Времена хода по перегонам и стоянок на станциях в режимах часа пик и часа «непик»;

– заданная парность движения поездов на каждый час работы метрополитена, начиная с момента подачи напряжения на контактный рельс и завершая моментом снятия напряжения с контактного рельса [58];

– сведения о ремонтах, осмотрах, их длительностях, а также пунктах проведения ремонтно-диагностических мероприятий;

– информация о местах размещения на линии метрополитена точек ночной расстановки единиц электроподвижного состава и о количестве точек ночной расстановки на станциях и в окрестных перегонных тоннелях.

При автоматизированном построении ПГД необходима информация:

– о временах хода по перегонам и о стоянках на станциях в режимах часа пик и часа «непик»;

– о заданной парности движения поездов на каждый час работы метрополитена, в которые контактный рельс находится под напряжением;

– о ремонтах, осмотрах, их длительностях, а также пунктах проведения ремонтно-диагностических мероприятий;

– о точках ночной расстановки, последовательностях их заполнения и освобождения.

В общем случае для определения значений времен хода по перегонам решается задача энергоэффективного распределения общего времени хода по линии на времена хода по перегонам [41]. Задача решается по итогам проведения тяговых расчетов при известных параметрах профиля пути и накладываемых ограничениях скорости. Сведения о профиле пути могут быть получены только после того, как все перегонные тоннели пройдены всеми тоннелепроходческими механизированными комплексами.

К настоящему моменту не все тоннели БКЛ пройдены. При этом трасса БКЛ известна и опубликована в открытых источниках. Имеется возможность выполнить ориентировочный расчет с использованием классической формулы из физики, увязывающей скорость, время и расстояние [59]:

$$t_i = \frac{S_i}{v_{\text{cp}}}, \quad (1)$$

где  $t_i$  – время хода по  $i$ -му перегону;  $S_i$  – протяженность  $i$ -го перегона;  $v_{\text{cp}}$  – средняя скорость единиц электроподвижного состава по метрополитену.

На первом этапе сбора исходных данных выполнены измерения протяженностей перегонов БКЛ, оборотных тупиков, веток связи с электродепо при использовании веб-сервиса, созданного для работы со спутниковыми картами, содержащими разметку городских объектов. Сегодня в сети Интернет существует несколько подобных сервисов, но наиболее удобным для анализа объектов метрополитена является Wikimapia.

Измерения протяженностей перегонов выполнены при условии, что участок «Деловой центр» – «Хорошёвская» передан в состав другой линии и движение поездов по нему в рамках решаемой задачи не рассматривается. При этом условии набор учитываемых параметров БКЛ меняется на нижеследующий:

- единицы электроподвижного состава приписаны к трем электродепо;
- в составе контура БКЛ всего 29 станций, из них: 17 пересадочных на действующие линии метрополитена; две пересадочные на строящиеся линии метрополитена.

По итогам суммирования измеренных по спутниковой карте протяженностей перегонов определена общая протяженность замкнутой БКЛ. Она составила 60 561 м. Это, для сравнения, на 6000 м больше протяженности трассы Московского центрального кольца (МЦК).

При известной протяженности БКЛ по формуле (1) рассчитано время прохождения одним поездом полного круга (время полного оборота для линий с кольцевой топологией) при средних скоростях (по всему метрополитену) 40 км/ч, 50 км/ч, 60 км/ч.

Так, время полного оборота на БКЛ при средней скорости движения единиц электроподвижного состава 40 км/ч составляет 1:31:00, со средней скоростью движения единиц электроподвижного состава 50 км/ч – 1:12:45, со средней скоростью движения единиц электроподвижного состава 60 км/ч – 1:00:30.

В условиях, при которых невозможно получение точного набора исходных данных из открытых источников после проведения расчета указанного выше набора сведений, рационально остановиться на величине общего времени хода по линии, равной 1:14:45, т. е. на допущении, при котором во всех последующих расчетах используется усредненное значение времени хода по линии фиксированной протяженности. Точных данных о том, с какой средней скоростью будут следовать составы по БКЛ, в настоящем момент нет, но и неопределенность отсутствует благодаря наличию в Москве аналогичной действующей трассы с кольцевой топологией.

Оценивая опыт работы единиц электроподвижного состава на трассе МЦК, где интервалы движения поездов составляют 4 минуты, можно заметить, что время хода по линии составляет 1:28:00. На метрополитене интервалы движения поездов составляют 1,5–2 минуты. Согласно проведенным измерениям, БКЛ на 6 км больше МЦК, потому и время хода должно оказаться сопоставимо больше, чем 1:28:00, но незначительно. В связи с этим внутри имеющейся выборки данных по средним скоростям следует принять общее время хода по БКЛ равным 1:31:00, а среднюю скорость движения поездов по метрополитену равным соответственно 40 км/ч.

Помимо протяженностей перегонов БКЛ, выполнены и измерения протяженностей служебных соединительных ветвей (ССВ) между точками связи

перегонных тоннелей БКЛ с парковыми путями соответствующих электродепо БКЛ (табл. 1).

Руководствуясь терминологией, используемой инженерами-графистами и заложенной в систему «АРМ Графиста», в случае с электродепо «Замоскворецкое» и электродепо «Аминьевское» выход составов из депо и заход составов в депо планируется осуществлять через перегоны, расположенные между ближайшими к электродепо станциями. Протяженность ССВ рассчитана относительно этой точки перегона. Электродепо «Нижегородское» планируется связать не с перегоном, а с самой станцией, поэтому и расчет в этом случае выполнен от границы станции «Нижегородская».

В качестве опорной информации для составления бланка, предусматривающего построение ПГД поездов по БКЛ, используются сведения, взятые из базы данных Кольцевой линии Московского метрополитена. В перечне общих настроек ПГД этой базы данных, открытой в системе «АРМ Графиста», установлена максимальная высота рамки, в которую должен быть вписан ПГД при печати его на листе бумаги формата А0, величиной аналогичной той, которая выставлена для Замоскворецкой линии. Бланк для составления ПГД поездов по Замоскворецкой линии сегодня является наиболее информационно нагруженным. При использовании режима «Конструктор» в «АРМ Графиста» увеличено количество станций на линии, все они переименованы в соответствии со схемой, изображенной на рисунке 1. Координаты станций вычислены пропорционально измеренным протяженностям перегонов и внесены в базу данных.

В полученной обновленной базе данных визуально проверена корректность следования перегонов строго друг за другом в каждом из направлений после изменений, произошедших в таблице «Задания» по итогам выполненных в «АРМ Графиста» манипуляций в режиме «Конструктор». Проверка показала, что таблица «Задания» при использовании алгоритмов конструирования, заложенных в «АРМ Графиста», составлена верно. В строках базы данных, соответствующих перегонам БКЛ, введены их протяженности, времена хода в режимах часа пик и часа «непик».

В связи с тем, что в настоящей работе интерес представляет режим утреннего часа пик, в базу данных для режима часа «непик» внесены те же самые времена

**Таблица 1.** Протяженности ССВ от особых точек перегонов, расположенных между ближайшими станциями связи с электродепо, а также от станции, непосредственно связанной с электродепо, до электродепо БКЛ

Станции связи с электродепо	Название электродепо	Расстояние, м
«Варшавская», «Каховская»	«Замоскворецкое»	1549
«Нижегородская»	«Нижегородское»	2818
«Аминьевская», «Давыдково»	«Аминьевское»	1449



хода, что и для часа пик. Важно отметить, что проведенный анализ исходных данных, необходимых для построения ПГД поездов по каждой линии Московского метрополитена, позволил выявить подмножество линий метрополитена, на которых движение поездов по перегонам в рабочие дни в режимах часа пик и часа «непик» осуществляется с одинаковыми временами хода. Отсюда следует, что идентичность времен хода для режимов часа пик и часа «непик» не является ошибочной и/или противоречивой информацией, и поэтому она может быть использована в модели планирования перевозочного процесса на БКЛ. Времена плановых стоянок по всем станциям БКЛ выставлены равными максимально допустимым значениям – 30 секунд.

После ввода в базу данных исходной информации о временах хода по перегонам и о стоянках на станциях появилась возможность использования «АРМ Графиста» для нужд дальнейшего развития модели планирования движения поездов по БКЛ в качестве системы автоматизированной коррекции введенных данных. Это возможно благодаря тому, что в «АРМ Графиста» интегрированы условия контроля реализуемости ПГД [60–62], позволяющие оперативно выявлять типовые ошибки в исходных данных и исправлять их.

Переход к следующему этапу работы – это начало моделирования: при известных исходных сведениях о временах хода по перегонам и стоянках на станциях появляется возможность определения ресурсов линии метрополитена, способствующих реализации желаемых показателей качества составления ПГД.

### **3. Автоматизированная коррекция введенных данных. Предварительный этап имитационного моделирования в автоматизированной системе «АРМ Графиста»**

Предварительный этап моделирования заключается в автоматизированной коррекции сведений, введенных в базу данных, а также в дополнении их связанной информацией. К настоящему моменту в базе данных содержатся сведения о временах хода по перегонам и стоянках на станциях. Далее необходимо определиться с заданной парностью движения поездов в утренний час пик.

После открытия бланка для построения ПГД пассажирских поездов по БКЛ, куда уже внесены все рассчитанные времена хода по перегонам и времена стоянок на станциях, можно воспользоваться инструментом «Окно размеров движения» для мониторинга потребных ресурсов, в частности для определения количества маршрутов, которые должны обслуживать линию в утренний час пик (рис. 5).

В инструмент «Окно размеров движения» заложены алгоритмы, использующие формулу (2), необходимую для расчета межпоездного интервала через известную величину заданной парности движения [63]:

$$J_i = \frac{3600}{N_i}, \quad (2)$$



где  $J_i$  – интервал движения поездов в  $i$ -м размере движения (одном часе работы метрополитена);  $N_i$  – парность движения поездов в  $i$ -м размере движения.

В данной работе составляется модель ПГД, а не ПГД-документ, подлежащий согласованию в службах метрополитена, поскольку реальные сведения о заданной парности движения поездов по БКЛ отсутствуют. Однако известно, что в утренний час пик желательно организовать движение поездов с минимальным интервалом попутного следования, равным 90 секунд. Таким образом, значение парности движения поездов в утренний час пик рассчитывается через заданную величину интервала (3) – решается обратная задача по отношению к формуле (2):

$$N_i = \frac{3600}{J_i}. \quad (3)$$

Окно размеров движения

Размер	Nз	Nф	J	Tпо	M	По I пути	По II пути	Всего	Пик
5 - 6	10	0	0:06:00	1:45:45	20	0	0	0	Нет
6 - 7	26	0	0:02:20	1:45:45	90	0	0	0	Нет
7 - 8	40	0	0:01:30	1:45:45	140	0	0	0	Да
8 - 9	40	0	0:01:30	1:45:45	140	0	0	0	Да
9 - 10	28	0	0:02:10	1:45:45	98	0	0	0	Нет
10 - 11	22	0	0:02:45	1:45:45	76	0	0	0	Нет
11 - 12	20	0	0:03:00	1:45:45	70	0	0	0	Нет
12 - 13	20	0	0:03:00	1:45:45	70	0	0	0	Нет
13 - 14	20	0	0:03:00	1:45:45	70	0	0	0	Нет
14 - 15	24	0	0:02:30	1:45:45	84	0	0	0	Нет
15 - 16	28	0	0:02:10	1:45:45	98	0	0	0	Нет
16 - 17	38	0	0:01:35	1:45:45	134	0	0	0	Нет
17 - 18	39	0	0:01:30	1:45:45	140	0	0	0	Да
18 - 19	35	0	0:01:45	1:45:45	120	0	0	0	Да
19 - 20	25	0	0:02:25	1:45:45	88	0	0	0	Нет
20 - 21	19	0	0:03:10	1:45:45	66	0	0	0	Нет
21 - 22	15	0	0:04:00	1:45:45	52	0	0	0	Нет
22 - 23	12	0	0:05:00	1:45:45	42	0	0	0	Нет
23 - 0	9	0	0:06:40	1:45:45	32	0	0	0	Нет
0 - 1	9	0	0:06:40	1:45:45	32	0	0	0	Нет
1 - 2	1	0	1:00:00	1:45:45	2	0	0	0	Нет

Сбросить | Сохранить

**Рис. 5.** Экранная форма «Окно размеров движения», позволяющая определить требуемое количество маршрутов ( $M$ ), необходимых на линии в утренний час пик и в соседних процессах ПГД с учетом заданной парности/желаемого интервала попутного следования поездов

Инструмент «Окно размеров движения» подсказывает, что при введенных исходных параметрах, необходимых для достижения величины интервала попутного следования поездов, равной 90 секунд, и при рассчитанной парности движения величиной в 40 пар поездов, необходимо иметь в наличии 140 маршрутов.

К текущему моменту собраны и введены в базу данных уже две составляющие исходных сведений, необходимых для автоматизированного составления ПГД поездов по замкнутой БКЛ.

Можно перейти ко вводу в базу данных третьей составляющей – сведений о ремонтах, осмотрах, длительностях их проведения, а также местах проведения ремонтно-диагностических мероприятий.

Маршруты, как правило, осматриваются и ремонтируются в электродепо, к которым они приписаны. Отсюда следует, что необходимо организовать в базе данных связку электродепо со 140 единицами электроподвижного состава.

В работе проводится аналогия с Кольцевой линией Московского метрополитена при сборе данных, необходимых для автоматизированного составления ПГД поездов по замкнутой БКЛ. В процессе моделирования желаемое множество маршрутов перераспределяется между двумя частями одного физического электродепо. Фактически формулируется допущение о том, что на БКЛ работает одно электродепо (для рассмотрения в рамках модели выбрано электродепо «Нижегородское»).

Реальных ситуаций, когда одно электродепо содержит и обслуживает 140 единиц электроподвижного состава, не существует. Предполагается, что сформулированное условие, заложенное в модель перевозочного процесса по БКЛ, в дальнейшем позволит оценить рациональное соотношение между количеством маршрутов, которые должны отправляться на ночную расстановку в электродепо, и количеством маршрутов, расставляемых на ночь на линии.

Переход к рассмотрению сразу трех электродепо на БКЛ в рамках модели планируется лишь после того, как будет получен какой-либо результат построения ПГД с одним электродепо. Составление модели ПГД линии с кольцевой топологией, обслуживаемой сразу тремя электродепо, – революционный шаг для заложенных в «АРМ Графиста» алгоритмов автоматизированного построения ПГД. Ввод в существующую модель сразу трех электродепо будет серьезным возмущающим фактором, который в состоянии вывести систему «АРМ Графиста» из работоспособного состояния – нарушить устойчивость заложенных в нее алгоритмов.

Один то, что количество маршрутов на БКЛ впервые для Московского метрополитена превысит 100 единиц, заставило внести несколько изменений в код программного обеспечения, поскольку ранее во избежание влияния негативного человеческого фактора, связанного с ошибочным вводом пользователем номера маршрута, в «АРМ Графиста» была заложена защита от ввода оператором трехзначных номеров маршрутов. Попытки сделать это завершались запросом системы, обращенным к оператору, на повторный ввод номера маршрута. В но-

вой версии «АРМ Графиста» это ограничение упразднено и сформулировано иначе.

Покажем далее готовность к эволюционному развитию модели ПГД. Оправдаем градообразующее решение о том, что необходимо иметь в наличии именно три электродепо на линии (сооружение двух новых и реконструкция существующего). Определим, какое количество маршрутов (в пределе) может обслуживаться современным электродепо метрополитена. Интерес представляет и среднее значение маршрутов, приписанных к одному электродепо. Эти показатели могут быть получены в результате анализа ресурсов всех действующих электродепо Московского метрополитена (табл. 2).

В таблице 2 дополнительно введены следующие краткие обозначения:  $\Sigma$  – количество маршрутов, приписанных к электродепо;  $R$  – диапазон маршрутов, приписанных к электродепо;  $W$  – количество парковых путей в электродепо; \* – показатели до закрытия электродепо; \*\* – электродепо рассчитано на 30 составов; \*\*\* – электродепо рассчитано на 47 составов; \*\*\*\* – электродепо рассчитано на 40 составов; \*\*\*\*\* – электродепо рассчитано на 38 составов; \*\*\*\*\* – электродепо рассчитано на 31 состав.

Анализ таблицы показывает, что среднее количество парковых путей в электродепо составляет 30, среднее количество приписанных к электродепо маршрутов – 38. Максимально известное количество парковых путей на метрополитене – 49, максимальное количество маршрутов, приписанных к одному электродепо, – 62.

Следует заметить, что электродепо «Варшавское» и электродепо «Замоскворецкое» расположены в одной технической зоне – между Варшавским шоссе и путями Павелецкого направления Московской железной дороги (МЖД), а расстояние между расположенными друг напротив друга торцами электродепо составляет не более 330 м. Это обстоятельство позволяет прогнозировать, что после реконструкции к электродепо «Замоскворецкое» можно будет приписать 62 маршрута. При этом получается, что между строящимися электродепо «Аминьевское» и «Нижегородское» должны распределиться 78 маршрутов. Если это распределение выполнить равномерно, то в каждом должно оказаться 39 маршрутов, что укладывается в рамки выявленного среднего значения принадлежности маршрутов одному электродепо метрополитена. Решение о строительстве двух новых электродепо и реконструкции одного существующего для нужд БКЛ оправданно. Двух электродепо для обслуживания линии такого масштаба недостаточно.

Далее показаны шаги моделирования ПГД поездов по замкнутой БКЛ с одним электродепо. На исполнение запускаются алгоритмы автоматизированного построения ПГД, заложенные в «АРМ Графиста». После выбора подготовленной для нужд моделирования базы данных открывается «Задатчик». «Задатчиком» в системе назван инструмент «Параметры автоматизированного построения ПГД».

**Таблица 2.** Ресурсы действующих электродепо Московского метрополитена

Код	Обслуживаемая линия	Название	Дата ввода в эксплуатацию	$W$	$R$	$\Sigma$
ТЧ-1	Сокольническая	«Северное»	26.04.1935	22	1–39	39
ТЧ-2	Замоскворецкая	«Сокол»	10.09.1938	25	41–80	40
ТЧ-3	Арбатско-Покровская	«Измайлово»	14.01.1950	28	1–33	33
ТЧ-4	Кольцевая	«Красная Пресня»	01.04.1954	28	1–36	36
ТЧ-5	Калужско-Рижская	«Калужское»	13.10.1962	49	38–78	41
ТЧ-6	Таганско-Краснопресненская	«Планерное»	28.12.1985	41	39–79	41
ТЧ-7	Каховская (КхЛ), Замоскворецкая (ЗЛ)	«Замоскворецкое»	10.07.1969– 10.04.2021	28*	1–40 (ЗЛ)* и 73–78* (КхЛ)	46*
ТЧ-8	Серпуховско-Тимирязевская (СТЛ), Бутовская (БЛ)	«Варшавское»	04.11.1983	29	1–45 (СТЛ) и 82–98 (БЛ)	62
ТЧ-9	Филёвская	«Фили»	01.01.1962	29	1–16, 18, 19, 51–55	23
ТЧ-10	Калужско-Рижская	«Свиблово»	30.09.1978	28	1–37	37
ТЧ-11	Таганско-Краснопресненская	«Выхино»	31.12.1966	36	1–38	38
ТЧ-12	Калининская	«Новогиреево»	30.12.1979	23	1–32	32**
ТЧ-13	Сокольническая	«Черкизово»	24.06.1989	21	40–72	32
ТЧ-14	Серпуховско-Тимирязевская	«Владыкино»	01.03.1991	39	39–81	42****
ТЧ-15	Люблинско-Дмитровская	«Печатники»	28.12.1995	39	1–35	35
ТЧ-16	Арбатско-Покровская	«Митино»	16.06.2015	30	40–81	42
ТЧ-17	Замоскворецкая	«Братеево»	15.01.2014	16	1–40	40
ТЧ-18	Солнцевская (СолЛ), Большая кольцевая (БКЛ)	«Солнцево»	30.08.2018	27	1–30 (СолЛ), 40–56 (БКЛ)	47****
ТЧ-19	Люблинско-Дмитровская	«Лихоборы»	11.06.2018	42	38–74	36*****
ТЧ-20	Некрасовская	«Руднёво»	03.06.2019	38	1–20	20*****

«Параметры автоматизированного построения ПГД» – это экранная форма, которая является панелью управления для внесения исходных данных, необходимых для нормальной работы алгоритмов автоматизированного построения ПГД. На этом этапе можно менять такие настройки, как тип ПГД, схема перебора вариантов при построении ПГД, схема построения одного варианта ПГД, установка режимов счетчиков без фактического построения реализуемых вариантов ПГД, тип ночной расстановки при выходе составов и заходе составов и др. (рис. 6).

«Задатчик» по умолчанию настроен на работу с линиями, обладающими кольцевой топологией, потому достаточно только нажатия на кнопку «Применить» на ранних этапах моделирования ПГД.

Параметры автоматизированного построения ПГД

Общие

1. Загрузить график оборота из БД?

2. График на  рабочие дни  воскресные дни

3. Построение  в прямом времени  в обратном времени

4. Тип графика  основной  дополнительный  вставка

Перебор вариантов

Пропустить съём после утр. пика

Пропустить ввод перед веч. пиком

Схема построения

Пошаговая  Вложенная

Только первые

Использовать значения по умолчанию

Значения для переходных процессов

Выход из ночной расстановки

Тип расстановки  сложная  нечётная  чётная

Закрепить начало нитки?

Выводить первые поезда в прямом времени?

Перебрать все варианты?

Игнорировать расчёт н.р.?

Уход на ночную расстановку

Тип расстановки  сложная  нечётная  чётная

Перебрать все варианты?

Игнорировать расчёт н.р.?

Игнорировать перебор при ночной расстановке?

Перейти к варианту по вектору-коду

Остановиться не ранее  реализации

**Рис. 6.** Экранная форма «Параметры автоматизированного построения ПГД», необходимая для ввода исходных данных перед запуском алгоритмов автоматизированного построения ПГД (для краткости именуемая «Задатчик»)



Параметры часа-пик

Время начала: 7:00:00      Количество составов на 1-ом пути: 70

Количество составов: 140      Количество составов на 2-ом пути: 70

Начинаем построение с 1-го пути       Начинаем построение со 2-го пути

Расчетный интервал 0:01:30 при парности 40

Начать построение      Отмена

**Рис. 7.** Экранная форма для контроля и редактирования исходных данных, необходимых для построения «ниток» утреннего часа пик

Первым после обработки всех необходимых сведений и после контроля реализуемости появляется диалог ввода параметров утреннего часа пик. Работать с ним можно только если система нашла соответствие между количеством маршрутов, содержащихся во всех электродепо, и заданной парностью. Даже если диалог и отобразился с правильным количеством поездов, соответствующим заданной парности, процесс построения может не пойти далее и выдать побуждающее сообщение о том, что указанное количество поездов невозможно разместить на линии.

Таким образом, следует предварительно позаботиться о том, чтобы в базе данных были корректно заполнены такие поля, как «ёмкость» электродепо, а также указаны ёмкости точек ночной расстановки. Суммарная ёмкость объектов, участвующих в ночной расстановке, должна быть не меньше количества маршрутов, обслуживающих линию в час пик.

В том случае, когда все условия выполнены, для построения «ниток» утреннего часа пик необходимо подтвердить распределение потребного количества маршрутов по главным путям линии и нажать на кнопку «Применить» (рис. 7).

Об успешном построении «ниток» в режиме час пик возвестит побуждающее сообщение, вслед за которым откроется диалоговое окно для контроля и редактирования исходных данных, необходимых для программной обработки «ниток», нацеленной на организацию равномерного ввода составов из депо перед утренним часом пик. Моделирование этого процесса находится за рамками рассмотрения в настоящей публикации, потому нажимаем на кнопку «Отмена» — отказываемся от построения процесса. Отказ переведет сценарий выполнения алгоритма автоматизированного построения ПГД на этап форма-

тирования и визуализации полученного результата. Спустя некоторое время ожидания на бланке ПГД поездов по замкнутой БКЛ отобразятся построенные «нити» утреннего часа пик.

#### **4. Результаты построения «ниток» утреннего часа пик на замкнутой Большой кольцевой линии Московского метрополитена**

Рассмотрим результат автоматизированного построения «ниток» ПГД в утренний час пик. Ниже на рисунках 8 и 9 представлены фрагменты работы «АРМ Графиста». Рисунок 8 показывает, к чему сходится автоматизированное построение справа от утреннего часа пик, рисунок 9 демонстрирует левую границу ПГД (левее сместить полосу прокрутки уже невозможно).

Следует отметить, что первые попытки продвинуться дальше и продолжить автоматизированное составление ПГД поездов по замкнутой БКЛ равномерным вводом составов перед утренним часом пик показали, что при использовании преимущественно ресурсов одного электродепо переходный процесс завершается за 15 минут до завершения утреннего часа пик. Это недопустимый результат. Полученное означает, что час пик не обеспечен необходимым количеством составов. Иными словами, не обеспечивается заданная парность движения поездов согласно размерам движения, соответствующим режиму часа пик.

Проведенный опыт дал отчетливое представление о том, что существенная часть нагрузки по организации ночной расстановки должна ложиться именно на станции и перегоны, а не на электродепо.

Важно отметить, что БКЛ запланирована и строится как полноценный пересадочный контур. Анализ схем станций, размещенных в открытых источниках, показал, что на линии строится большое количество станций, обладающих путевым развитием. Это хороший показатель для организации ночной расстановки. Он означает, что проблема организации ночной расстановки не осталась без внимания в процессе проектирования станционных комплексов и линии в целом.

Проведенное исследование и полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что имеющейся и создаваемой инфраструктуры БКЛ должно оказаться достаточно для размещения всех необходимых ресурсов с точки зрения организации перевозочного процесса.

Полученные результаты дают качественный рывок для дальнейшего исследования сложной линии метрополитена, обладающей кольцевой топологией и при этом с достаточно длительным временем полного оборота электроподвижного состава на ней. Составление полной модели ПГД поездов по БКЛ планируется к моменту составления ПГД-документа, утверждаемого Службами метрополитена. Существует мнение, что модель ПГД предоставит множество подсказок инженерам-графистам.

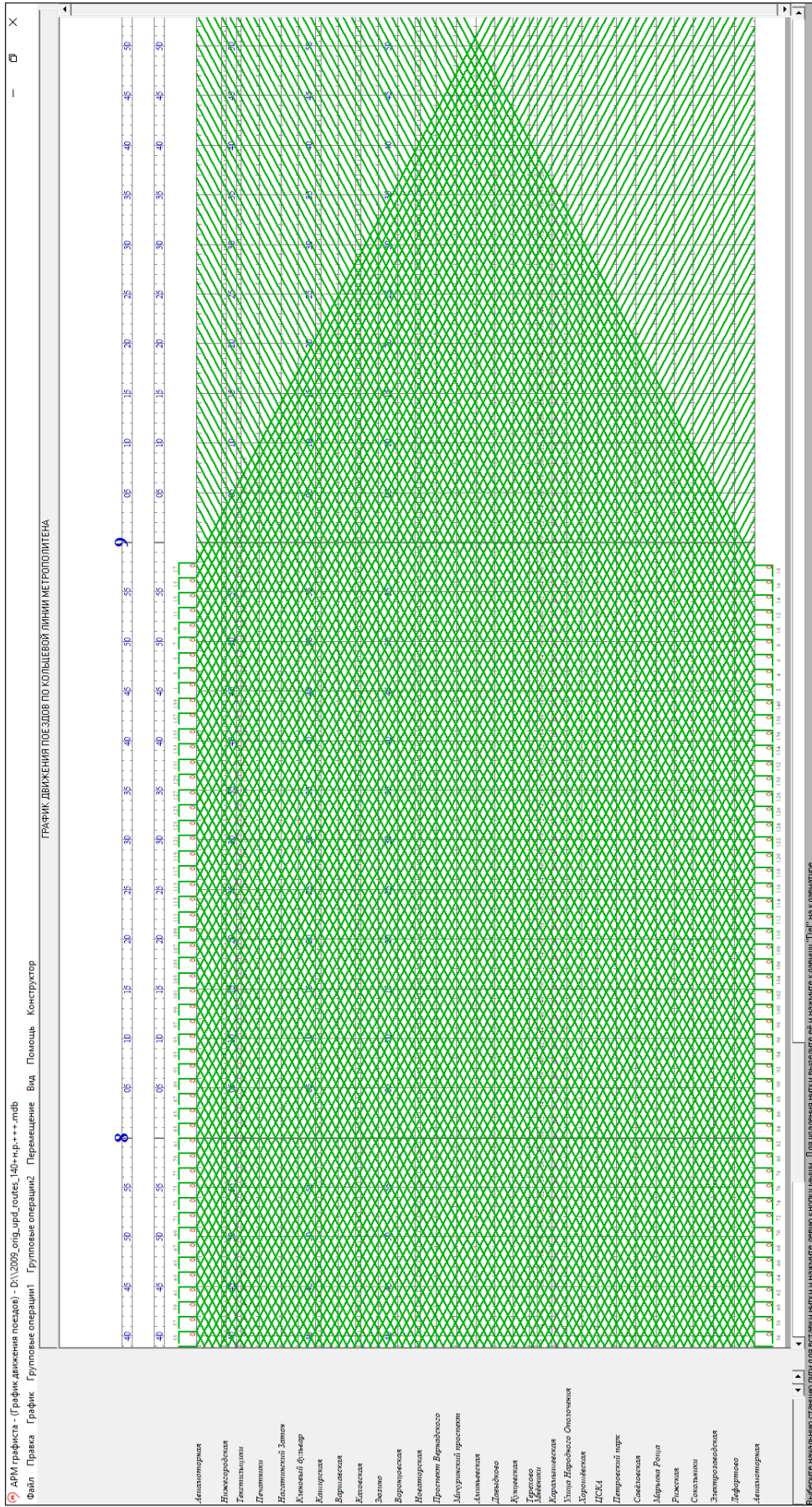
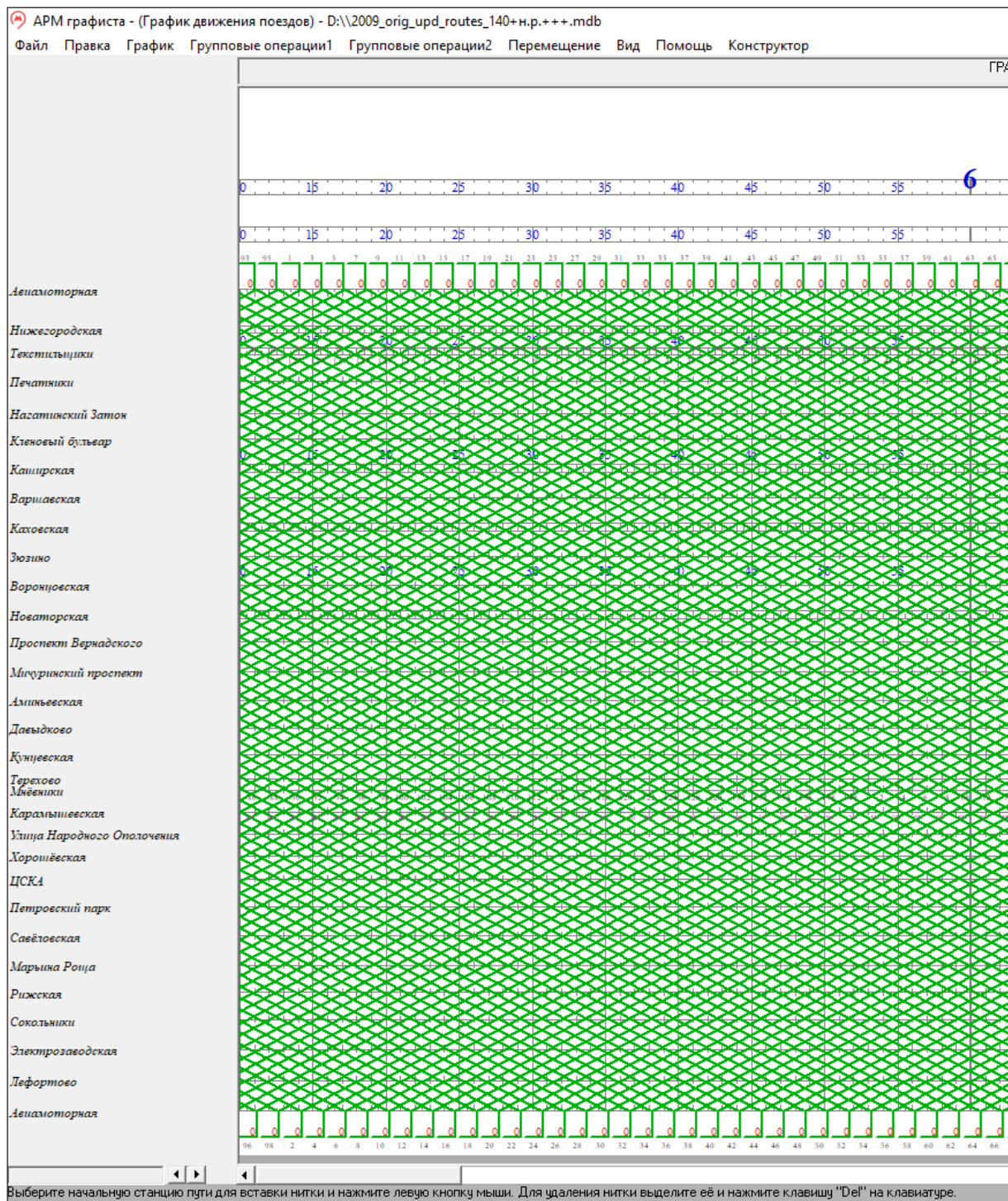


Рис. 8. «Нитки» режима часа пик на БКЛ, полученные в результате запуска алгоритмов автоматизированного построения ПГД





**Рис. 9.** По завершении построения «ниток» в режиме утреннего часа пик предыдущие «нитки» равномерно заполняют все размеры движения, предшествующие утреннему часу пик, обеспечивая реализуемость алгоритмов равномерного ввода составов на час пик

## Заключение

В статье предложен способ моделирования ПГД пассажирских поездов по перспективным (строящимся) линиям метрополитена в условиях отсутствия четко сформулированных исходных данных, необходимых для запуска алгоритмов автоматизированного построения ПГД на примере Большой кольцевой линии, являющейся полноценным третьим пересадочным контуром. Изложенный способ моделирования позволяет при использовании разработанной на кафедре «Управление и защита информации» автоматизированной системы построения плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена («АРМ Графиста») аналитически определять рациональные значения входных параметров, необходимых для получения эффективных результатов работы системы. Контроль корректности ввода исходных данных становится элементом прогнозирования складывающейся ситуации на различных этапах моделирования и соответственно в процессе исполнения алгоритмов автоматизированного составления ПГД.

В ходе исследования планируемых ресурсов БКЛ проведено и детальное рассмотрение всех существующих электродепо всех действующих линий Московского метрополитена. Показано, что оправданным шагом является интеграция трех электродепо в структуру Москвы для обслуживания БКЛ, при том, что большинство действующих линий Московского метрополитена обслуживается не более чем двумя электродепо.

В работе экспериментально, с использованием действующего программного обеспечения «АРМ Графиста», показано, как поэтапно запускать автоматизированное построение процесса часа пик с учетом ограничений, установленных в системе для контроля реализуемости и реализации, и как перейти к анализу результата и данных, необходимых для построения последующих процессов ПГД, таких как автоматизированный равномерный ввод составов перед утренним часом пик.

Полученные результаты моделирования ПГД могут быть полезны инженерам-графистам, которые в 2022 году приступят к построению нормативных документов, регламентирующих план перевозочного процесса по БКЛ, при использовании в качестве исходных данных значений заданной парности движения поездов, выданных городом в качестве задания на построение эффективного ПГД.

## Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-37-51001 (заявка 2020 года): «Разработка моделей и методов оптимизации производственных ресурсов городских рельсовых транспортных систем (ГРТС) на основе технологии больших данных (*bigdata*)».



## Библиографический список

1. Московский метрополитен [Электронный ресурс]: Метрополитен в цифрах. – URL: <https://www.mosmetro.ru/press/digits/> (дата обращения: 28.05.2021).
2. *Пронин В. А.* Организация работы станций на Московском метрополитене: методические указания / В. А. Пронин. – М.: Транспорт, 1975. – 72 с.
3. *Бакулин А. С.* Организация движения поездов и работа станций метрополитена: учебник для подготовки рабочих на производстве / А. С. Бакулин, В. А. Пронин, Е. А. Фёдоров, К. И. Кудринская. – М.: Транспорт, 1981. – 230 с.
4. *Сафронов А. И.* Методика автоматизированного построения планового графика движения поездов метрополитена / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Мир Транспорта. – 2011. – Т. 9. – № 3 (36). – С. 98–105.
5. *Астрахан В. И.* Алгоритмизация процесса составления графика движения поездов метрополитена / В. И. Астрахан, А. И. Жербина // Труды МИИТа. – М.: МИИТ, 1975. – № 492. – С. 99–105.
6. *Баранов Л. А.* Построение на ЭВМ графика движения поездов метрополитена / Л. А. Баранов, А. И. Жербина // Вестник ВНИИЖТа. – М.: ВНИИЖТ, 1981. – № 2. – С. 17–20.
7. *Феофилов А. Н.* Математическая модель составления графиков движения поездов на линиях метрополитена / А. Н. Феофилов // Вестник ВНИИЖТ. – 1991. – № 7. – С. 10–13.
8. *Сидоренко В. Г.* Автоматизация построения планового графика движения поездов метрополитена / В. Г. Сидоренко // Автоматизация и современные технологии. – 2003. – № 2. – С. 6–10.
9. *Christian S.* Railway scheduling problems and their decomposition / S. Christian // Osnabruck. – 2007. – 123 p.
10. *Bruker P.* Scheduling Algorithms / P. Bruker. – Leipzig: Springer, 2007. – 371 p.
11. *Zhao J.* A genetic-algorithm-based approach for scheduling the renewal of railway track components / J. Zhao, A. H. C. Chan, M. P. N. Burrow // Rail Rapid Transit. – 2009. – № 223. – Pp. 533–541.
12. *Mišauskaitė I.* Algorithm for Optimal Supplement of Train Traffic Schedule in Automatizavimas, Robototechnika / I. Mišauskaitė, V. Bagdonas // Electronic and electrical engineering. – 2006. – Vol. 125. – № 7 (71). – Pp. 43–46.
13. *Shahrzad M. P.* Towards Signalling Maintenance Scheduling for European Railway Traffic Management System / M. P. Shahrzad, M. R. Kourosh // DTU Management Engineering. – 2017. – 223 p.
14. *Сафронов А. И.* Классификационный анализ мероприятий в рамках сопровождения автоматизированной системы построения плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена и аналогичных систем / А. И. Сафронов, М. А. Чжо // X Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в промышленности, логистике и социальной сфере» (ITI\*2019): тезисы докладов, Минск, 23–24 мая 2019 г. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2019. – 270 с. – ISBN 978-985-7198-01-6.
15. *Сеславин А. И.* Градиентный способ централизованного управления городскими транспортными системами / А. И. Сеславин, Л. Н. Воробьева // Наука и техника транспорта. – 2005. – № 2. – С. 71–73.
16. *Сидоренко В. Г.* Методы выравнивания интервалов движения поездов метрополитена / В. Г. Сидоренко, Е. Ю. Рындина // ВЕСТНИК МИИТа. – 2008. – Вып. 18. – С. 8–10.
17. *Сафронов А. И.* Автоматизированное построение планового графика движения пассажирских поездов метрополитена / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Вестник РГУПС. – 2012. – № 3. – С. 99–104.

18. *Сидоренко В. Г.* Применение современных технологий программирования к автоматизации планирования движения поездов метрополитена / В. Г. Сидоренко, А. И. Сафонов, К. М. Филипченко, М. А. Чжо // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2. – № 3. – С. 331–347.
19. *Almaalei N. N. H.* Review of ACO algorithm on network and scheduling problem / N. N. H. Almaalei, S. N. A. M. Razali // Compusoft. – 2019. – Vol. 8. – № 7. – Pp. 3250–3260.
20. *Trivedi P.* Componentry analysis of intelligent transportation systems in smart cities towards a connected future / P. Trivedi, F. Zulkernine // 22nd IEEE International conference on high performance computing and communications, 18th IEEE International conference on smart city and 6th IEEE International conference on data science and systems, HPCC-SMARTCITY-DSS 2020. – 2020. – Pp. 1073–1079.
21. *Yang M.* The sustainable development of modern railway transportation planning and management under the guidance of COM technology / M. Yang, A. Long // 7th International symposium on innovation and sustainability of modern railway, ISMR 2020. – 2020. – Pp. 336–348.
22. *Boroun M.* An efficient heuristic method for joint optimization of train scheduling and stop planning on double-track railway systems / M. Boroun, S. Ramezani, N. V. Farahani, E. Hassannayebi, S. Abolmaali, M. Shakibayifar // INFOR: Information Systems and Operational Research. – 2020. – Vol. 58. – № 4. – Pp. 652–679.
23. *Kim H. J.* Determination of necessary subsidiary track according to train operation frequency in a heterogeneous train pattern / H. J. Kim // APPLIED SCIENCES (SWITZERLAND). – 2020. – Vol. 10. – № 12. – Pp. 41–46.
24. *Shakibaei S.* A multi-objective optimisation model for train scheduling in an open-access railway market / S. Shakibaei, P. Alpkokin, J. A. Black // Transportation planning and technology. – 2021. – Vol. 44. – № 2. – Pp. 176–193.
25. *Dalapati P.* Optimal scheduling for delay management in railway network using hybrid bat algorithm / P. Dalapati, K. Paul // Lecture notes in electrical engineering. – 2021. – Vol. 702. – Pp. 91–103.
26. *Long X.* Optimum multi-level maintenance scheduling model for metro vehicles with delay time theory / X. Long, G. Liu, S. Chen, H. Peng, S. Liu // Tiedao xuebao. – 2021. – Vol. 43. – № 2. – Pp. 30–36.
27. *Cavalcante C. A. V.* Inspection and replacement policy with a fixed periodic schedule / C. A. V. Cavalcante, R. S. Lopes, P. A. Scarf // Reliability engineering & system safety. – 2021. – Vol. 208. – DOI:10.1016/j.ress.2020.107402.
28. *Маркевич А. В.* Автоматизация управления распределением трудовых ресурсов с использованием генетического алгоритма / А. В. Маркевич, В. Г. Сидоренко // Информатизация образования и науки. – 2019. – № 3 (43). – С. 36–49.
29. *Heil, J.* Railway crew scheduling: models, methods and applications / J. Heil, K. Hoffmann, U. Buscher // European journal of operational research. – 2020. – Vol. 283. – № 2. – Pp. 405–425.
30. *Wolniewicz Ł.* Evaluation of train crews schedule in terms of robustness / Ł. Wolniewicz // Journal of konbin. – 2019. – Vol. 49. – № 1. – Pp. 69–94.
31. *Сидоренко В. Г.* Применение параллельных вычислений при планировании логистических процессов / В. Г. Сидоренко, А. С. Петров // Информатизация образования и науки. – 2018. – № 2 (38). – С. 51–61.
32. *Passchyn W.* Scheduling parallel batching machines in a sequence / W. Passchyn, F. C. R. Spieksma // Journal of scheduling. – 2019. – Vol. 22. – № 3. – Pp. 335–357.
33. *Wu Q.* Parallel computing in railway research / Q. Wu, M. Spiryagin, C. Cole, T. McSweeney // International journal of rail transportation. – 2020. – Vol. 8. – № 2. – Pp. 111–134.

34. *Akhmetov B.* Algorithm of parallel data processing in the automated dispatcherization system of railway transport movement / B. Akhmetov, G. Yerkeldessova, T. Sarzhanov, G. Musayeva, V. Lakhno // *Journal of theoretical and applied information technology.* – 2019. – Vol. 97. – № 9. – Pp. 2491–2502.
35. *Сидоренко В. Г.* Метод эффективного планирования обслуживания с применением теории графов/В. Г. Сидоренко, К. М. Филипченко // *Информатизация образования и науки.* – 2015. – № 4 (28). – С. 123–132.
36. *Сидоренко В. Г.* Применение генетических алгоритмов к решению задачи планирования работы электроподвижного состава метрополитена/В. Г. Сидоренко, М. А. Чжо // *Электроника и электрооборудование транспорта.* – 2016. – № 6. – С. 13–16.
37. *Kyaw M. A.* The Application of Genetic Algorithms for the Scheduling of Electric Rolling Stock Maintenance/М. А. Kyaw, V. G. Sidorenko, A. I. Safronov, V. G. Buchirin // *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus).* – 2019. – Pp. 2148–2151.
38. *Сидоренко В. Г.* Архитектура многопоточного программного продукта, реализующего планирование логистических процессов/В. Г. Сидоренко, А. С. Петров // *Информатизация образования и науки.* – 2020. – № 1 (45). – С. 25–38.
39. *Сидоренко В. Г.* Синтез планового графика движения зонного типа/В. Г. Сидоренко, М. В. Новикова // *Мир транспорта.* – 2010. – № 4. – С. 128–134.
40. *Hu H.* A multi-objective train-scheduling optimization model considering locomotive assignment and segment emission constraints for energy saving/Н. Hu, К. Li, X. Xu // *Journal of Modern Transportation.* – 2013. – № 21. – С. 9–16.
41. *Baranov L. A.* Energy-optimal control of vehicle traffic/L. A. Baranov, V. M. Maksimov, N. A. Kuznetsov // *Russian Electrical Engineering.* – 2016. – vol. 87. – № 9. – pp 498–504.
42. *Искаков Т. А.* Подходы к оценке качества планирования и управления движением пассажирских поездов метрополитена // Т. А. Искаков, А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко, М. А. Чжо // *Автоматика на транспорте.* – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 38–63.
43. *Wu Z.* Calculating vulnerability index of urban metro systems based on satisfied route/Z. Wu, J. Sun, R. Xu // *Physica A: statistical mechanics and its applications.* – 2019. – Vol. 531. – DOI:10.1016/j.physa.2019.121722.
44. *Palte M. H. A.* Smartfleet, how «smart» rail vehicles help improve business/M. H. A. Palte // *5th IET Conference on Railway Condition Monitoring and Non-Destructive Testing (RCM 2011).* – 2011. – Pp. 1–4.
45. *Noah J. G.* Ethical Decision Making During Automated Vehicle Crashes/J. G. Noah // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.* – 2014. – № 2424. – Pp. 58–65.
46. *Forsgren M.* Using timetabling optimization prototype tools in new ways to support decision making / M. Forsgren, M. Aronsson, S. Gestrelus, H. Dahlberg // *Computers in Railways XIII: Computer System Design and Operation in the Railway and Other Transit Systems: WIT Press.* – 2012. – Pp. 439–450.
47. *Баранов Л. А.* Обеспечение безопасности движения поездов в беспилотных транспортных системах/Л. А. Баранов // *Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления.* – 2019. – С. 1995–1999.
48. *Баранов Л. А.* Централизованное управление движением поездов городских железных дорог современного мегаполиса/Л. А. Баранов, Е. П. Балакина, С. Е. Иконников, Д. А. Антонов // *Наука и техника транспорта.* – 2020. – № 1. – С. 30–38.
49. *Баранов Л. А.* Методы повышения безопасности движения поездов городских железных дорог в условиях централизованного автоматического управления/Л. А. Баранов,

- Е. П. Балакина // Материалы XXVIII международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». Под общей редакцией А. О. Калашникова, В. В. Кульбы. – 2020. – С. 297–302.
50. *Baranov L. A.* The disturbances prediction in the systems of automatic train traffic control of urban transport systems/*L. A. Baranov, E. P. Balakina, A. I. Godyaev* // International multi-conference on industrial engineering and modern technologies, FarEastCon. – 2020. – Pp. 1–4. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271390.
51. *Баранов Л. А.* Беспилотные транспортные средства городского железнодорожного транспорта: управление и обеспечение безопасности движения/*Л. А. Баранов, С. Е. Иконников* // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции «Актуальные проблемы техносферной безопасности». – 2019. – С. 39–41.
52. *Баранов Л. А.* Беспилотная система управления движением поездов как составляющая цифровизации городского транспорта/*Л. А. Баранов* // Автоматика на транспорте. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 441–449.
53. *Баранов Л. А.* Интеграционный подход в обучении оперативных работников городских рельсовых транспортных систем/*Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, Е. П. Балакина, Л. Н. Логинова* // Наука и техника транспорта. – 2021. – № 2. – С. 22–31.
54. *Баранов Л. А.* Интеллектуальное централизованное управление движением внеуличного городского железнодорожного транспорта в условиях интенсивного движения/*Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, Е. П. Балакина, Л. Н. Логинова* // Надёжность. – 2021. – Т. 21, – № 2. – С. 17–23.
55. Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы. [Электронный ресурс]: Гольяново URL: [https:// stroi.mos.ru/metro/station/97](https://stroj.mos.ru/metro/station/97) (дата обращения: 06.07.2021).
56. Старые карты городов России и зарубежья. [Электронный ресурс]: Как изменялись границы Москвы URL: [http:// retromap.ru/forum/viewtopic.php?p=255](http://retromap.ru/forum/viewtopic.php?p=255) (дата обращения: 06.07.2021).
57. *Минаев Г. И.* Правила технической эксплуатации метрополитенов РФ/*Г. И. Минаев, С. Б. Сухов, А. Г. Фёдоров, М. В. Фурсаев, С. Н. Мизгиев.* – М.: ЗАО Издательский центр ТА Инжиниринг. – 2003. – 109 с.
58. *Sauder R. L.* Computer Aided Train Dispatching: Decision Support Through Optimization / *R. L. Sauder, W. M. Westerman* // Interfaces. – 1983. – Vol. 6. – № 13. – Pp. 24–37.
59. *Дробышев Ю. А.* Олимпиады по математике/*Ю. А. Дробышев* // М.: Экзамен. – 2021. – 144 с. ISBN 5–377–15817–2.
60. *Межох А. К.* Вопросы анализа реализуемости заданного графика движения поездов метрополитена/*А. К. Межох* // Тр. МИИТа. – 1977. – Вып. 550. – С. 54–57.
61. *Сафронов А. И.* Условия реализации и реализуемости при автоматизированном построении планового графика движения пассажирских поездов метрополитена/*А. И. Сафронов* // Неделя науки-2011. Наука транспорту: труды научно-практической конференции. – М.: МИИТ, 2011. – С. III–157–III–158.
62. *Сафронов А. И.* Сценарное пространство построения планового графика движения поездов метрополитена/*А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко* // Наука и техника транспорта. – 2012. – № 1. – С. 51–56.
63. *D’Acierno L.* Defining Reserve Times for Metro Systems: An Analytical Approach/*L. D’Acierno, M. Botte, M. Gallo, B. Montella* // Journal of Advanced Transportation. – 2018. – Pp. 1–15. DOI: 10.1155/2018/5983250.



**A. I. Safronov**

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

**E. V. Lysenko**

*Talent management,  
Russian University of Transport, Moscow*

**MODELING THE PLAN OF THE TRANSPORTATION PROCESS  
DURING THE MORNING RUSH HOUR ON THE CLOSED  
BOLSHAYA KOLTSEVAYA LINE OF THE MOSCOW METRO**

The article analyzes the characteristics of the construction of the Bolshaya Koltsevaya line (Large Circle Line) of the Moscow Metro from the point of view of the transportation process planning. The authors have studied the characteristics of all operating depots of the Moscow Metro that justify the plans for the construction of two new depots (Aminievsky and Nizhegorodsky), as well as the reconstruction of one of the existing depots (Zamoskvoretsky), located within the city limits of Moscow – inside the Moscow Automobile Ring Road (MKAD), in the vicinity of the Third Transport Ring and beyond. For the needs of modeling, the station-to-station length of the closed Bolshaya Koltsevaya line was measured, subject to the transfer of a train traffic section from the Delovoy Tsentr station to the Khoroshevskaya station of the projected Rublyovo-Arkhangelskaya metro line. Based on the measurement findings, the station-to-station travel times along the closed Bolshaya Koltsevaya line were calculated, which subsequently made it possible to determine the number of electric rolling stock units required to service the Bolshaya Koltsevaya line in the morning rush hour.

Train timetable; electric rolling stock turnover schedule; automation; transportation process scheduling; subway; modeling; electric depot

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-584-616

**References**

1. Moskovskiy metropoliten [Moscow Metro] [Electronic resource]: Metropoliten v tsifrakh [Metro Figures] URL: <https://www.mosmetro.ru/press/digits/> (Accessed: May 28, 2021).
2. *Pronin V.A.* Organizatsiya raboty stantsiy na Moskovskom metropolitene: metodicheskiye ukazaniya [Organization of Moscow Metro Stations Operation: Guidelines]. Moscow, Transport Publ., 1975, 72 p. (In Russian)
3. *Bakulin A. S., Pronin V.A., Fyodorov E. A. & Kudrinskaya K. I.* (1981) Organizatsiya dvizheniya poyezdov i rabota stantsiy metropolitena [Organization of train traffic and work of metro stations]. Uchebnik dlya podgotovki rabochikh na proizvodstve [Textbook for training workmen]. Moscow, Transport Publ., 230 p. (In Russian)
4. *Safronov A. I. & Sidorenko V. G.* (2011) Metodika avtomatizirovannogo postroyeniya planovogo grafika dvizheniya poyezdov metropolitena [Methods of automated subway train traffic scheduling]. Mir transporta [World of Transport and Transportation], vol. 9, no. 3 (36), pp. 98–105. (In Russian)
5. *Astrakhan V.I. & Zherbina A. I.* (1975) Algoritmizatsiya protsessa sostavleniya grafika dvizheniya poyezdov metropolitena [Algorithm development of scheduling the movement of subway trains]. Proceedings of MIIT, Moscow, MIIT, no. 492, pp. 99–105. (In Russian)



6. *Baranov L. A. & Zherbina A. I. (1981)* Postroyeniye na EVM grafika dvizheniya poyezdov metropolitena [Computer-based subway train traffic scheduling]. Vestnik VNIIZhT [Bulletin of the Railway Research Institute], Moscow, VNIIZhT, no. 2, pp. 17–20. (In Russian)
7. *Feofilov A. N. (1991)* Matematicheskaya model' sostavleniya grafikov dvizheniya poyezdov na liniyakh metropolitena [Mathematical model for subway lines train traffic scheduling]. Vestnik VNIIZhT [Bulletin of the Railway Research Institute], no. 7, pp. 10–13. (In Russian)
8. *Sidorenko V. G. (2003)* Avtomatizatsiya postroyeniya planovogo grafika dvizheniya poyezdov metropolitena [Automation of planned subway train traffic scheduling]. Avtomatizatsiya i sovremennyye tekhnologii [Automation and Modern Technologies], no. 2, pp. 6–10. (In Russian)
9. *Christian S. (2007)* Railway scheduling problems and their decomposition/S. Christian//Osnabruck, 123 p.
10. *Bruker P. (2007)* Scheduling Algorithms/P. Bruker//Leipzig: Springer. 371 p.
11. *Zhao J. (2009)* A genetic-algorithm-based approach for scheduling the renewal of railway track components / J. Zhao, A. H. C. Chan, M. P. N. Burrow//Rail Rapid Transit, no. 223, pp. 533–541.
12. *Mišauskaitė I. (2006)* Algorithm for Optimal Supplement of Train Traffic Schedule in Automatazavimas, Robototechnika/I. Mišauskaitė, V. Bagdonas//Electronic and electrical engineering, vol. 125, no. 7 (71), pp. 43–46.
13. *Shahzad M. P. (2017)* Towards Signalling Maintenance Scheduling for European Railway Traffic Management System/M. P. Shahzad M. R. Kourosh//DTU Management Engineering, 223 p.
14. *Safronov A. I. & Zhuo A. (2019)* Klassifikatsionnyy analiz meropriyatiy v ramkakh soprovozhdeniya avtomatizirovannoy sistemy postroyeniya planovykh grafikov dvizheniya passazhirskikh poyezdov metropolitena i analogichnykh sistem [Classification analysis of activities within the framework of the maintenance of an automated passenger subway train traffic scheduling system and similar systems]. X Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Informatsionnyye tekhnologii v promyshlennosti, logistike i sotsial'noy sfere» (ITI\*2019): tezisy dokladov [X International Scientific and Technical Conference “Information Technologies in Industry, Logistics and Social Sphere” (ITI\*2019): Abstracts], Minsk, May 23–24, 2019. Minsk, UIIP NAS Belarus, pp. 181–183. (In Russian) ISBN 978–985–7198–01–6.
15. *Seslavin A. I. & Vorob'eva L. N. (2005)* Gradiyentnyy sposob tsentralizovannogo upravleniya gorodskimi transportnymi sistemami [Gradient method of centralized management of urban transport systems]. Science and Technology in Transport, no. 2, pp. 71–73. (In Russian)
16. *Sidorenko V. G. & Ryndina E. Yu. (2008)* Metody vyravnivaniya intervalov dvizheniya poyezdov metropolitena [Methods of alignment of subway train movement intervals]. Bulletin of MIIT, iss. 18, pp. 8–10. (In Russian)
17. *Safronov A. I. & Sidorenko V. G. (2012)* Avtomatizirovannoye postroyeniye planovogo grafika dvizheniya passazhirskikh poyezdov metropolitena [Automated passenger subway train traffic scheduling]. Bulletin of RSTU, no. 3, pp. 99–104. (In Russian)
18. *Sidorenko V. G., Safronov A. I., Filipchenko K. M. & Zhuo M. A. (2016)* Primeneniye sovremennykh tekhnologiy programmirovaniya k avtomatizatsii planirovaniya dvizheniya poyezdov metropolitena [Application of modern programming technologies to the automation of subway train traffic scheduling]. Avtomatika na transporte [Automatic Equipment in Transport], vol. 2, no. 3, pp. 331–347. (In Russian)
19. *Almaalei N. N. H. (2019)* Review of ACO algorithm on network and scheduling problem/N. N. H. Almaalei, S. N. A. M. Razali//Compusoft, vol. 8. no. 7, pp. 3250–3260.
20. *Trivedi P. (2020)* Componentry analysis of intelligent transportation systems in smart cities towards a connected future/P. Trivedi, F. Zulkernine//22nd IEEE International conference on high

- performance computing and communications, 18th IEEE International conference on smart city and 6th IEEE International conference on data science and systems, HPCC-SMARTCITY-DSS 2020, pp. 1073–1079.
21. *Yang M.* (2020) The sustainable development of modern railway transportation planning and management under the guidance of COM technology/M. Yang, A. Long//7th International symposium on innovation and sustainability of modern railway, ISMR 2020, pp. 336–348.
  22. *Boroun M.* (2020) An efficient heuristic method for joint optimization of train scheduling and stop planning on double-track railway systems/M. Boroun, S. Ramezani, N. V. Farahani, E. Hassannayebi, S. Abolmaali, M. Shakibayifar//INFOR: Information Systems and Operational Research, vol. 58, no. 4, pp. 652–679.
  23. *Kim H. J.* (2020) Determination of necessary subsidiary track according to train operation frequency in a heterogeneous train pattern/H. J. Kim//APPLIED SCIENCES (SWITZERLAND), vol. 10, no. 12, pp. 41–46.
  24. *Shakibaei S.* (2021) A multi-objective optimisation model for train scheduling in an open-access railway market/S. Shakibaei, P. Alpkokin, J. A. Black//Transportation planning and technology, vol. 44, no. 2, pp. 176–193.
  25. *Dalapati P.* (2021) Optimal scheduling for delay management in railway network using hybrid bat algorithm/P. Dalapati, K. Paul//Lecture notes in electrical engineering, vol. 702, pp. 91–103.
  26. *Long X.* (2021) Optimum multi-level maintenance scheduling model for metro vehicles with delay time theory/X. Long, G. Liu, S. Chen, H. Peng, S. Liu//Tiedao xuebao, vol. 43, no. 2, pp. 30–36.
  27. *Cavalcante C. A. V.* (2021) Inspection and replacement policy with a fixed periodic schedule/C. A. V. Cavalcante, R. S. Lopes, P. A. Scarf//Reliability engineering & system safety, vol. 208. DOI:10.1016/j.res.2020.107402.
  28. *Markevich A. V. & Sidorenko V. G.* (2019) Avtomatizatsiya upravleniya raspredeleniyem trudovykh resursov s ispol'zovaniyem geneticheskogo algoritma [Labor allocation management automation using a genetic algorithm]. Informatizatsiya obrazovaniya i nauki [Informatization of Education and Science Journal], no. 3 (43), pp. 36–49. (In Russian)
  29. *Heil J.* Railway crew scheduling: models, methods and applications/J. Heil, K. Hoffmann, U. Buscher//European journal of operational research, 2020, vol. 283, no. 2, pp. 405–425.
  30. *Wolniewicz Ł.* (2019) Evaluation of train crews schedule in terms of robustness/Ł. Wolniewicz//Journal of konbin, vol. 49, no. 1, pp. 69–94.
  31. *Sidorenko V. G. & Petrov A. S.* (2018) Primeneniye parallel'nykh vychisleniy pri planirovaniy logisticheskikh protsessov [Application of parallel computing in planning logistic processes]. Informatizatsiya obrazovaniya i nauki [Informatization of Education and Science Journal], no. 2 (38), pp. 51–61. (In Russian)
  32. *Passchyn W.* (2019) Scheduling parallel batching machines in a sequence/W. Passchyn, F. C. R. Spijksma//Journal of scheduling, vol. 22, no. 3, pp. 335–357.
  33. *Wu Q.* Parallel computing in railway research/Q. Wu, M. Spiriyagin, C. Cole, T. McSweeney//International journal of rail transportation, 2020, vol. 8, no. 2, pp. 111–134.
  34. *Akhmetov B.* (2019) Algorithm of parallel data processing in the automated dispatcherization system of railway transport movement/B. Akhmetov, G. Yerkeldessova, T. Sarzhanov, G. Musayeva, V. Lakhno//Journal of theoretical and applied information technology, vol. 97, no. 9, pp. 2491–2502.
  35. *Sidorenko V. G. & Filipchenko K. M.* (2015) Metod effektivnogo planirovaniya obsluzhivaniya s primeneniym teorii grafov [Efficient maintenance scheduling method using graph theory]. Informatizatsiya obrazovaniya i nauki [Informatization of Education and Science Journal], no. 4 (28), pp. 123–132. (In Russian)

36. *Sidorenko V.G. & Zhuo A.* (2016) *Primeneniye geneticheskikh algoritmov k resheniyu zadachi planirovaniya raboty elektropodvizhnogo sostava metropolitena* [Application of genetic algorithms to solving the problem of operation planning of the subway electric rolling stock]. *Elektronika i elektrooborudovaniye transporta* [Electronics and electrical equipment of transport], no. 6, pp. 13–16. (In Russian)
37. *Kyaw M.A.* (2019) *The Application of Genetic Algorithms for the Scheduling of Electric Rolling Stock Maintenance*/M.A. Kyaw, V.G. Sidorenko, A.I. Safronov, V.G. Buchirin//IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), pp. 2148–2151.
38. *Sidorenko V.G. & Petrov A.S.* (2020) *Arkhitektura mnogopotochnogo programmnoy produkta, realizuyushchego planirovaniye logisticheskikh protsessov* [The architecture of a multithreaded software that implements the planning of logistics processes]. *Informatizatsiya obrazovaniya i nauki* [Informatization of Education and Science Journal], no. 1 (45), pp. 25–38. (In Russian)
39. *Sidorenko V.G. & Novikova M.V.* (2010) *Sintez planovogo grafika dvizheniya zonnogo tipa* [Synthesis of the planned zonal traffic schedule]. *Mir transporta* [World of Transport and Transportation], no. 4, pp. 128–134. (In Russian)
40. *Hu H.* (2013) *A multi-objective train-scheduling optimization model considering locomotive assignment and segment emission constraints for energy saving*/H. Hu, K. Li, X. Xu//*Journal of Modern Transportation*, no. 21, pp. 9–16. (In Russian)
41. *Baranov L.A.* (2016) *Energy-optimal control of vehicle traffic*/L.A. Baranov, V.M. Maksimov, N.A. Kuznetsov//*Russian Electrical Engineering*, vol. 87, no. 9, pp. 498–504.
42. *Iskakov T.A., Safronov A.I., Sidorenko V.G. & Zhuo M.A.* (2020) *Podkhody k otsenke kachestva planirovaniya i upravleniya dvizheniyem passazhirskikh poyezdov metropolitena* [Approaches to assessing the quality of planning and controlling the subway passenger train traffic]. *Avtomatika na transporte* [Automatic Equipment in Transport], vol. 6, no. 1, pp. 38–63. (In Russian)
43. *Wu Z.* (2019) *Calculating vulnerability index of urban metro systems based on satisfied route*/Z. Wu, J. Sun, R. Xu//*Physica A: statistical mechanics and its applications*, vol. 531. DOI:10.1016/j.physa.2019.121722.
44. *Palte M.H.A.* (2011) *Smartfleet, how «smart» rail vehicles help improve business*/M. H.A. Palte//5th IET Conference on Railway Condition Monitoring and Non-Destructive Testing (RCM 2011), pp. 1–4.
45. *Noah J.G.* (2014) *Ethical Decision Making During Automated Vehicle Crashes*/J.G. Noah//*Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 2424, pp. 58–65.
46. *Forsgren M.* (2012) *Using timetabling optimization prototype tools in new ways to support decision making*/M. Forsgren, M. Aronsson, S. Gestrelus, H. Dahlberg//*Computers in Railways XIII: Computer System Design and Operation in the Railway and Other Transit Systems*: WIT Press, pp. 439–450.
47. *Baranov L.A.* (2019) *Obespecheniye bezopasnosti dvizheniya poyezdov v bespilotnykh transportnykh sistemakh* [Ensuring the train traffic safety in unmanned transport systems]. *Sbornik trudov XIII Vserossiyskogo soveshchaniya po problemam upravleniya* [Proceedings of the XIII All-Russian Meeting on Management Problems], pp. 1995–1999. (In Russian)
48. *Baranov L.A., Balakina E.P., Ikonnikov S.E. & Antonov D.A.* 2020, *Tsentralizovannoye upravleniye dvizheniyem poyezdov gorodskikh zheleznykh dorog sovremennogo megapolisa* [Centralized traffic control of urban railways in a modern metropolis]. *Science and Technology in Transport*, no. 1, pp. 30–38. (In Russian)
49. *Baranov L.A. & Balakina E.P.* (2020) *Metody povysheniya bezopasnosti dvizheniya poyezdov gorodskikh zheleznykh dorog v usloviyakh tsentralizovannogo avtomaticheskogo uprav-*

- leniya [Methods for improving the traffic safety of urban railways in the context of centralized automatic control]. *Materialy XXVIII mezhdunarodnoy konferentsii "Problemy upravleniya bezopasnost'yu slozhnykh sistem"* [Proceedings of the XXVIII International Conference «Problems of Security Management of Complex Systems»]. Under the general editorship of A. O. Kalashnikov, V. V. Kulba, pp. 297–302. (In Russian)
50. *Baranov L. A.* (2020) The disturbances prediction in the systems of automatic train traffic control of urban transport systems/L. A. Baranov, E. P. Balakina, A. I. Godyaev//International multi-conference on industrial engineering and modern technologies, FarEastCon., pp. 1–4. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271390.
  51. *Baranov L. A. & Ikonnikov S. E.* (2019) *Bespilotnyye transportnyye sredstva gorodskogo zheleznodorozhnogo transporta: upravleniye i obespecheniye bezopasnosti dvizheniya* [Unmanned vehicles of urban railway transport: Management and traffic safety]. *Sbornik nauchnykh statey natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Aktual'nyye problemy tekhnosfernoy bezopasnosti"* [Collection of scientific articles of the National Scientific and Practical Conference «Current Problems of Technosphere Safety»], pp. 39–41. (In Russian)
  52. *Baranov L. A.* (2019) *Bespilotnaya sistema upravleniya dvizheniyem poyezdov kak sostavlyayushchaya tsifrovizatsii gorodskogo transporta* [Unmanned train control system as a component of urban transport digitalization]. *Avtomatika na transporte* [Automatic Equipment in Transport], vol. 5, no. 4, pp. 441–449. (In Russian)
  53. *Baranov L. A., Sidorenko V. G., Balakina E. P. & Loginova L. N.* (2021) *Integratsionnyy podkhod v obuchenii operativnykh rabotnikov gorodskikh rel'sovykh transportnykh sistem* [An integration approach in the training of operational workers of urban railway transport systems] *Science and Technology in Transport*, no. 2, pp. 22–31. (In Russian)
  54. *Baranov L. A., Sidorenko V. G., Balakina E. P. & Loginova L. N.* (2021) *Intellektual'noye tsenalizovannoye upravleniye dvizheniyem vneulichnogo gorodskogo zheleznodorozhnogo transporta v usloviyakh intensivnogo dvizheniya* [Intelligent centralized traffic control of heavy-traffic off-street urban railway transport. *Nadyozhnost' [Reliability]*, vol. 21, no. 2, pp. 17–23. (In Russian)
  55. *Kompleks gradostroitel'noy politiki i stroitel'stva goroda Moskvy* [Urban Planning Policy and Construction Complex of the City of Moscow]. [Electronic resource]: Golyanovo URL: <https://stroim.mos.ru/metro/station/97> (Accessed: July 06, 2021).
  56. *Staryye karty gorodov Rossii i zarubezh'ya* [Old maps of cities in Russia and abroad]. [Electronic resource]: *Kak izmenyalis' granitsy Moskvy* [The way the borders of Moscow changed] URL: <http://retromap.ru/forum/viewtopic.php?p=255> (Accessed: July 06, 2021).
  57. *Minaev G. I., Sukhov S. B., Fyodorov A. G., Fursayev M. V. & Mizgiriyev S. N.* (2003) *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii metropolitenov RF* [Rules for the technical operation of the subways in the Russian Federation]. Moscow, ZAO Izdatel'skiy tsentr TA Inzhiniring (Publishing Center), 109 p. (In Russian)
  58. *Sauder R. L.* (1983) *Computer Aided Train Dispatching: Decision Support Through Optimization*/R. L. Sauder, W. M. Westerman//*Interfaces*, vol. 6, no. 13, pp. 24–37. (In Russian)
  59. *Drobyshev Yu. A.* (2021) *Olimpiady po matematike* [Olympiads in Mathematics]. Moscow, Ekzamen Publ., 144 p. ISBN 5–377–15817–2.
  60. *Mezhokh A. K.* (1977) *Voprosy analiza realizuyemosti zadannogo grafika dvizheniya poyezdov metropolitena* [Analysis of the feasibility of a set subway train schedule]. *Proceedings of MIIT*, iss. 550, pp. 54–57. (In Russian)
  61. *Safronov A. I.* (2011) *Usloviya realizatsii i realizuyemosti pri avtomatizirovannom postroyenii planovogo grafika dvizheniya passazhirskikh poyezdov metropolitena* [Conditions for imple-



- mentation and feasibility of automated passenger subway train traffic scheduling]. Nedelya nauki-2011. Nauka transportu: trudy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Science Week 2011. Science for Transport: Proceedings of the Scientific and Practical Conference]. Moscow, МИИТ, p. III–157–III–158. (In Russian)
62. *Safronov A. I. & Sidorenko V. G.* (2012) Stsenarnoye prostranstvo postroyeniya planovogo grafika dvizheniya poyezdov metropolitena [Scenarios of automated subway train traffic scheduling]. Science and Technology in Transport, no. 1, pp. 51–56. (In Russian)
63. *D’Acerno L.* (2018) Defining Reserve Times for Metro Systems: An Analytical Approach/L. D’Acerno, M. Botte, M. Gallo, B. Montella//Journal of Advanced Transportation, pp. 1–15. DOI: 10.1155/2018/5983250.

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

*Поступила в редакцию 09.07.2021, принята к публикации 19.07.2021*

*САФРОНОВ Антон Игоревич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта (МИИТ)  
safronov-ai@mail.ru

*ЛЫСЕНКО Екатерина Владимировна* – специалист подразделения «Управление талантами» Российского университета транспорта (МИИТ)  
e.lisenko@rut.digital

© Сафронов А. И., Лысенко Е. В., 2021



УДК 681.2.08

**Вл. А. Смагин, докт. техн. наук**

*Международная академия информатизации, Санкт-Петербург*

**Вл. П. Бубнов, докт. техн. наук**

*Кафедра «Информационных и вычислительных систем»,  
Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I*

## **НЕСКОЛЬКО ЗАМЕЧАНИЙ О САМОМ ВАЖНОМ ЭЛЕМЕНТЕ МЕТРОЛОГИИ – ЧЕЛОВЕКЕ**

В статье рассматривается человек как элемент метрологии. Функциональные обязанности и конкретные действия его не принимаются во внимание. Метролог представляется как двухфазная система, включающая два этапа жизненного цикла, первый цикл которой есть фаза концентрации – работа для получения эффекта, второй цикл – фаза хаоса, заключающаяся в восстановлении потраченных сил с целью продолжения первой фазы. Приводится формальная модель человека-метролога. Определяется оптимальная по коэффициенту готовности продолжительность межповторного периода и среднее число ремонтов объекта за один год. При помощи реальной модели определяется средний возраст человека-оператора с точки зрения максимального коэффициента готовности, с учетом профилактических периодов и без них. В формальной и реальной моделях человека-оператора распределение времени жизни человека задается экстремальным в статистике законом распределения Вейбулла. С формальной точки зрения среда хаоса характеризуется вероятностной функцией распределения, противоположной функции распределения среды концентрации по П. Леви. Определяется количественная связь между этапами и предлагается формальный путь реализации этой связи. Приведен простейший пример расчета восстановления исходного ресурса фазы концентрации.

Метролог, метрология, двухфазная система, среда концентрации, среда хаоса, средняя частота отказов, функция концентрации, обеспечение концентрации

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-617-630

### **Введение**

Метрология ведет свою историю с античных времен, однако только в XX веке она вошла в число основных фундаментальных наук. Метрология состоит из трех основных разделов. Теоретическая, или фундаментальная, рассматривает общие теоретические проблемы (разработка теории и проблем измерений физических величин, их единиц, методов измерений). Прикладная изучает вопросы практического применения разработок теоретической метрологии. В ее ведении находятся все вопросы метрологического обеспечения. Законодательная устанавливает обязательные технические и юридические требования по применению единиц физической величины, методов и средств измерений.

Уместно поставить вопрос об основном элементе науки метрологии – метрологе. В зарубежной и отечественной литературе много работ посвящено человеку-оператору [1–10]. В основном в них рассматриваются аспекты взаи-

модействия человека и коллектива с аппаратно-программными комплексами. Однако, на наш взгляд, изучая элементы метрологии (такие как эталоны, измерительные средства) и их практическую значимость, мы вправе рассматривать современного метролога с технической точки зрения как метрологический элемент, а в более широком смысле – как живую метрологическую систему. Целью статьи является изучение человека-метролога как метрологического элемента.

## 1. Формальная модель человека-метролога

Сначала рассмотрим прототип модели – техническую модель – на примере «Средняя частота отказов и коэффициент готовности измерительного устройства с учетом его метрологических поверок» [11]. Для оценки надежности восстанавливаемых объектов применяется показатель надежности – средняя частота отказов [12].

В настоящей статье средняя частота отказов восстанавливаемых объектов рассматривается при условии, что на объектах проводится периодическая профилактика. Предполагается, что при восстановлении и профилактике объект восстанавливается полностью до первоначального состояния.

В статье ставилась задача определения средней частоты отказов объекта, на котором периодически могут проводиться поверки состояния. При них объект мог быть в работоспособном, но требующем обновления состоянии, например путем регулирования его параметров. При обнаружении отказа объект заменялся новым. Было выведено интегральное уравнение для соответствующей средней частоты отказов объекта, исследовались его свойства. Целью статьи являлось установление первой связи показателей надежности аппаратных и программных объектов с метрологическими показателями, составляющими необходимую часть обеспечения качества объектов.

Были приняты следующие обозначения:  $\omega(t)$  – средняя частота отказов;  $a(t)$  – плотность вероятности времени до отказа;  $Q(t)$ ,  $P(t)$  – вероятность отказа и вероятность безотказной работы;  $U(t)$  – функция распределения времени начала поверки;  $\nu(t)$  – плотность вероятности длительности поверки и регулировки параметров объекта;  $g(t)$  – плотность распределения времени восстановления объекта после отказа;  $\tau$  – момент назначения первой поверки;  $\theta$  – момент до возникновения первого отказа.

Средняя частота отказов определялась суммой трех составляющих, соответствующих следующим несовместным событиям:

- произошел ровно один отказ объекта за время  $t$  при условии, что поверка за это время не была назначена;
- произошло несколько отказов объекта за время  $t$  при условии, что первый отказ наступил до момента назначения первой поверки;
- произошло несколько отказов объекта за время  $t$  при условии, что первая поверка была назначена до момента возникновения первого отказа.

Тогда выражение для средней частоты отказов принимало вид:

$$\begin{aligned} \omega(t) = & a(t) \cdot [1 - U(t)] + \int_0^t [1 - U(t)] \cdot a(\tau) \cdot \omega(t - \tau) d\tau + \\ & + \int_0^t [1 - Q(\tau)] \cdot \int_0^{t-\tau} v(\theta) \cdot \omega(t - \tau - \theta) d\theta dU(\tau). \end{aligned} \quad (1)$$

Выражение (1) получено при условии, что после отказа и поверки объект заменяется исправным (новым) мгновенно. Контроль за состоянием элементов объекта идеальный. Для (1) определено преобразование Лапласа средней частоты:

$$\omega^*(s) = \frac{a^*(s)}{1 - a^*(s) - b^*(s)v^*(s)}, \quad (2)$$

где

$$a^*(s) = \int_0^{\infty} a(z)[1 - U(z)]e^{-sz} dz; \quad b^*(s) = \int_0^{\infty} [1 - Q(z)]e^{-sz} dU(z). \quad (3)$$

Изображение плотности вероятности длительности поверки и регулировки параметров объекта было представлено суммой двух случайных составляющих, поэтому изображение Лапласа равно:

$$v^*(s) = u^*(s) \cdot r^*(s), \quad (4)$$

где  $u^*(s)$ ,  $r^*(s)$  – изображения плотностей времени поверки и регулировки.

На практике поверки на объектах проводятся регулярно, поэтому имеет смысл рассматривать в качестве  $U(t)$  вырожденное распределение, т. е.

$$U(t) = \begin{cases} 0, & t < T, \\ 1, & t \geq T, \end{cases} \quad (5)$$

где  $T$  – период между соседними поверками.

Из выражения (2) с учетом формул (3–5) при условии длительной эксплуатации объекта получено установившееся значение средней частоты отказов:

$$\omega(\infty, T) = \frac{Q(T)}{\int_0^T P(z) dz + t_{ur} P(T)}, \quad (6)$$

где  $t_{ur}$  – средняя продолжительность одной поверки с регулировкой параметров.

Рассуждая аналогично, получили  $\omega(t)$ ,  $\omega^*(s)$ ,  $\omega(\infty, T)$  для ситуации, когда восстановление объекта производилось не мгновенно, а через случайное время:

$$\omega(t) = a(t)[1 - U(t)] + \int_0^t [1 - U(\tau)] \int_0^{t-\tau} g(\theta)\omega(t-\tau-\theta)d\theta a(\tau)d\tau + \int_0^t [1 - Q(\tau)] \int_0^{t-\tau} v(\theta)\omega(t-\tau-\theta)d\theta dU(\tau); \quad (7)$$

$$\omega^*(s) = \frac{a^*(s)}{1 - a^*(s)g^*(s) - b^*(s)v^*(s)}; \quad \omega(\infty, T) = \frac{Q(T)}{\int_0^T P(z)dz + t_b Q(T) + t_{ur} P(T)},$$

где  $t_b$  – среднее время восстановления объекта.

Из выражений (6) и (7) при условии, что проверки не производятся ( $T \rightarrow \infty$ ), следуют известные частные случаи стационарных значений средней частоты:  $\omega(\infty, \infty) = 1 / (T_{cp})$ ,  $\omega(\infty, \infty) = 1 / (t_{cp} + t_b)$ , где  $t_{cp}$  – среднее время безотказной работы объекта.

## 2. Пример использования $\omega(\infty, T)$

Требуется определить оптимальную по коэффициенту готовности продолжительность межповерочного периода  $T_0$  и среднее число ремонтов  $n_p$  объекта за один год, если законом распределения времени работы объекта до отказа является закон Вейбулла со значениями параметров:  $\lambda_0 = 1 \cdot 10^{-5} 1/\text{ч}^k$ ,  $k = 2,5$ . Среднее время ремонта объекта после отказа  $t_b = 10$  ч, а средняя продолжительность проверки и регулировки параметров объекта  $t_{ur} = 2$  ч.

Нетрудно убедиться, что стационарное значение коэффициента готовности объекта равно:

$$K_{\Gamma} = K_{\Gamma}(\infty, T) = \frac{\int_0^T P(z)dz}{\int_0^T P(z)dz + t_b Q(T) + t_{ur} P(T)}, \quad (8)$$

где  $P(t) = e^{-\lambda_0 t^k}$ ,  $Q(t) = 1 - P(t)$ .

Величина  $T_0$ , приводящая к максимуму (7), удовлетворяет уравнению:

$$\frac{t_b}{t_b - t_{ur}} = \lambda(T_0) \int_0^{T_0} P(z)dz + P(T_0), \quad (9)$$

в котором  $\lambda(t)$  – интенсивность отказа объекта.

Следует отметить, что выражения (8) и (9) совпадают с выражениями, полученными в работе [13] другим способом.

Результаты расчетов по формулам (7) и (8) приведены на рисунке 1. Максимальная величина  $K_{\Gamma} = 0,95$  достигается при  $T_0 \approx 50$  ч. Межповерочному периоду  $T_0 \approx 50$  ч. соответствует средняя частота отказов  $\omega(\infty, T_0) \approx 0,00351/\text{ч}$ . Среднее время безотказной работы объекта без проведения проверок  $T_{\text{ср}} \approx 89$  ч., а с их проведением  $T_{\text{ср}} \approx 285$  ч. Среднее ожидаемое число ремонтов объекта в течение года без проведения проверок  $n_p \approx 100$ , а с их проведением  $n_p \approx 31$ . Суммарная наработка объекта в течение года увеличивается в среднем на полмесяца.

Рассмотрим достаточно малую обратную задачу метрологии: как при заданном коэффициенте готовности определить требование к величине средней длительности проверки и регулирования объекта? Для этого из выражения (8) найдем величину  $t_{\text{ур}}$ . Она будет представлена выражением:

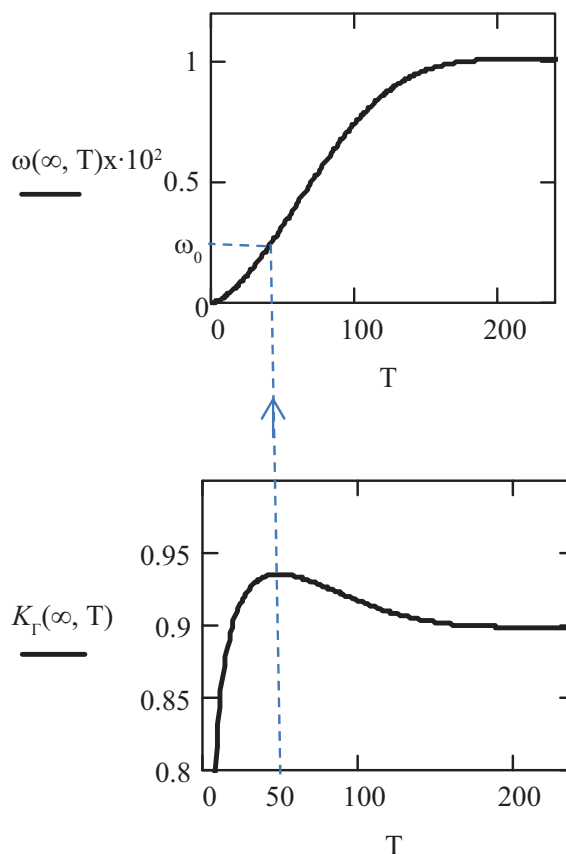
$$t_{\text{ур}} = \frac{\int_0^T P(z) dz}{P(T)} \cdot \frac{1 - K_{\Gamma}}{K_{\Gamma}} - t_{\text{В}} \frac{Q(T)}{P(T)}. \quad (10)$$

Можно также представить решение уравнения (8) относительно  $t_{\text{ур}}$  в виде:

$$t_{\text{ур}} = t_{\text{В}} \left( 1 - \frac{1}{\lambda(T_0) \int_0^{T_0} P(z) dz + P(T_0)} \right). \quad (11)$$

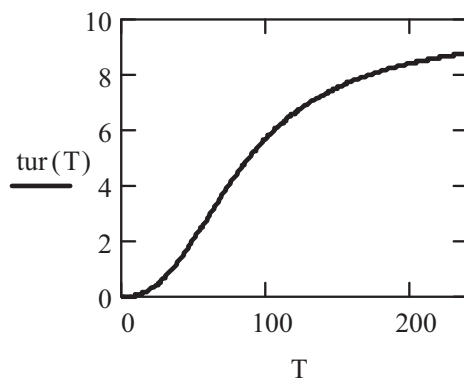
Графическое представление (10) показано на рисунке 2. Из него следует, что оптимальному решению соответствует координата точки перегиба  $t_{\text{ур}}(50) = 2,055$  ч.

Мы рассмотрели пример типичной эксплуатации сложной технической системы. Следует заметить, что этот пример не характерен для человека — измери-



**Рис. 1.** Зависимости средней частоты отказов  $\omega$  и коэффициента готовности объекта  $K_{\Gamma}$  от длительности периода  $T$  между проверками





**Рис. 2.** Зависимость продолжительности одной поверки с регулировкой параметров от длительности периода  $T$  между поверками

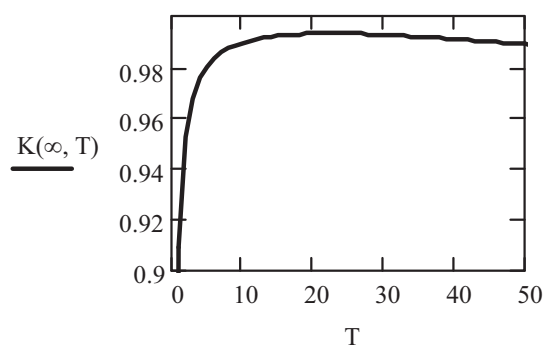
тельного устройства. Среднее квадратическое отклонение (СКО) не характерно для жизни человека, находящегося как в обычных, так и в стрессовых ситуациях. Вычисление показывает, что при среднем времени жизни прибора 89 часов, а не лет, СКО составляет 38,028 часов. Замена единицы «час» на единицу «год» поясняет сделанное замечание. Поэтому на основе распределения Вейбулла подберем пример реальный для человека — измерительного прибора.

### 3. Реальная модель человека-метролога

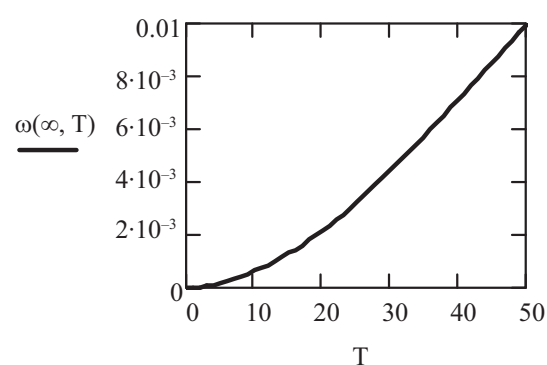
Итак, распределение времени жизни человека-метролога определим экстремальным в статистике законом распределения Вейбулла  $F(x) = e^{-\lambda_0 \cdot x^k}$ . Подберем значения следующих параметров:  $\lambda_0 = 1 \cdot 10^{-5}$  лет,  $k = 2,8$ . Тогда средний возраст метролога равен  $v_1 = 54,4$  лет, второй начальный момент —  $v_2 = 3307,4$  лет, а СКО возраста —  $\sigma = 21,0$  лет. Это означает, что период его служебной деятельности находится в пределах от 33,4 до 75,4 лет. Также примем величину средней продолжительности восстановления человека-метролога после болезни  $t_b = 3$  мес, а величину средней продолжительности его профилактического обслуживания в период работы  $t_n = 1$  мес.

Применив выкладки предшествующего материала статьи, получим следующие графические результаты.

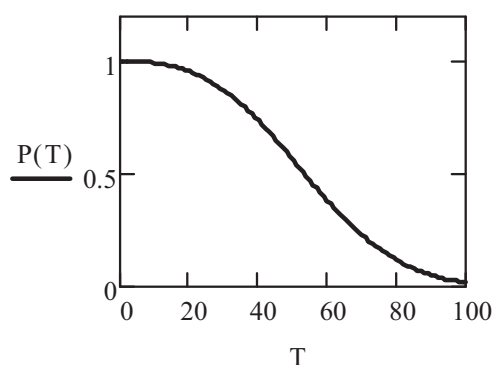
На рисунке 3 приведен график функции готовности, на рисунке 4 — график средней частоты отказов (болезней) человека-метролога. На рисунке 5 — вероятность непрерывной работы метролога в течение его жизни. По осям абсцисс всех графиков указаны годы. На основании графика на рисунке 3 можно утверждать, что максимальный коэффициент готовности  $K_r(\infty, 25) = 0,993$  достигается при величине оптимального периодического профилактического обслуживания  $T_0 = 25$  лет. При этом средняя частота отказов (болезней) составляет (см. рис. 4)  $\omega(\infty, 25) = 3,212 \cdot 10^{-3}$  1/лет. На рисунке 5 представлен график веро-



**Рис. 3.** Функция готовности



**Рис. 4.** Зависимость средней частоты отказов (болезней) метролога от длительности периода  $T$  между поверками



**Рис. 5.** Вероятность непрерывной безотказной работы метролога в зависимости от времени жизни

ятности непрерывной безотказной работы метролога в зависимости от количества лет. Результаты расчетов по формулам (7) и (8) применительно к исходным данным модели человека-оператора, представленные на рисунках 3 и 4, приводят к следующим дополнительным количественным данным: если средний возраст человека-метролога без учета профилактического обслуживания составляет  $v_1 = 54,4$  лет, то с учетом профилактического обслуживания он составит  $1/\omega(\infty, 25) \text{ лет}^{-1} = 311,333$  лет. Среднее число необходимых восстановлений за один год составит  $1/54,777 = 0,018$  раз. С учетом профилактического обслуживания с оптимальной периодичностью  $T_0 = 25$  лет в течение одного года оно составит  $1/311,333 = 3,212 \cdot 10^{-3}$  раз. Временные затраты за год на лечение в среднем будут равны  $0,018 \cdot 0,25 = 4,5 \cdot 10^{-3}$  лет, а с учетом профилактического обслуживания за год они составят  $3,212 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{12} = 2,677 \cdot 10^{-4}$  лет. Таким образом, выигрыш времени на восстановление здоровья за год составит в среднем  $\frac{4,5 \cdot 10^{-3}}{2,677 \cdot 10^{-4}} = 16,81$  раз благодаря периодическому профилактическому обслу-

живанию человека-метролога. Эти выводы относятся только к тем установочным данным примера, которые были нами приведены.

#### 4. О взаимосвязи функций распределения концентрации и хаоса

В отличие от технических и программных систем и их элементов — измерительных устройств, которые могут функционировать при работе по назначению или восстанавливаться, измерительная система «человек-метролог» может находиться также в двух названных состояниях, но эти парные состояния различны. Если первые системы восстанавливаются в присущей им технической среде, то вторые по их состояниям можно отнести к системам сезонного вида. После выхода их из состояния работы в технической среде они попадают в другую среду, отличающуюся от первой. Если системы первого вида связаны явлением концентрации производимого продукта с получением значимого эффекта, то системы второго вида связаны с освобождением от процесса концентрации продукта, отстраняются от этой потребности производства, переходят в состояние отдыха, расслабленности, организованного безразличия, можно сказать, управляемого хаоса.

Здесь под хаосом понимается приобретение таких свойств, без которых невозможно вернуться к системам, обладающим свойствами первых систем. Именно, если системы периодически меняют указанные свойства названных двух систем, но в целом переходят из одного вида в другой вид и обратно, то такие системы мы называем сезонными. Сезонность систем — основа жизненного цикла, их диалектическое единство. Благодаря ей возможны экономический рост государства, прогресс в науке, благосостоянии нации, ее обороноспособности.

#### 5. Абстрактный пример

Субъект, функционируя в режиме концентрации с параметром  $t_k$  и продолжительностью  $x_k$ , выработал ресурс Н. М. Седякина  $r_k$  [14]. После этого субъект перешел в режим хаоса с параметром  $t_x$  для восстановления израсходованного ресурса. Какую величину продолжительности  $x_x$  он должен находиться в режиме хаоса, чтобы восстановить потраченный ресурс в режиме концентрации?

Формально режимы представляются, как следует из изложенного материала [15–16]:

$$Q_F(x_k) = \max_{t_k} (F(t_k) - F(t_k + x_k + 0)), \quad (12)$$

$$W_F(x_x) = \max_{t_x} (F(t_x) - F(t_x + x_x + 0)). \quad (13)$$

где  $Q_F$  – функция распределения концентрации,  $W_F$  – функция распределения хаоса,  $F$  – функция ресурса концентрации.

Напомним, что ресурсы определяются как

$$\begin{cases} rQ_F(x_k) = -\ln(1 - Q_F(x_k)) \\ rW_F(x_x) = -\ln(1 - W_F(x_x)). \end{cases} \quad (14)$$

Множества  $[t_k]$ ,  $[t_x]$  формируются отдельно для решения задачи субъекта. На этих множествах могут быть реализованы различные варианты восстановления величины утраченного ресурса работоспособности метролога.

С учетом экономических затрат возможно рассмотрение оптимальных стратегий сезонного вида. Попробуйте решить подобную задачу. Вопрос не только в том, как определить величину восстановленного ресурса, а каким образом восполнить утрату части ресурса концентрации. Или она возобновит себя сама после отдыха метролога на профилактике? Но даже в этом случае представляет интерес, как изменится функция концентрации. В самом простом случае, пользуясь формулами (14), можно решить следующую задачу. Зная величину потраченного ресурса в режиме концентрации  $rQ_F(x_k)$ , следует подставить ее вместо  $rW_F(x_x)$  в формулу хаоса и решить полученное уравнение относительно определения времени  $x_x$  в режиме хаоса. А затем выполнить обратный пересчет этого времени, пользуясь равенствами величин ресурсов в этих двух режимах и найти новое значение времени  $x_k$  и соответствующую ему величину ресурса в режиме концентрации. Эту величину ресурса сложить с величиной ранее остаточного ресурса в режиме концентрации. Сделать выводы о дальнейшем изменении режима.

Пример. Используем третий подраздел статьи. Все числовые данные выразим в часах, перейдя от измерения в годах к часам ( $1 \text{ год} = 8,76 \cdot 10^3 \text{ часов}$ ).

Предположим, что метролог выполнил работу в среде концентрации, описываемую функцией концентрации П. Леви  $Q_F(x_k) = \max_h(F(h + x_k + 0) - F(h))$ , в течение времени  $x_k = 60$  ч. при установленном параметре  $h = 30$  ч. и перешел в среду хаоса, описываемую функцией хаоса  $W_F(x_k) = \max_{h_1}(F(h_1) - F(h_1 + x_k + 0))$ , для восстановления своей утраченной работоспособности. Вопрос: за какое время он восстановит утраченный ресурс работоспособности и вернется для продолжения работы в режиме концентрации? (При этом величину восстановленной работоспособности он добавит к величине остаточной, сохраненной работоспособности в режиме концентрации.) Ресурс работоспособности будем представлять в качестве ресурса Н. М. Седякина. Ресурс работоспособности в режиме концентрации обозначим как  $rq(x) = -\ln(1 - Q(x))$ . Полный потенциальный ресурс будет равен  $rq(\infty) = 2,053$ . Выработанный ресурс равен  $rq(60) = 1,719$ . Остаточный ресурс в режиме концентрации  $rq_0 = rq(\infty) - rq(60) = 0,334$ . Время восстановления ресурса в режиме хаоса определим в результате решения

уравнения  $rw(x_0) = \ln(1 + W(x_0)) + rq(60) = 0$ . Для этого найдем решение оператора:

$$\begin{aligned}x_0 &= 60 \\ \textit{Given} & \\ \ln(1 + W(x_0)) + 1,719 &= 0 \\ \textit{Find}(x_0) &= 64,514.\end{aligned}\tag{15}$$

Таким образом, израсходованный ресурс равен:  $rw(64,514) = -1,719$ .

Изменяя знак полученного числа на противоположный и суммируя его с остаточным ресурсом, получаем  $1,719 + 0,334 = 2,053$ . Это исходный потенциальный ресурс.

### Заключение

В статье предложено рассмотреть человека-метролога в качестве восстанавливаемого элемента метрологической системы. Исследуются два этапа его жизненного цикла как сезонной системы. Первый этап заключается в непосредственном выполнении функций метрологии. Второй этап цикла связан с восстановлением работоспособности метролога, его здоровья, без которого нельзя обеспечить дальнейшую работоспособность метрологической системы и получение целевого эффекта. Если первый этап сопряжен с реализацией функции концентрации в соответствующей среде (назовем ее средой концентрации), то второй – с противостоящей средой (назовем ее средой хаоса), связанной с обеспечением первой среды. Формально среда хаоса характеризуется вероятностной функцией распределения, противоположной функции концентрации П. Леви [15, 16].

Более сложные процессы хаоса в статье не затрагиваются. Устанавливается количественная связь между этапами и предлагается формальный путь реализации этой связи. Приводится простой пример взаимодействия среды концентрации со средой хаоса.

### Библиографический список

1. Антоновский А. В. Профессиональное здоровье инженеров-метрологов: Теоретические и прикладные аспекты: Сборник «Здоровье специалиста: проблемы и пути решения. материалы IV заочной международной научно-практической интернет-конференции» / А. В. Антоновский, А. С. Бысюк. – 2013. – С. 12–25.
2. Алексеев Г. А. Подготовка инженеров в области стандартизации / Г. А. Алексеев // Современное образование: содержание, технологии, качество. – 2012. – Т. 1. – С. 87–89.
3. Смагин В. А. Математическая модель надежности функционирования коллектива операторов и сложных программных комплексов / В. А. Смагин // Информация и космос. – 2007. – № 1. – С. 75–80.



4. *Ахмеджанов Ф. М.* Алгоритм оценки надежности человека-оператора на основе модифицированной методики HEART / Ф. М. Ахмеджанов, В. Г. Крымский // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2019. – Т. 15. – № 1. – С. 60–69.
5. *Ivanov O.* Metod for reliability of an external pilot of a remote piloted aerial system / O. Ivanov, V. Ivanov // Proceedings of National Aviation University. – 2019. – Т. 4. – № 81. – С. 29–33.
6. *Яковлев А. В.* Обобщенный алгоритм оценки функционального состояния организма человека-оператора: Сборник «Научная сессия ГУАП. Сборник докладов научной сессии, посвященной Всемирному дню авиации и космонавтики». В 3 ч. – 2019. – С. 288–290.
7. *Яковлев А. В.* Анализ применимости существующих методов обработки данных для оценки функционального состояния организма человека-оператора и прогнозирования его работоспособности: Сборник «Научная сессия ГУАП. Сборник докладов научной сессии, посвященной Всемирному дню авиации и космонавтики». В 3 ч. / А. В. Яковлев, В. О. Матыцин. – 2019. – С. 291–294.
8. *Гучук В. В.* Структурно-когнитивная методика оценки работоспособности человека-оператора по информации его пульсограммы: Сборник «Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций (CASC'2011)» / В. В. Гучук, А. А. Десова, А. А. Дорофеюк, Ю. А. Дорофеюк // Международная научно-практическая мультиконференция «Управление большими системами–2011»: Труды IX Международной конференции. – Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. – 2011. – С. 202–205.
9. *Баранова Т. И.* Новые способы оценки надежности человека-оператора / Т. И. Баранова, Д. Н. Берлов, Ю. А. Чилигина, И. Н. Январева, М. А. Болотова, В. П. Нестеров // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2004. – Т. 38. – № 6. – С. 31–36.
10. *Смагин В. А.* Математические модели для расчета количественных характеристик оптимального квантования информации / В. А. Смагин, В. П. Бубнов, Ш. Х. Султонов // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 46–58.
11. *Смагин В. А.* Средняя частота отказов аппаратуры при ненадежных элементах замены / В. А. Смагин // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1975. – № 3. – С. 118–120.
12. *Гнеденко Б. В.* О надежности дублированной системы с восстановлением и профилактическим обслуживанием / Б. В. Гнеденко, М. Динич, Ю. Наср // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1979. – № 1. – С. 60–71.
13. *Барзилович Е. Ю.* Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем / Е. Ю. Барзилович, В. А. Каштанов. – М.: «Сов. Радио», 1971. – 271 с.
14. *Смагин В. А.* Теоретическое обобщение физического принципа надежности профессора Н. М. Седякина / В. А. Смагин // Надежность. – 2005. – № 1 (24). – С. 3–13.
15. *Smagin V. A.* Application of the concentration function in fuzzy sets theory / V. A. Smagin, E. M. Shurygin // Intellectual Technologies on Transport. – 2020. – № 1. – С. 16–23.
16. *Смагин В. А.* Функция концентрации П. Леви и ее применение в теории нечетких множеств Л. Заде / В. А. Смагин, А. Н. Новиков, В. В. Хатунцев. – Пенза: Изд-во ПГУ. Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – ISSN: 2227-84-86. – 2020. – № 3(35). – С. 102–117.

## VI. A. Smagin

*Honored Worker of Science of Russian Federation,  
member of International Informatization Academy Saint Petersburg, Russia*

## VI. P. Bubnov

*Department of Information Technology Systems,  
Emperor Alexander I Petersburg State Transport University*

## SOME REMARKS ON THE MOST IMPORTANT ELEMENT OF METROLOGY – THE PERSON

The article deals with the description of a person as an element of metrology. Its functional responsibilities and specific actions are not taken into account. The metrologist is simply presented as a two-phase system, including two phases of the life cycle, the first cycle of which is a phase of concentration – work for effect, and the second cycle – a phase of chaos, consisting in restoration of spent energy in order to continue the first phase again. A formal model of a human metrologist is given. The optimal duration of inter-verification period and average number of object's repairs for one year are determined. With the help of real model, the average age of human-operator, in terms of maximum availability coefficient, with and without prophylactic periods is determined. In the formal and real models of man-operator the distribution of human life time is determined by the extreme in statistics Weibull distribution law. From the formal point of view "chaos environment" is characterized by a probability distribution function, opposite to the distribution function of "concentration environment" by P. Levy. A quantitative relationship between the stages is defined and a formal way of realizing this relationship is proposed. A simple example of calculation of initial concentration phase resource recovery is given.

Metrologist, metrology, biphasic system, concentration environment, chaos environment, mean failure rate, concentration function, concentration assurance

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-617-630

## References

1. *Antonovsky A. V., Bysyuk A. S. (2013) Professional'noye zdorov'ye inzhenerov-metrologov: Teoreticheskiye i prikladnyye aspekty [Professional health of metrology engineers: Theoretical and applied aspects]. V sbornike: Zdorov'ye spetsialista: problemy i puti resheniya. materialy IV zaochnoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy internet-konferentsii [In the collection: Specialist's health: problems and solutions. materials of IV extramural international scientific-practical inter-conference], pp. 12–25. (In Russian)*
2. *Alekseev G. A. (2012) Podgotovka inzhenerov v oblasti standartizatsii [Engineering training in the field of standardization]. Sovremennoye obrazovaniye: sodержaniye, tekhnologii, kachestvo [Modern Education: content, technology, quality], no. 1, pp. 87–89. (In Russian)*
3. *Smagin V. A. (2007) Matematicheskaya model' nadezhnosti funktsionirovaniya kollektiva operatorov i slozhnykh programmnykh kompleksov [Mathematical model of reliability of collective operative and complex program complexes functioning]. Informatsiya i kosmos [Information and space], no. 1, pp. 75–80. (In Russian)*
4. *Akhmedjanov F. M., Krymsky V. G. (2019) Algoritm otsenki nadezhnosti cheloveka-operatora na osnove modifitsirovannoy metodiki HEART [Algorithm of estimation of reliability of the person-operator based on the modified technique HEART]. Elektrotekhnicheskiye i informat-*

- sionnyye kompleksy i sistemy [Electrotechnical and information complexes and systems], vol. 15, no. 1, pp. 60–69. (In Russian)
5. *Ivanov O., Ivanov V.* (2019) Metod for reliability of an external pilot of a remote piloted aerial system. Proceedings of National Aviation University, vol. 4, no. 81, pp. 29–33.
  6. *Yakovlev A. V.* (2019) Obobshchennyy algoritm otsenki funktsional'nogo sostoyaniya organizma cheloveka – operatora [Generalized algorithm for assessing the functional state of the human body-operator]. V sbornike: NAUCHNAYA SESSIYA GUAP. Sbornik dokladov nauchnoy sessii, posvyashchennoy Vsemirnomu dnyu aviatsii i kosmonavtiki. [In the collection: SCIENCE SESSION of GUAP. Collection of reports of scientific session dedicated to the World Day of Aviation and Cosmonautics. In three parts], pp. 288–290. (In Russian)
  7. *Yakovlev A. V., Matytsin V. O.* (2019) Analiz primenimosti sushchestvuyushchikh metodov obrabotkidannykh dlya otsenki funktsional'nogo sostoyaniya organizma cheloveka-operatora i prognozirovaniya yego rabotosposobnosti [Analysis of applicability of existing methods of data processing to assess the functional state of human operator organism and predicting its performance]. V sbornike: NAUCHNAYA SESSIYA GUAP. Sbornik dokladov nauchnoy sessii, posvyashchennoy Vsemirnomu dnyu aviatsii i kosmonavtiki [In the collection: SCIENCE SESSION of GUAP. Collection of reports of scientific session, dedicated to the World day of aviation and cosmonautics. In three parts], pp. 291–294. (In Russian)
  8. *Guchuk V. V., Desova A. A., Dorofeyuk A. A., Dorofeyuk Y. A.* (2011) Strukturno-kognitivnaya metodika otsenki rabotosposobnosti cheloveka-operatora po informatsii yego pul'sogrammy [Structural and cognitive method of performance assessment of human operator on information of his pulse rate]. V sbornike: Kognitivnyy analiz i upravleniye razvitiyem situatsiy (CASC'2011). Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya Mul'tikonferentsiya "Upravleniye bol'shimi sistemami – 2011": Trudy IX Mezhdunarodnoy konferentsii. Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN [In the collection: Cognitive Analysis and Case Control (CASC'2011). International Scientific and Practical Conference "Large Systems Control" – 2011": Proceedings of the IX International Conference. Trapeznikov Institute of Control Problems. Trapeznikov V.A. RAS, pp. 202–205. (In Russian)
  9. *Baranova T. I., Berlov D. N., Chilgina Y. A., Yanvareva I. N., Bolotova M. A., Nesterov V. P.* (2021) Novyye sposoby otsenki nadezhnosti cheloveka-operatora [New ways of assessment of reliability of human-operator]. Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina [Aerospace and Environmental Medicine], vol. 38, no. 6, pp. 31–36. (In Russian)
  10. *Smagin V. A., Bubnov V. P., Sultonov Sh. Kh.* (2021) Matematicheskiye modeli dlya rascheta kolichestvennykh kharakteristik optimal'nogo kvan-tovaniya informatsii [Mathematical models for calculation of quantitative characteristics of optimum information quantization]. Transportnyye sistemy i tekhnologii [Transport systems and technologies], vol. 7, no. 1, pp. 46–58. (In Russian)
  11. *Smagin V. A.* (1975) Srednyaya chastota otkazov apparatury pri nenadozhnykh elementakh zameny [Average Hardware Failure Rate with Unreliable Replacement Elements]. Izv. AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika [Izv. of the USSR Academy of Sciences. Technical Cybernetics], no. 3, pp. 118–120. (In Russian)
  12. *Gnedenko B. V., Dinich M., Nasr Y.* (1979) O nadozhnosti dublirovannoy sistemy s vosstanovleniyem i profilakticheskim obsluzhivaniyem [About reliability of duplicated system with restoration and preventive maintenance]. Izv. AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika [Izv. Technical Cybernetics], no. 1, pp. 60–71. (In Russian)
  13. *Barzilovich E. Y., Kashtanov V. A.* (1971) Nekotoryye matematicheskiye voprosy teorii obsluzhivaniya slozhnykh system [Some mathematical issues of the theory of service of complex systems]. M: Sov. Radio [Moscow: Sov. Radio], p. 271.

14. *Smagin V. A.* (2005) Teoreticheskoye obobshcheniye fizicheskogo printsipa nadezhnosti profesora N. M. Sedyakina [Theoretical generalisation of physical principle of reliability by Professor N. M. Sediakin]. *Nadezhnost [Reliability]*, vol. 1, no. 24, pp. 3–13. (In Russian)
15. *Smagin V. A., Shurygin E. M.* (2020) Application of the concentration function in fuzzy sets theory. *Intellectual Technologies on Transport*, no. 1, pp. 16–23.
16. *Smagin V. A., Novikov A. N.* (2020) Funktsiya kontsentratsii P. Levi i yeyo primeneniye v teorii nehotkikh mnozhestv L. Zade [Concentration function of P. Levy and its application in fuzzy sets theory of L. Zadeh]. Penza, izd. PGU Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve [Penza, Penza State University Press Models, Systems and Networks in Economics, Technology, Nature and Society], vol. 3, no. 35, pp. 102–117. (In Russian) ISSN: 2227-84-86.

*Статья представлена к публикации профессором А. Д. Хомоненко  
Поступила в редакцию 01.08.2021, принята к публикации 23.08.2021*

*СМАГИН Владимир Александрович* — доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, действительный член Международной академии информатизации (Санкт-Петербург)  
va\_smagin@mail.ru

*БУБНОВ Владимир Петрович* — доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные и вычислительные системы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I  
bubnov1950@yandex.ru

© Смагин Вл. А., Бубнов Вл. П., 2021

УДК 656.251:930.2

**С. В. Власенко, канд. техн. наук**

**С. А. Сушков**

**С. В. Гришечко, канд. техн. наук**

*Кафедра «Автоматика и телемеханика»,*

*Омский государственный университет путей сообщения*

## **АВГУСТИН БЕТАНКUR КАК СОЗДАТЕЛЬ УСТРОЙСТВ СИГНАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ПЕРВЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ЕВРОПЫ И ПРЕДВЕСТНИК СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ**

В статье рассказывается о зарождении принципов сигнализации, их назначении и развитии с IV века до н.э. и до появления полноценного оптического телеграфа в XVIII столетии. Описаны исследования Клода Шаппа об особенностях человеческого зрения и обоснование выбора цветов для оптического телеграфа, которые (с небольшими изменениями, учитывающими развитие техники) используются в современных системах железнодорожной и автомобильной сигнализации. Представлен передающий аппарат и алфавит Клода Шаппа с документальными примерами его использования во Франции, указаны основные недостатки этого способа передачи данных. Далее приводится альтернативный принцип передачи данных с помощью одного крыла семафора в оптическом телеграфе, разработанном и в 1798 году внедренном между Мадридом и Кадисом (Испания) Августином Бетанкурom. Показаны схемы аппаратов оптического телеграфа Августина Бетанкура, дано их сравнение с механическими сигналами на железнодорожном транспорте. Со ссылками на исторические документы и свидетельства дается эволюция оптического телеграфа Августина Бетанкура от систем передачи данных между городами до систем обмена информацией между соседними постами и станциями, необходимых на первых этапах развития рельсового транспорта. Представлено развитие телеграфа от механических устройств поворотом на 45 градусов, извещавших о приближении поезда к посту, к полноценным сигналам для машинистов, которые положением крыла стали передавать информацию о необходимости остановки или о разрешении на проследование маршрута с максимальной либо ограниченной скоростью. В качестве переходного этапа от механических к электрическим сигналам на железнодорожном транспорте поясняется принцип работы семафоров с зажигаемыми в ночное время керосиновыми лампами со светофильтрами, механически связанными с положением крыла. На примере развития семафоров изложены исторические причины появления систем сигнализации, использующих комбинационные показания с двумя огнями. Статья открывает новую, не слишком известную ранее страницу деятельности первого ректора первого транспортного вуза России в качестве разработчика систем передачи данных с помощью оптического телеграфа, чьи изобретения пережили автора и в усовершенствованной благодаря развитию техники форме используются на железнодорожном транспорте в наши дни.



Августин Бетанкур, восприятие цвета глазом, оптический телеграф, семафор, железнодорожная автоматика, оптическая передача данных между станциями, извещение о приближении поезда, первые механические сигналы для машинистов, керосиновые лампы для информации о положении крыла, второе крыло семафора, появление электричества, замена крыльев семафора электрическими лампами, светофор, переход на одну лампу в современных системах сигнализации

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4- 631-644

## Введение

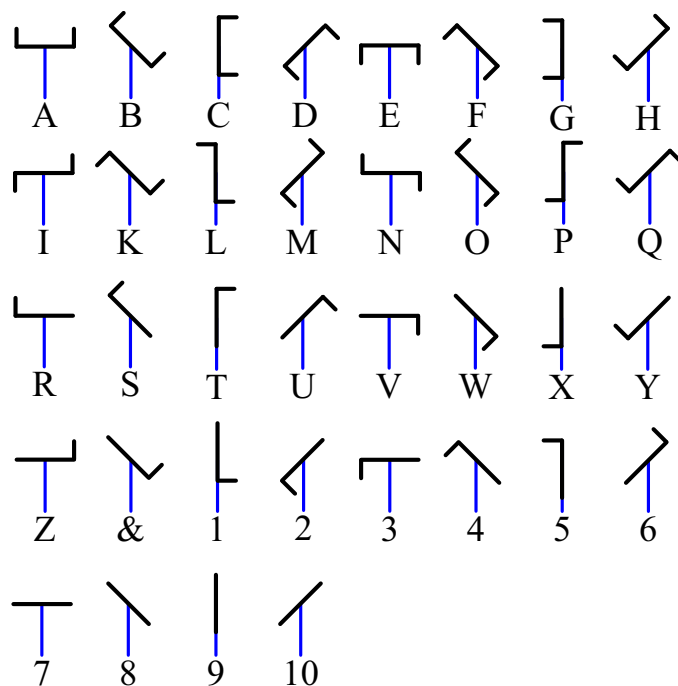
Августин Хосе Педро дель Кармен Доминго де Канделярия де Бетанкур-и-Молина, основатель и первый руководитель созданного в 1809 году в Санкт-Петербурге Института инженеров путей сообщения, известный в первую очередь как специалист по механике, химии, статике и архитектуре, завершил свой жизненный путь в 1824 году, всего за год до появления первой в мире железной дороги общего пользования с паровой тягой (1825, участок Стоктон – Дарлингтон в Англии) [1]. Однако созданные под его руководством устройства передачи данных пережили их создателя и обеспечили безопасность движения поездов на первых железных дорогах Европы [2]. Замена им пришла лишь во второй половине XIX столетия с началом использования электричества для передачи информации на расстояние. Поэтому мы можем по праву считать Бетанкура предвестником систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи, разработанных впоследствии для обеспечения безопасности и управления движением на рельсовом транспорте. И хотя эти изобретения применялись на железных дорогах России лишь опосредованно [3], созданные под его руководством первые системы сигнализации в Испании и Франции и построенные его последователями линии оптической передачи данных в Германии на определенном историческом этапе были единственным средством для согласования между дежурными по соседним станциям отправления, прибытия и порядка следования поездов по перегону [4]. Сами же оптические устройства – после начала применения электричества для передачи данных на расстояние – определили название, форму и окраску первых железнодорожных механических сигналов, вошедших в обиход многих стран как семафоры (*sema* по-гречески «знак», *phoros* – «несущий») [5]. Сохранив старое название, они стали использоваться для передачи оптических данных уже не между дежурными соседних станций, а между дежурным по станции и машинистом. «Наследники» этих устройств – известные нам железнодорожные светофоры, которые во многих странах Европы еще долго, вплоть до начала XX столетия, по привычке называли оптическим телеграфом [2]. Возможным историческим последствием такой «миграции» семафоров от устройств оптической связи к устройствам автоматики является сведение в одну службу систем связи и СЦБ, которое и сейчас практикуется на многих железных дорогах мира.

## 1. Зарождение принципов сигнализации и их развитие до изобретений Августина Бетанкура

Слово «семафор» не случайно имеет греческие корни. Греки, лучшие мореходы своего времени, еще в IV веке до н. э. ввели в обиход визуальную передачу данных на море. В солнечную погоду это делалось с помощью специальных отражающих зеркал, установленных на кораблях, а в темное время суток — с помощью костров. Знаками моряки передавали друг другу сообщения, координировали свои действия и согласованно боролись с неприятелем. И хотя до появления единой системы оптической сигнализации со своей азбукой было еще далеко, в разных регионах мира специальные огни (или прерывание их свечения с помощью различных средств в оговоренном порядке) долгое время использовались для передачи на расстояние экстренных сообщений.

Родившийся в семье, ведущей происхождение от короля Канарских островов, Августин Бетанкур был с детства знаком с этой оптической системой, поскольку при правительственной резиденции на Тенерифе, главном острове этого архипелага, существовала наземная сеть передачи визуальных сообщений [6]. Горный рельеф острова определил расположение сигнальных башен, которые при появлении неприятеля оповещали военных, да и всех жителей острова, об опасности, а погасшими или мигающими огнями указывали на место расположения неприятеля. Некоторые из сигнальных башен на другом испанском архипелаге — Балеарских островах — сохранились до сего дня.

Предшественник Бетанкура французский инженер Клод Шапп (1763—1805) предложил единую форму механических сигналов с крыльями, а также соответствующую вариантам положения крыльев семафора и дополнительных линеек латинскую азбуку с цифрами (рис. 1), которая получила широкое распространение в конце XVIII столетия во Франции [7]. Первую линию оптического телеграфа построили в 1793—1794 годах между Парижем и Лиллем. Информация на расстоянии 225 км передавалась с помощью 22 промежуточных станций. Первое практическое использование этой линии произошло 1 сентября 1794 года, когда в Париже была получена депеша для Национального конвента о победе армии Французской республики над австрийцами. Для обеспечения максимально возможной дальности передачи оптической информации (свыше 10 км) Клод Шапп провел экспериментальные исследования восприятия различных цветов человеческим глазом. Белый и красный цвета были определены как наиболее чувствительные для зрения [8]. Именно поэтому крылья и линейки оптического телеграфа стали окрашивать в белый цвет с красной окантовкой (рис. 2). Те же цвета впоследствии применялись как основные для разрешающего (белый) и запрещающего (красный) показаний на железнодорожном транспорте до конца XIX столетия, пока не появилось электрическое уличное освещение и не потребовалось заменить схожий со светом первых электроламп белый цвет на следующий по чувствительности в шкале испытаний Клода Шаппа (табл. 1) [9].

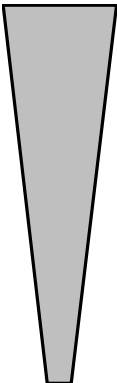


**Рис. 1.** Алфавит оптического телеграфа К. Шаппа



**Рис. 2.** Станция оптического телеграфа во Франции, на иллюстрации представлен момент передачи буквы „Q“

**Таблица 1.** Цвета сигнализации на железнодорожном транспорте

Цвет	Видимость (по Шаппу)	Основное применение цвета	
		Исторически	В настоящее время
Белый		Проследование	Маневровые и вспомогательные сигналы
Красный		Остановка	Остановка
Зеленый		Предупреждение	Проследование
Синий		—	Остановка (для маневровых в некоторых странах)
Желтый/ оранжевый	Не проверялось	—	Предупреждение



**Рис. 3.** Вид современного механического сигнала на железных дорогах Германии. Красно-бело-красная вертикальная полоса на мачте сигнала указывает на его абсолютное значение и требует безусловной остановки при горизонтальном (запрещающем) положении крыла



Белый и красный цвета по-прежнему используются для окраски крыльев механических сигналов (рис. 3) на многих железных дорогах для обозначения статуса светофора (станционный/перегонный), а также в основных дорожных знаках для автотранспорта.

## 2. Предложенный испанским инженером принцип передачи данных на расстояние с помощью крыла семафора

После совершеннолетия Августин Бетанкур был направлен в испанскую армию, а затем, в 20 лет, в чине старшего офицера переведен в Париж, где получил всестороннее научное образование. После этого испанское правительство направило его в наиболее развитые страны Западной Европы для обозрения систем судоходства, каналов, паровых машин и последних технических изобретений. В 1798 году Бетанкуру было поручено устройство оптического телеграфа между Мадридом и Кадисом и организация в Испании Корпуса инженеров путей сообщения (сегодня – Политехнический университет Мадрида), которым он руководил с 1802 по 1807 годы. При организации оптического телеграфа Бетанкур учел недостатки системы Клода Шаппа, обусловленные сложной конструкцией управляемых человеком крыльев и линеек. Для его усовершенствования (а точнее – упрощения) Августин Бетанкур предложил использовать только одно крыло семафора без управляемых линеек. Подобно стрелке на часах, в зависимости от угла поворота относительно мачты оно определяло цифру или букву алфавита (рис. 4). Бетанкур установил, что человеческий глаз с помощью вспомогательных устройств способен безошибочно определять поворот

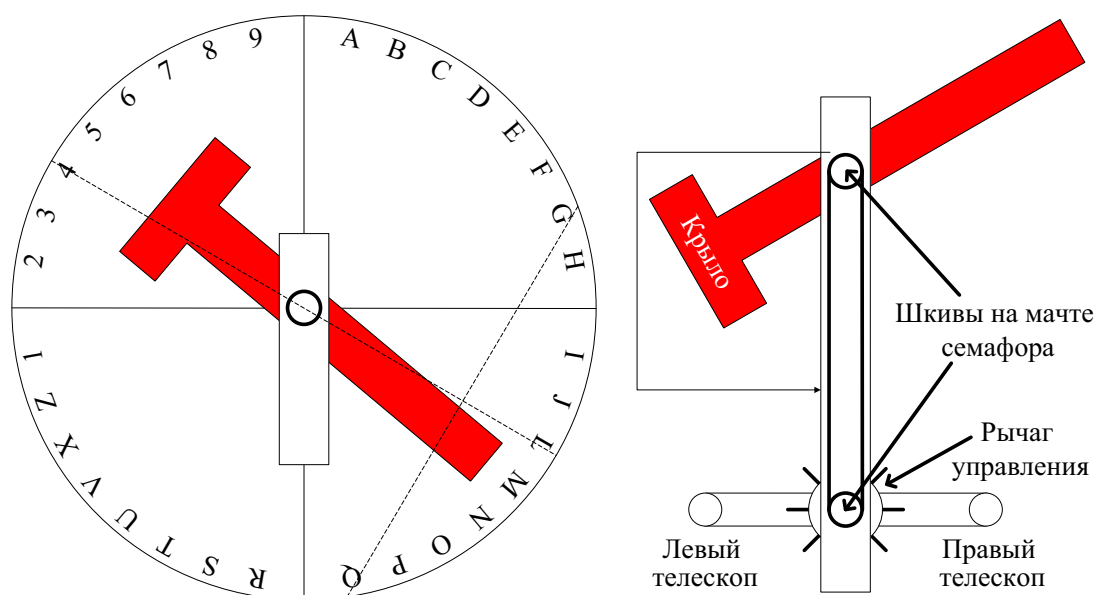


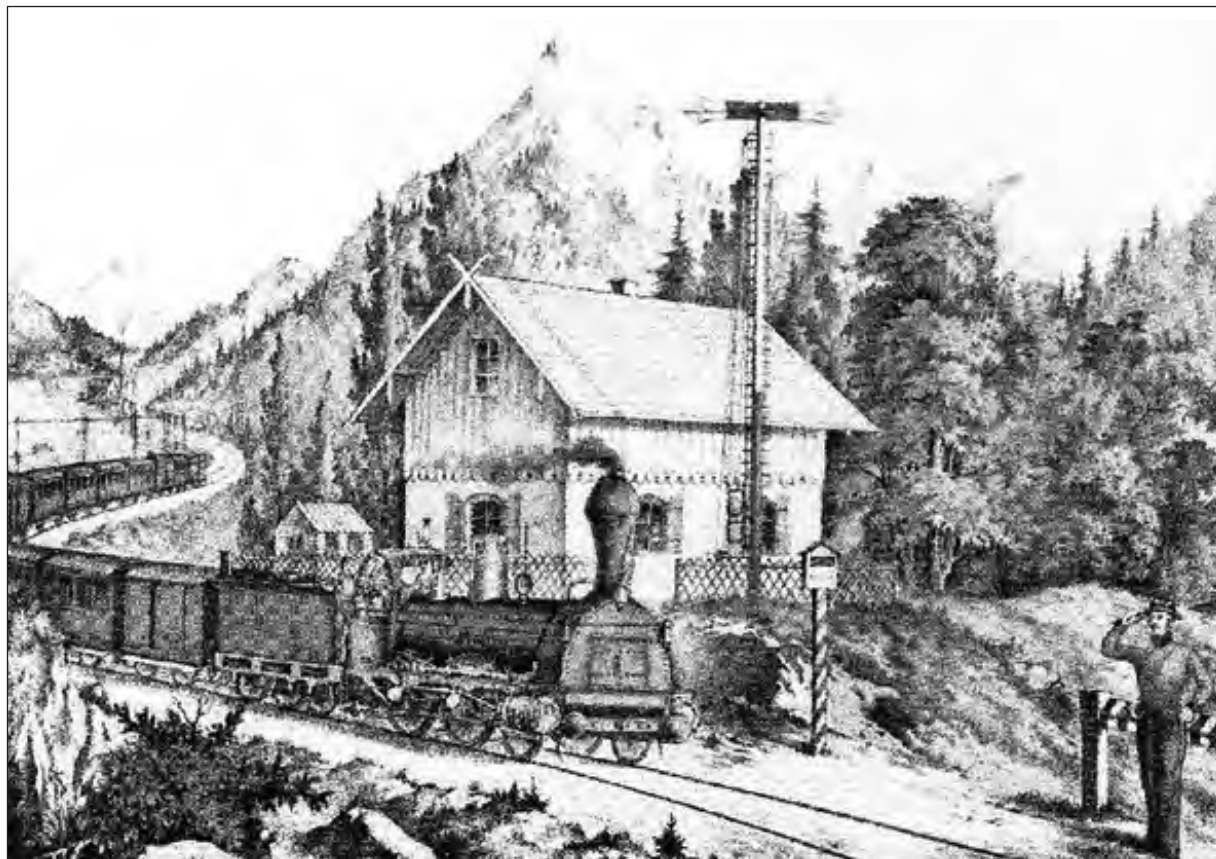
Рис. 4. Оптический телеграф, разработанный Августином Бетанкуром



крыла на угол не менее 10 градусов. Таким образом, появилась возможность передачи 36 знаков (цифр и букв; при этом горизонтальное положение крыла в 0 градусов считалось нерабочим) на значительные расстояния с помощью простого устройства [6]. Как и стрелка часов, крыло должно было оставаться несимметричным, что было достигнуто установкой на одной из сторон поперечной линейки, а в более поздних системах сигнализации — утолщения или круга. Эта предложенная испанским инженером форма крыла телеграфного сигнала и стала прообразом семафора, используемого на второстепенных железнодорожных линиях многих стран мира и по сей день (см. рис. 3).

### **3. Семафор Бетанкура: путь от телеграфа к передаче команд машинисту**

Первые железные дороги Европы строились между крупными городами, где, как правило, уже имелась линия оптической связи. Там же, где ее не было, устройства оптической сигнализации создавались специально для железных дорог и располагались рядом с постами станций и переездов, откуда визуальным методом происходил обмен информацией между городами, а для обеспечения безопасности перевозочного процесса — также между дежурными по соседним станциям. В целях сохранения единой системы передачи данных первое время не использовались специальные сигналы для железных дорог, и запрос на отправление поездов на перегон дежурные отправляли в виде текста, буква за буквой. Лишь позднее были предложены специальные знаки для ускорения передачи данных о движении поездов. Так, например, извещение об отправлении поезда на перегон и соответственно этому оповещение о приближении поезда для дежурных по переездам передавалось поднятием крыла семафора на угол 45 градусов. Оно транслировалось в направлении движения поезда от поста к посту, пока не достигало участка, занятого предшествующим поездом, где (до освобождения секции) крыло семафора оставалось в исходном горизонтальном положении [2]. И хотя изменение положения крыла визуального телеграфа всего лишь извещало посты о приближении поезда, косвенным образом оно могло служить для оповещения машиниста о свободности следующего участка. С учетом большого количества переездов на железной дороге (в Германии и Австрии переезды в среднем приходились на каждый километр пути, в Англии — на каждые несколько километров) расстояние между постами было невелико. Поэтому в размещении высоких башен для передачи визуальных сигналов на 10–12 км, как в первых оптических системах, не было необходимости. Чаще всего семафоры устанавливали на крышах зданий или на мачтах вдоль железнодорожной линии. Благодаря этому их положение могли видеть машинисты проезжающих поездов. Но в то время показания семафоров служили только задачам визуального телеграфа, а команды к отправлению поезда или его остановке передавались машинисту флажками или специальными знаками непосредственно от дежурных по станциям и переездам (рис. 5) [4].



**Рис. 5.** Дежурный по переезду обеспечивает пропуск поезда по участку. Установленный на высокой мачте у здания поста оптический сигнал предназначен для обмена информацией между дежурными (литография из Южной Германии)

Через несколько десятилетий электрический сигнал заменит визуальный телеграф, появятся аппараты Морзе и Сименса, которые придут на железные дороги России как раз к началу эксплуатации первой линии дальнего следования между Санкт-Петербургом и Москвой. По этой причине на железнодорожных магистралях Российской империи никогда не будет оптического телеграфа. В истории страны останутся лишь небольшие линии оптической связи между Санкт-Петербургом и пригородами, не имеющие отношения к рельсовому транспорту. А когда на железные дороги России придут «потомки» визуального телеграфа – поездные семафоры, они изначально будут восприниматься как сигналы для машинистов [3]. И лишь благодарная память о первом руководителе Института инженеров путей сообщения в Санкт-Петербурге дает нам повод проследить историю появления семафора, первых систем обеспечения безопасности движения поездов и личный вклад Августина Бетанкура в их создании.

В Европе миграция от семафоров как устройств для оптического телеграфа к сигналам для машинистов поездов происходила постепенно. Если на новых и магистральных линиях внедрялся электрический телеграф, то старые и второстепенные линии еще многие десятилетия использовали оптические системы


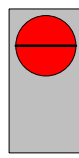

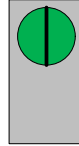

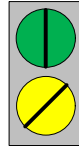
передачи данных. Когда же семафоры оказывались ненужными для обмена данными между постами, их применяли для удаленной передачи информации машинисту о разрешении на движение либо требовании остановки. На первых порах достаточно было всего двух показаний сигнала, поэтому положение крыла семафора (горизонтальное – для остановки, а поднятое на 45 градусов – для движения) определяло всю необходимую машинисту информацию [10]. Для передачи команд в темное время суток на мачте семафора устанавливалась керосиновая лампа, а к подвижному крылу крепились светофильтры, которые в соответствии с положением крыла горели красным или белым (впоследствии зеленым) цветом (см. рис. 3). При восходе солнца керосиновые лампы тушили, и днем лишь угловое положение крыла (так же, как и в изобретенной Бетанкуром системе передачи данных на расстояние) указывало машинисту на разрешение или запрещение проследования сигнала.

#### **4. Отход от идей Бетанкура и возвращение к ним в принципах современной железнодорожной сигнализации в XXI веке**

Когда скорости следования поездов выросли до такой степени, что потребовался дополнительный сигнал, предупреждающий о необходимости их снижения перед въездом на станцию при следовании по маршруту с отклонением, логично было бы следовать идеям основателя систем сигнализации и использовать поворот крыла семафора на другой хорошо различимый для машиниста угол для разрешения движения с ограниченной скоростью. Но в то время предпочли установить на семафор дополнительное крыло, которое занимало положение 45 градусов для сигнализации следования поезда с пониженной скоростью и принимало вертикальное положение в остальных случаях (рис. 6). Два крыла семафора означало «два огня в ночное время», и таким образом в большинство сигнальных систем Европы вошло показание «два огня, нижний желтый», сигнализирующее о въезде на боковой путь станции [11]. В этой связи отметим, что в последних универсальных системах сигнализации (например, в современной голландской системе, в немецкой системе Ks и швейцарской системе N), разработанных в начале нынешнего столетия, предпочли вернуться к идеям Августина Бетанкура и использовать только «одно крыло», т. е. только одну лампу на все случаи сигнализации, а предупреждение об ограничении скорости передавать различными цветами и режимами мигания [12, 13].

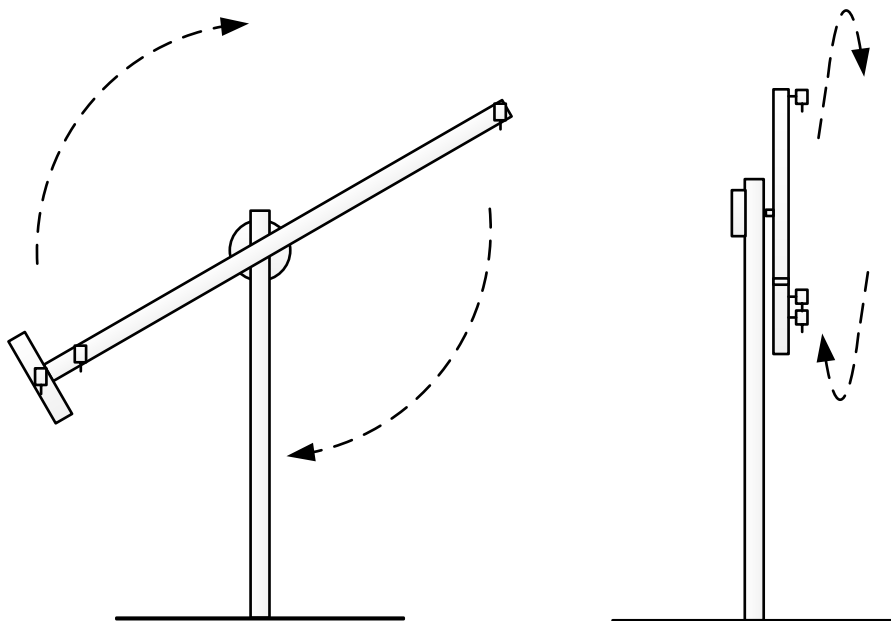
Однако вернемся в конец позапрошлого столетия. Управлять сигналами стали с помощью электричества, необходимые для движения поездов огни семафора теперь могли гореть днем и ночью, и положение крыльев потеряло свое первоначальное значение.

На современных светофорах машинистам достаточно лишь световых показаний для определения скорости следования поезда. Предполагается, что вскоре напольные светофоры потеряют свое значение, а необходимая для движения

Действие	Механический сигнал	Световой сигнал
Остановка		
Проследование		
Проследование по боковому пути со снижением скорости		

**Рис. 6.** Сигнализация семафоров и соответствующих показаниям крыльев сигнальных ламп для остановки и проследования по главному и по боковому пути

информация будет поступать от поста централизации сразу на локомотив [14]. Впрочем, от изобретенной испанским инженером системы передачи данных кое-что останется на железных дорогах, видимо, навсегда. В оговоренных инструкциях экстренных ситуациях дежурный разработанного Бетанкуром телеграфного поста должен был подавать аварийный сигнал движением крыла по кругу (рис. 7) [6]. На подавляющем большинстве железных дорог мира тот же



**Рис. 7.** Аварийная сигнализация в разработанной Бетанкуром системе передачи данных



знак — вращение по кругу рукой днем и любым огнем ночью — используется для передачи машинисту команды экстренной остановки.

### Заключение

В 2011 году в Музее науки и космоса (провинция Санта-Крус-де-Тенерифе, Испания) в память о великом сыне Канарских островов установили разработанный Августином Бетанкуром механический сигнал [15, 16], ставший через полсотни лет после его изобретения прообразом первого механического сигнала для железнодорожного транспорта. В 1978 году между орбитами Марса и Юпитера была открыта малая планета под номером 11446, в честь великих достижений испано-российского инженера получившая название — Бетанкур. Так имя первого ректора первого транспортного вуза России и предвестника систем железнодорожной автоматики вошло в вечность.

### Библиографический список

1. Коновалова Н. Лекало Бетанкура / Н. Коновалова // Санкт-Петербургские ведомости. — 5.12.2019.
2. Pottgießer H. Sicher auf den Schienen. Fragen zur Sicherheitsstrategie der Eisenbahn von 1825 bis heute / Hans Pottgießer: Springer Basel AG, 1988. — 261 s.
3. Theeg G. Streckensicherungstechnik in Russland / Gregor Theeg, Sergey Vlasenko // Signal+Draht. — 2007. — № 1–2. — S. 34–38.
4. Suwe Karl-Heinz. Entwicklung der Signaltechnik — ein Blick zurück/Karl-Heinz Suwe // Signal & Draht. — 2006. — № 1–2. — S. 19–36.
5. Власенко С. В. Мир железнодорожной автоматики, информатики и связи / С. В. Власенко // Автоматика, связь, информатика. — 2010. — № 4. — С. 42–44.
6. Agustin de Betancourt. Un ingeniero canario universal // Museo de la ciencia y el cosmos. — 2011. — 48 p.
7. Theeg G. Railway Signalling & Interlocking / G. Theeg, S. Vlasenko (eds.) // International Compendium. 3rd Edition, PMC Media, 2020. — 560 p.
8. Власенко С. В. Системы сигнализации на железных дорогах мира / С. В. Власенко, Г. Теег, У. Машек // Автоматика, связь, информатика. — 2007. — № 3. — С. 46–48.
9. Theeg G. Analyse europäischer Signalsysteme / Gregor Theeg, Ulrich Maschek // Signal+Draht. — 2005. — № 6. — S. 18–23.
10. Machner C. Eine vergleichende Betrachtung internationaler Lichtsignalbilder / Claudia Machner, Göran Unzner // Der Eisenbahningenieur. — 2013. — № 1. — S. 12–18.
11. Pachl J. Systemtechnik des Schienenverkehrs — Bahnbetrieb planen, steuern und sichern (9. Aufl.) / Jörn Pachl // Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. — 295 s.
12. Теег Г. Сигнализация на железных дорогах Европы / Г. Теег, С. В. Власенко // Железные дороги мира. — 2006. — № 11. — С. 61–64.
13. Pachl J. Besonderheiten ausländischer Eisenbahnbetriebsverfahren (2. Aufl.) / Jörn Pachl // Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019. — 58 s.
14. Feltz A. Bahnbetrieb im 21. Jahrhundert / A. Feltz // Signal+Draht. — 2010. — № 10. — S. 3–5.



15. Erinnerungen an die Zukunft // Teneriffa Panorama, 19.05.2011. URL: <http://www.teneriffapanorama.es/1000003/1000031/0/32927/article.html> (Zugang: August 05, 2021) (In Russland)
16. Nuevo módulo en la plaza del “Cosmos”, 12.05.2011. URL: <https://www.museosdetenerife.org/mcc-museo-de-la-ciencia-y-el-cosmos/nuevo-modulo-en-la-plaza-del-cosmos/> (Acceso: agosto 05.2021) (En Rusia)

**S. V. Vlasenko, S. A. Sushkov, S. V. Grishechko**

*Omsk State Transport University*

## **AGUSTIN DE BETANCOURT AS CREATOR OF OPTICAL TELEGRAPH MACHINE USED ON THE FIRST EUROPEAN RAILWAY LINES AND PRECURSOR OF RAILWAY SIGNALLING SYSTEMS**

The origin of signalling principles, their purpose and development since the 4th century BC are described. Claude Chappe's research on the peculiarities of human vision and the rationale for the choice of colors for the optical telegraph are presented. These principles are used in modern rail and road signaling systems with slight modifications to reflect the development of technology. The transmission apparatus and the Claude Chappe alphabet are presented, documentary examples of its use in France are proposed, and the main disadvantages of this principle of data transmission are indicated. Further in the article, an alternative principle of data transmission using a single semaphore wing in an optical telegraph is presented. It was developed and introduced in 1798 between Madrid and Cadiz (Spain) by Agustin de Betancourt. The article shows the diagrams of the optical telegraph apparatus of Agustin de Betancourt, and also gives its comparison with first mechanical signals used in railway transport. With references to historical documents and evidence, the evolution of the optical telegraph by Agustin de Betancourt from data transmission systems between cities to systems for the exchange of information between neighboring railway posts and stations on the first railway lines is presented. The evolution of the telegraph from mechanical devices announcing the train approach to the railway post to the signals for train drivers thanks to the change of wing position is shown. As a transitional stage from mechanical to electrical signals in railway transport, the principle of operation of semaphores with kerosene lamps lit at night with light filters mechanically connected to the position of the wing is explained. Based on development of mechanical signals, the historical reasons for signal aspect with two lamps in different modern signalling systems are presented. The article opens a new, previously little-known page of the activities by Agustin de Betancourt, who was not only the first rector of the first transport high school in Russia but also one of developers of data transmission systems used optical telegraph. His inventions such as mechanical signal with one wing are using in improved form in railway signalling systems up today.

Agustin de Betancourt, semaphore, optical telegraph, mechanical signal, signal aspect for train approaching, semaphore wing turns, different lights instead of wing angle, railway signalling systems based on Betancourt's innovation

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4- 631-644

### **References**

1. *Konovalova N.* (2019) De Betancourt's High Standart. *Sankt-Peterburgskie Vedomosti*, 5.12.2019. (In Russian)

2. Pottgießer H. (1988) *Sicher auf den Schienen. Fragen zur Sicherheitsstrategie der Eisenbahn von 1825 bis heute*. Hans Pottgießer, Springer Basel AG, s. 261.
3. Theeg G., Vlasenko S. (2007) Streckensicherungstechnik in Russland. *Signal+Draht*, no. 1–2, s. 34–38.
4. Suwe Karl-Heinz. (2006) Entwicklung der Signaltechnik – ein Blick zurück. *Signal & Draht*, no. 1–2, s. 19–36.
5. Vlasenko S. V. (2010) Mir zheleznodorozhnoy avtomatiki, informatiki i svyazi [The world of signals and interlocking, informatics and signal communication]. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, communication, informatics], no. 4, pp. 42–44. (In Russian)
6. Agustin de Betancourt. Un ingeniero canario universal. *Museo de la ciencia y el cosmos*, 2011, 48 p.
7. Theeg G., Vlasenko S. (2020) *Railway Signalling & Interlocking*. International Compendium. 3<sup>rd</sup> ed., PMC Media, 560 p.
8. Theeg G., Vlasenko S., Maschek U. (2007) Sistemy signalizatsii na zheleznykh dorogakh mira [Signals and interlocking on the railways of the world]. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, communication, informatics], no. 3, pp. 46–48. (In Russian)
9. Theeg G., Maschek U. (2005) Analyse europäischer Signalsysteme. *Signal+Draht*, no. 6, s. 18–23.
10. Machner C., Unzner G. (2013) Eine vergleichende Betrachtung internationaler Lichtsignalbilder. *Der Eisenbahningenieur*, no 1, s. 12–18.
11. Pachl J. (2018) *Systemtechnik des Schienenverkehrs – Bahnbetrieb planen, steuern und sichern* (9. Aufl.). Wiesbaden, Springer Vieweg Publ., 295 s.
12. Theeg G., Vlasenko S. (2006) Signalizatsiya na zheleznykh dorogakh Yevropy [Signals and interlocking on the railways of Europe]. *Zheleznyye dorogi mira* [Railways of the World], no. 11, pp. 61–64. (In Russian)
13. Pachl J. (2019) *Besonderheiten ausländischer Eisenbahnbetriebsverfahren* (2. Aufl.) Wiesbaden, Springer Vieweg Publ., 58 s.
14. Feltz A. (2010) Bahnbetrieb im 21. Jahrhundert. *Signal+Draht*, no. 10, s. 3–5.
15. Erinnerungen an die Zukunft. Teneriffa Panorama, 19.05.2011. Available at: <http://www.teneriffapanorama.es/1000003/1000031/0/32927/article.html> (Zugang: August 05, 2021) (In Russland)
16. Nuevo módulo en la plaza del “Cosmos”, 12.05.2011. Available at: <https://www.museosde-tenerife.org/mcc-museo-de-la-ciencia-y-el-cosmos/nuevo-modulo-en-la-plaza-del-cosmos/> (Acceso: agosto 05.2021) (En Rusia)

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

*Поступила в редакцию 09.08.2021, принята к публикации 18.08.2021*

*ВЛАСЕНКО Сергей Валентинович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Омского государственного университета путей сообщения  
vlasenko@fh-erfurt.de

*СУШКОВ Сергей Александрович* – старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика» Омского государственного университета путей сообщения  
sushkovsa@mail.ru

*ГРИШЕЧКО Сергей Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Омского государственного университета путей сообщения  
svgrishechko@mail.ru

© Власенко С. В., Сушков С. А., Гришечко С. В., 2021

# ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ СИСТЕМЫ

---

УДК 004.052.42+681.518.5

## **Д. В. Ефанов, докт. техн. наук**

*ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга», Санкт-Петербург  
Высшая школа транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта  
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого  
Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»,  
Российский университет транспорта, Москва*

## **Г. В. Осадчий, канд. техн. наук**

*ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга», Санкт-Петербург*

## **И. В. Лесковец, канд. техн. наук**

*Кафедра «Транспортные и технологические машины»,  
Белорусско-Российский университет, Могилёв*

## **МЕТОДЫ СИНТЕЗА САМОПРОВЕРЯЕМЫХ КОМБИНАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ НА ОСНОВЕ ЛОГИЧЕСКОГО ДОПОЛНЕНИЯ ДО РАВНОВЕСНОГО КОДА «1 ИЗ 4»**

Статья посвящена развитию метода логического дополнения для синтеза самопроверяемых цифровых устройств и систем. Освещены особенности использования равновесного кода «1 из 4» для синтеза схем встроенного контроля комбинационных логических устройств по методу логического дополнения. Описаны базовые структуры организации схем встроенного контроля по методу логического дополнения до равновесного кода «1 из 4». Рассмотрено несколько способов организации схем контроля. Первый подразумевает контроль устройств с выделением «четверок» выходов и использование преобразования трех выходов из четырех в базовой структуре. Еще один способ организации схемы контроля по методу логического дополнения до равновесного кода подразумевает поиск «троек» выходов и дополнение их до четырехразрядного кодового слова кода «1 из 4» путем непосредственного подключения выхода блока контрольной логики к входу тестера без преобразования сигнала. Третий способ связан с применением базовой структуры со схемой предварительного сжатия сигналов от объекта диагностирования и контролем уменьшенного числа выходов. В статье приводятся результаты экспериментальных исследований для каждого из способов организации схемы встроенного контроля, оценены показатели сложности технической реализации структур, а также вероятность обнаружения ошибок на выходах объекта диагностирования при внесении одиночных константных неисправ-

ностей. Метод логического дополнения позволяет во многих случаях синтезировать более простые самопроверяемые устройства, чем при использовании метода дублирования с высокими показателями обнаружения ошибок на выходах объекта диагностирования.

Комбинационное устройство, схема встроенного контроля, метод логического дополнения, равновесный код «1 из 4», самопроверяемая структура, дублирование, оптимизация схем контроля, схемы сжатия сигналов

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-645-668

## Введение

В процессе разработки и конструирования надежных и безопасных систем управления ответственными технологическими процессами и их компонентов широко применяются методы синтеза устройств с самопроверяемыми и контролепригодными структурами [1–5]. При самопроверяемой реализации некоторого устройства требуются дополнительные аппаратные затраты, связанные либо с внесением избыточности в сам исходный объект диагностирования, либо с реализацией дополнительных средств встраиваемого контроля [6–10]. Внесение избыточности осуществляется в соответствии с определенными принципами, позволяющими фиксировать некоторые заранее установленные диагностические параметры. Например, часто осуществляется контроль принадлежности формируемых на выходах исходного устройства векторов некоторому избыточному коду [11] либо каждой отдельной функции – определенному классу функций алгебры логики [12].

При использовании избыточных кодов в процессе построения самопроверяемых устройств исходный объект (объект диагностирования) снабжается схемой встроенного контроля (СВК), позволяющей косвенно устанавливать наличие неисправностей по результатам вычислений рабочих функций [1]. В качестве основы такой схемы контроля используются, как правило, коды, ориентированные на обнаружение ошибок, а не на их исправление. Это обусловлено меньшей их избыточностью [13] и, как следствие, меньшими аппаратными затратами на реализацию СВК. Часто для этих целей применяют коды с суммированием и их различные модификации [14], а также равновесные коды [15].

Исследования ученых во всем мире в области синтеза СВК показывают, что во многих случаях применение кодов с обнаружением ошибок позволяет синтезировать самопроверяемые устройства, имеющие меньшую, чем при дублировании, избыточность [16–19]. При этом в процессе синтеза ориентируются не на полное множество неисправностей, а на конкретную их модель, например, на модель «временной задержки» или «константной неисправности».

Данная работа освещает результаты исследований в области синтеза самопроверяемых комбинационных устройств на основе метода логического дополнения с контролем вычислений по равновесному коду «1 из 4» (1/4-коду).



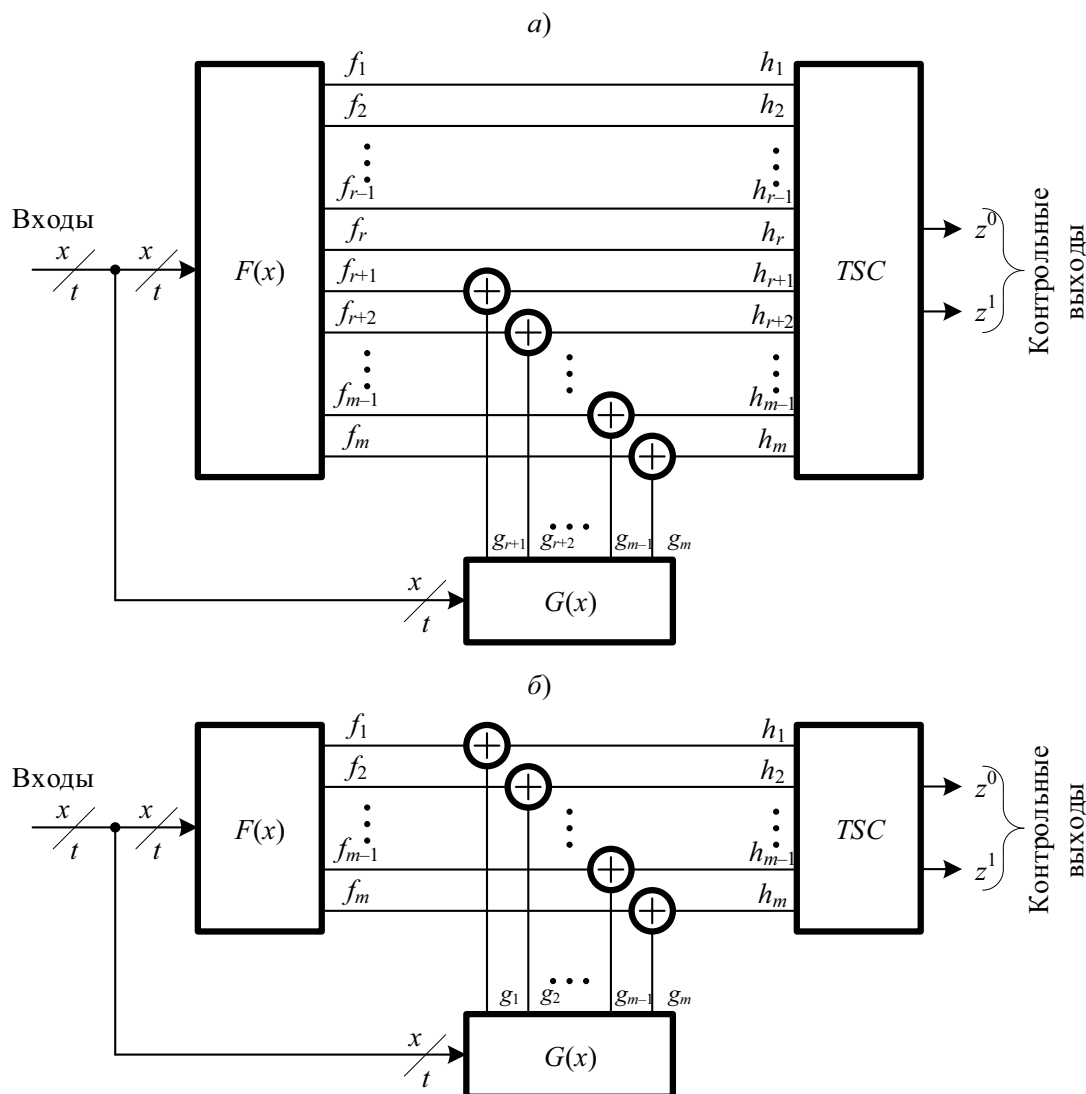
## 1. Метод логического дополнения

Метод логического дополнения, в отличие от традиционного метода вычисления контрольных разрядов, подразумевает специальное преобразование всех или части рабочих функций объекта диагностирования. Кодовый вектор, формируемый на рабочих выходах, преобразуется в кодовое слово заранее выбранного кода [20]. Возможно преобразование рабочих функций в функции, принадлежащие определенному классу [21]. Следует отметить, что возможна и комбинация этих диагностических параметров [22]. Одной из первых работ в области синтеза СВК по методу логического дополнения является [23], где описывается метод самодвойственного паритета, позволяющий осуществлять контроль комбинационных устройств с помощью одной функции паритета, имеющей самодвойственный вид. При высокой обнаруживающей способности метод позволяет синтезировать СВК со средней сложностью 14,6 % от сложности объекта диагностирования (на примере представленной в работе выборки), что даже меньше, чем при использовании классического метода контроля по паритету (35,4 %).

В ряде публикаций, например, в [24], развивается метод логического дополнения для организации СВК по разделимым кодам. Однако наибольшее количество работ в этой области связано с использованием для организации СВК неразделимых равновесных кодов. Основное внимание уделено именно равновесным кодам, поскольку для них гораздо проще обеспечить самопроверяемость СВК [20]. Кроме того, тестеры равновесных кодов имеют довольно простые структуры [25].

На рисунке 1 приведены структуры организации самопроверяемых устройств по методу логического дополнения (рабочие выходы устройств, идущие к внешним устройствам и системам, не показаны). Объект диагностирования  $F(x)$ , снабженный выходами  $f_1, f_2, \dots, f_m$ , дополняется схемой контроля в составе блока контрольной логики  $G(x)$ , каскада элементов преобразования сигналов (они образуют блок логического дополнения), а также самопроверяемого тестера  $TSC$ .

В структуре на рисунке 1, а) преобразуются не все выходы устройства  $F(x)$ , а лишь часть из них. Таким способом может быть организован контроль по разделимым кодам. Тогда некоторые выходы устройства  $F(x)$  не преобразуются и объединяются в информационный вектор длиной  $r$ , а некоторые функции преобразуются и формируют контрольный вектор длиной  $m-r$ . Например, если для контроля устройства с  $m=8$  выходами используется код с суммированием по модулю  $M=4$  (код Боуза-Лина, [26]), то первые  $r=6$  выходов можно не преобразовывать, а оставшиеся  $m-r=2$  выхода преобразуются в функции, формирующие контрольные векторы кода Боуза-Лина. Может быть использовано и большее количество преобразуемых функций, в т. ч. корректирующих значения разрядов информационных векторов. Факт соответствия формируемо-



**Рис. 1.** Структуры организации схем встроенного контроля по методу логического дополнения: а) с частичным дополнением; б) с дополнением всех функций

го кодового слова заранее установленному коду фиксируется схемой тестера, имеющего, как правило, два выхода. При формировании правильного кодового слова и исправности самого тестера на его выходах  $z^0$  и  $z^1$  возникает парафазный сигнал  $\langle 01 \rangle$  или  $\langle 10 \rangle$ . В случае неисправности самого тестера либо несоответствия кодового слова выбранному коду на выходах тестера формируется непарафазный сигнал  $\langle 00 \rangle$  или  $\langle 11 \rangle$ .

В структуре на рисунке 1, б) преобразуются все выходы  $f_1, f_2, \dots, f_m$  устройства  $F(x)$ . Можно сказать, что это обобщенный случай. Такая организация самопроверяемого устройства позволяет преобразовывать вектор, формируемый на выходах объекта диагностирования, в кодовое слово любого блочного равномерного кода, в т. ч. равновесного.

Среди равновесных кодов наиболее эффективным оказывается использование кодов с малой длиной кодовых слов ( $m < 6$ ). Для таких кодов тестеры

имеют достаточно простые структуры и требуют малого количества тестовых комбинаций для полной проверки. Кроме того, требуется небольшое количество элементов преобразования, для которых также необходимо обеспечение формирования полного множества тестовых комбинаций. Среди таких кодов целесообразно использовать  $1/3$ ,  $1/4$ ,  $2/4$ ,  $1/5$  и  $2/5$  коды. Применению этих кодов при организации контроля комбинационных схем по методу логического дополнения посвящено большое количество работ (в частности соавторов настоящей статьи) [27–36].

При организации СВК многовыходных устройств по равновесным кодам с малой длиной кодовых слов выходы устройства  $F(x)$  разбиваются на группы с контролем их по выбранным кодам с последующим синтезом подсхем контроля для каждой группы и объединением их контрольных выходов на входах самопроверяемого компаратора [37]. Например, устройство с  $m=8$  выходами можно контролировать по двум группам выходов на основе  $1/4$ -кода, а можно контролировать так: по группе из трех выходов на основе  $1/3$ -кода, по группе из четырех выходов на основе  $1/4$ -кода и один выход дублировать, и т. д.

Особое место среди всех равновесных кодов занимает  $1/4$ -код. Он образуется четырьмя кодовыми комбинациями  $\{0001, 0010, 0100, 1000\}$ . Для полной проверки тестера требуется подача на его входы в процессе функционирования устройства хотя бы по разу каждой из приведенных комбинаций. Сам тестер равновесного кода имеет довольно простую структуру. С позиции обнаружения ошибок у  $1/4$ -кода имеется следующее преимущество перед другими кодами. Им не обнаруживаются только  $2C_4^2 = 12$  двукратных ошибок в кодовых словах. При этом все эти ошибки связаны с искажением одного единичного и одного нулевого разрядов (так называемые симметричные ошибки [14]). Все другие двукратные ошибки, а также одно-, трех- и четырехкратные ошибки  $1/4$ -кодом обнаруживаются. Подобной особенностью обладает любой  $1/m$ -код, но с ростом  $m$  растет и количество необнаруживаемых двукратных симметричных ошибок. Можно также отметить и  $1/3$ -код, имеющий меньшее, чем  $1/4$ -код, количество необнаруживаемых ошибок, однако при большом числе выходов устройства число «троек» выходов окажется большим, чем число «четверок», что потребует синтеза большего количества подсхем контроля и, соответственно, приведет к усложнению СВК.

Остановим внимание читателя на использовании при синтезе СВК по методу логического дополнения именно  $1/4$ -кода.

## 2. Использование $1/4$ -кода при организации схем встроенного контроля по методу логического дополнения

При использовании  $1/4$ -кода для организации СВК базовой является структура, приведенная на рисунке 2. Для преобразования любого кодового вектора  $\langle f_4 f_3 f_2 f_1 \rangle$  в кодовое слово  $\langle h_4 h_3 h_2 h_1 \rangle$ , принадлежащего  $1/4$ -коду, достаточно из-

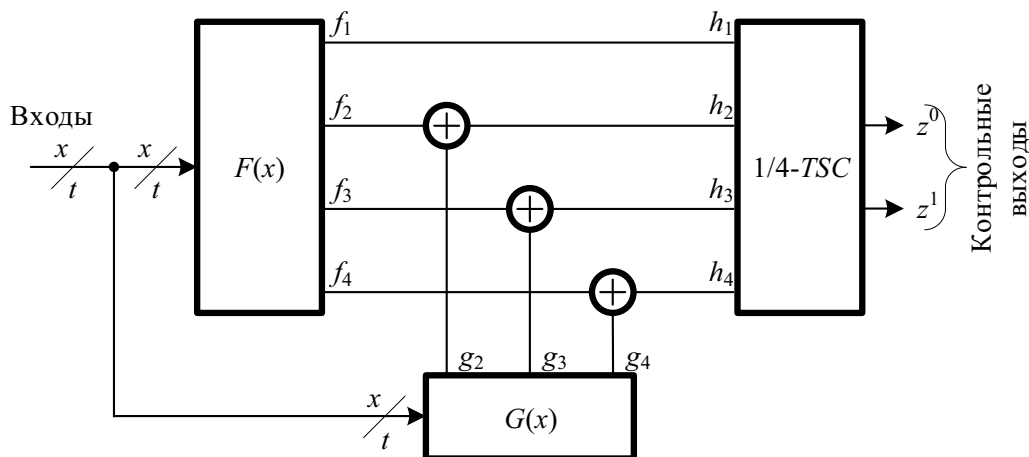


Рис. 2. Базовая структура организации схемы встроенного контроля по 1/4-коду

менить значения только трех функций из четырех. Поэтому в блоке логического дополнения используется трехвыходной блок контрольной логики  $G(x)$  и три двухвходовых сумматора по модулю два в каскаде коррекции сигналов.

При использовании базовой структуры, приведенной на рисунке 2, требуется обеспечить формирование хотя бы по разу каждого из кодовых слов 1/4-кода на входах тестера, а также хотя бы по разу каждого из векторов  $\{00, 01, 10, 11\}$  для полной проверки каждого из элементов сложения по модулю два [38].

Способы вычисления функций, формируемых блоком  $G(x)$ , описаны в [28, 29, 34]. Одним из них является вычисление функций по формулам [29]:

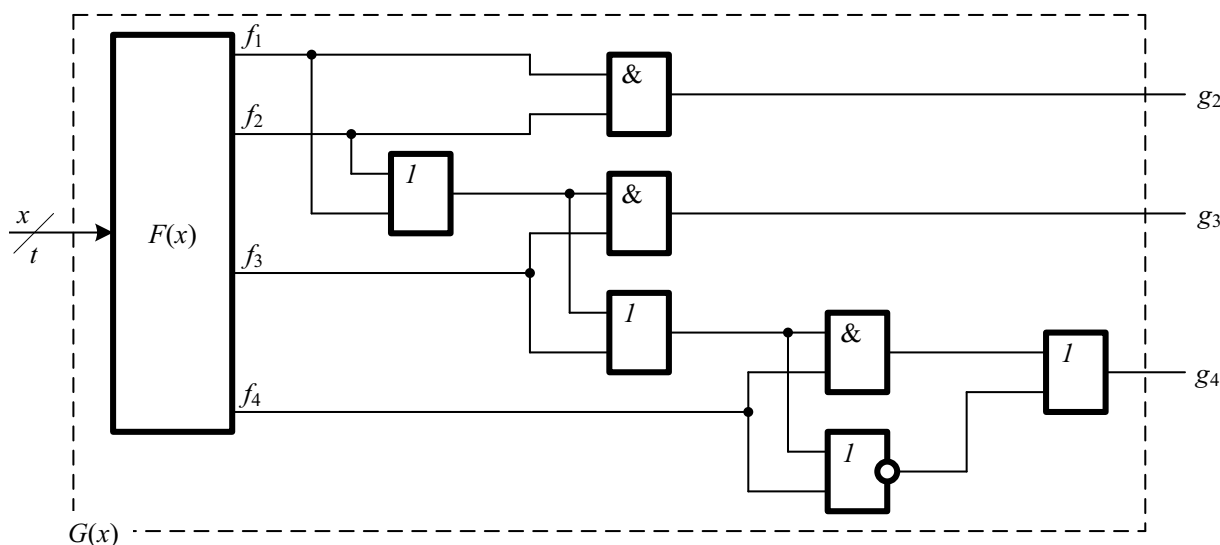
$$\begin{cases} g_2 = f_1 f_2; \\ g_3 = (f_1 \vee f_2) f_3; \\ g_4 = (f_1 \vee f_2 \vee f_3) f_4 \vee \overline{f_1 \vee f_2 \vee f_3 \vee f_4}. \end{cases} \quad (1)$$

В этом случае функции, формируемые на входах тестера 1/4-TSC, будут вычисляться по формулам:

$$\begin{cases} h_1 = f_1; \\ h_2 = f_2 \oplus g_2; \\ h_3 = f_3 \oplus g_3; \\ h_4 = f_4 \oplus g_4. \end{cases} \quad (2)$$

Блок контрольной логики  $G(x)$  синтезируется путем оптимизации структуры, представленной на рисунке 3, стандартными средствами оптимизации логических структур [39, 40].

Для подтверждения эффективности применения 1/4-кода при организации СВК авторами были проведены эксперименты с контрольными комбинацион-



**Рис. 3.** Структура реализации блока контрольной логики до оптимизации

ными схемами, широко применяемыми для тестирования методов технической диагностики цифровых устройств [41]. Результаты экспериментов для некоторых комбинационных схем сведены в таблицу 1.

В таблице 1 приведены следующие данные. Для каждой схемы  $F(x)$  указано число входов ( $n_{in}$ ) и выходов ( $n_{out}$ ), а также сложность  $L_{F(x)}$  технической реализации в условных единицах системы SIS [42]. Указано число  $q$ , характеризующее число выделяемых на выходах устройства «четверок» для отдельного контроля. При этом если число выходов устройства не было кратно четырем, не вошедшие в «четверки» выходы дублировались. Пример такой реализации СВК показан на рисунке 4. Устройство с  $m=10$  выходами контролируется путем выделения двух групп по 4 выхода в каждой, выходы же  $f_9$  и  $f_{10}$  контролируются путем дублирования с использованием стандартной схемы сжатия парафазных сигналов TRC [43].

При синтезе СВК по 1/4-коду был использован следующий способ.

*Алгоритм синтеза структуры СВК по методу логического дополнения с выделением «четверок» выходов:*

1. Определяется величина  $L_{F(x)}$ .
2. Выбирается первая «четверка» выходов устройства  $F(x) - \{f_1^1, f_2^1, f_3^1, f_4^1\}$ .
3. Реализуется структура, приведенная на рисунке 4, после оптимизации которой получается блок контрольной логики  $G^1(x)$ .
4. Проверяется условие  $L_{G^1(x)} \leq L_{F(x)}$ ? Если «нет», то выбирается другая «четверка» выходов путем замены одного или нескольких выходов в выбранной «четверке». Если «да», то фиксируется структура полученного блока  $G^1(x)$ .
5. Выбирается вторая «четверка» выходов устройства  $F(x) - \{f_1^2, f_2^2, f_3^2, f_4^2\}$ .
6. Реализуется структура, приведенная на рисунке 4, что дает блок  $G^2(x)$ . Выходы данного блока оптимизируются совместно с выходами блока  $G^1(x)$ .



**Таблица 1.** Результаты экспериментов с контролем групп выходов на основе 1/4-кода по «четверкам» выходов

№	Схема	$n_{in}/n_{out}$	$L_{F(x)}$	$q$	$L_{G(x)}$	$\varphi, \%$	$L_{CED}$	$\mu, \%$	$p(\eta), \%$
1	cmb	16/4	80	1	33	41,3	141	70,5	93,9
2	b1	3/4	15	1	9	60	52	74,3	72,9
3	rd84	8/4	139	1	132	95	299	94,9	85,9
4	cm138a	6/8	41	2	30	73,2	139	79,9	100
5	misex1	18/7	87	1	80	92	234	92,5	99,8
6	pclе	19/9	102	2	100	98	295	95,7	96,7
7	x2	10/7	69	1	66	95,7	198	90,3	99,5
8	sao2	10/4	172	1	157	91,3	357	93	94,3
9	z4ml	7/4	74	1	48	64,9	150	79,7	96,7
10	5xp1	7/10	169	2	156	92,3	419	90,1	98,3
11	cm42a	4/10	41	2	34	82,9	169	84,5	99,6
12	cu	14/11	90	2	76	84,4	273	87,6	98,7
13	decod	5/16	62	4	33	53,2	243	74,4	99,8
14	idd	9/19	114	4	127	111,4	464	96,3	97,3
15	sct	19/15	109	3	114	104,6	394	98,2	99,7
16	unreg	36/16	152	4	171	112,5	507	101,4	99,3
17	cht	47/36	262	9	463	176,7	1181	120,5	94,2
18	ttt2	24/21	300	5	304	101,3	853	99	95,4
19	tcon	17/16	49	4	69	140,8	302	102,7	98,7
20	term1	34/10	230	2	209	90,9	533	92,2	94,7
21	count	35/16	210	4	220	104,8	614	99,6	97,6
22	c8	28/18	214	4	231	107,9	655	100,8	98,3
23	lal	26/19	139	4	148	106,5	510	99,4	99,7
24	x1	51/35	456	8	548	120,2	1435	105,9	95,4
25	vda	17/39	810	9	926	114,3	2218	104,8	97,2
26	pm1	16/13	69	3	59	85,5	237	80,1	95,7
Среднее значение:					—	96,2	—	92,6	96,1

7. Проверяется условие  $L_{G^1(x)+G^2(x)} \leq L_{F(x)}$ ? Если «нет», то выбирается другая «четверка» выходов путем замены одного или нескольких выходов в выбранной «четверке». Если «да», то фиксируется структура полученного блока  $G^1(x) + G^2(x)$ .

8. Процедуры повторяются до тех пор, пока возможно выделение «четверок» выходов блока  $F(x)$ .

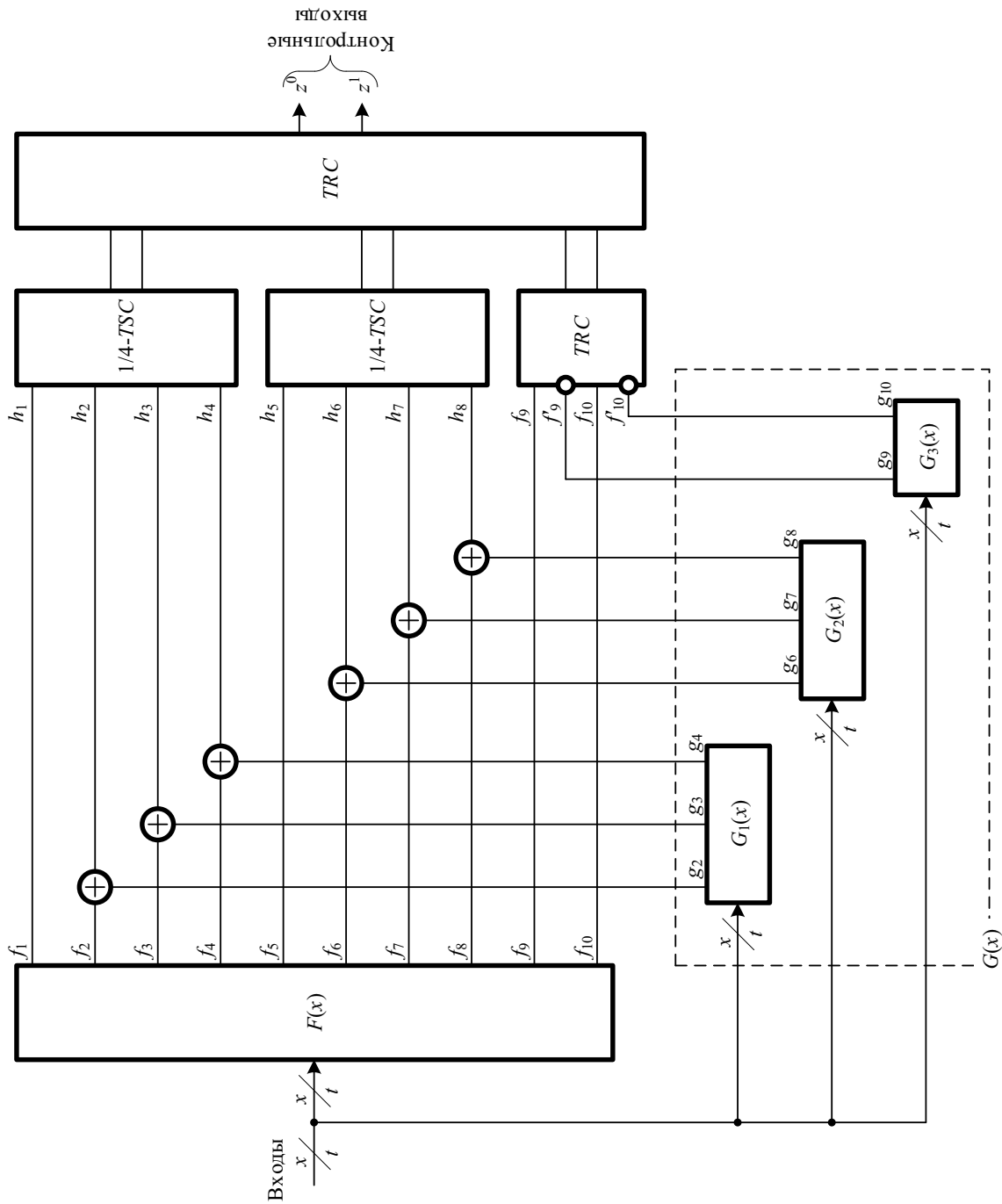


Рис. 4. Структура организации схемы встроенного контроля для многовыходного устройства до оптимизации блока контрольной логики

9. Выходы, которые не вошли в «четверки», контролируются по методу дублирования.

10. Полученный многовыходной блок контрольной логики  $G(x)$  оптимизируется.

Эффективность применения рассматриваемого подхода оценивалась по сравнению с использованием дублирования для этих целей. В столбцах  $L_{G(x)}$  и  $L_{CED}$  приведены показатели сложности технической реализации блока  $G(x)$  и устройства со схемой встроенного контроля. В столбцах  $\varphi$  и  $\mu$  приведены значения относительных показателей для оценки сложности технической реализации СВК:

$$\varphi = \frac{L_{G(x)}}{L_{F(x)}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

$$\mu = \frac{L_{CED}}{L_D} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где  $L_D$  – показатель сложности технической реализации системы дублирования для заданного устройства.

Среднее значение величины  $\mu=92,6\%$ . При этом для 8 комбинационных схем из 26 получено значение  $\mu < 90\%$  и для 14 комбинационных схем – значение  $\mu < 95\%$ . Устройства со схемами встроенного контроля, синтезированными по методу логического дополнения, в большинстве случаев оказываются более простыми, чем при использовании метода дублирования. Не такое значительное уменьшение сложности по сравнению с дублированием связано с высокими показателями сложности реализации блоков  $G(x)$ . Среднее значение показателя  $\varphi = 96,2\%$ . Для 15 комбинационных схем были получены более простые устройства  $G(x)$ , чем исходное устройство  $F(x)$ , но для остальных 11 схемы  $G(x)$  оказались более сложными, что и повлияло на общую оценку.

В ходе исследований была также определена вероятность обнаружения неисправности  $\eta$  на множестве из 1000 псевдослучайных входных наборов, подаваемых на блок  $F(x)$ . В схему вносились одиночные контактные неисправности и осуществлялось их тестирование по методу логического дополнения. Вероятность обнаружения ошибки на выходах устройств  $F(x)$  рассчитывалась по формуле:

$$p(\eta) = \frac{N(\eta) - N^0(\eta)}{N(\eta)} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где  $N(\eta)$  – число псевдослучайных входных наборов, на которых ошибка, вызванная неисправностью объекта диагностирования, транслируется хотя бы на один из его выходов;  $N^0(\eta)$  – число псевдослучайных входных наборов,

на которых ошибка, вызванная неисправностью объекта диагностирования, не обнаружилась при контроле на основе рассматриваемого метода.

Средние значения показателя  $p(\eta)$  составили 96,1 %, что является неплохим показателем. Для 20 комбинационных схем из 26 был получен показатель вероятности обнаружения ошибок более 95 % – это свидетельство высокой эффективности описываемого подхода.

### 3. Синтез схем встроенного контроля при использовании 1/4-кода с уменьшенным числом элементов преобразования

Еще одним способом организации СВК по методу логического дополнения до 1/4-кода является использование базовой структуры, приведенной на рисунке 5 [44]. Ее особенность в том, что осуществляется контроль трехвыходного устройства по 1/4-коду, две рабочие функции преобразуются, а четвертая функция в контролируемой «четверке» получается прямым подключением одного из выходов блока  $G(x)$  к входу 1/4-TSC. Такой подход позволяет упростить процедуру построения самопроверяемого устройства. При этом сложность тестера 1/4-кода для базовой структуры оказывается меньшей, чем для 1/3-кода, и соизмеримой с ней при реализации тестера 1/3-кода для нескольких групп «троек» [20].

Функции, формируемые блоком  $G(x)$ , вычисляются по формулам:

$$\begin{cases} g_2 = f_1 f_2; \\ g_3 = (f_1 \vee f_2) f_3; \\ g_4 = f_1 \vee f_2 \vee f_3. \end{cases} \quad (6)$$

Схема определения четвертой функции  $h_4$  на входе тестера получается путем оптимизации структуры, приведенной на рисунке 6.

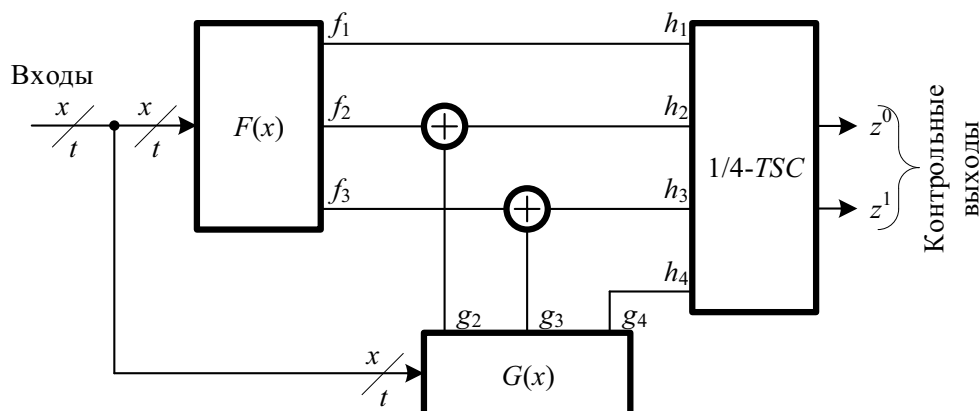


Рис. 5. Базовая структура организации схемы встроенного контроля трехвыходного устройства по 1/4-коду

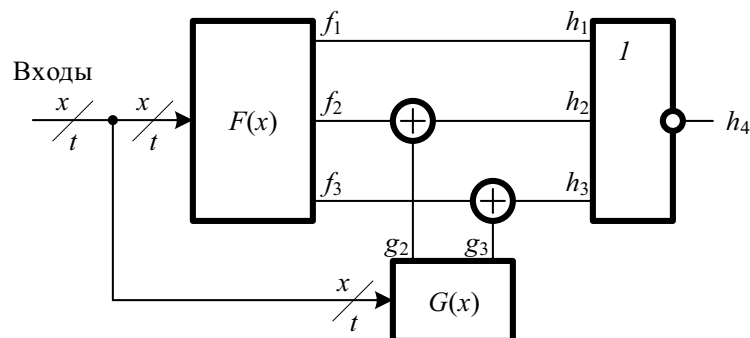


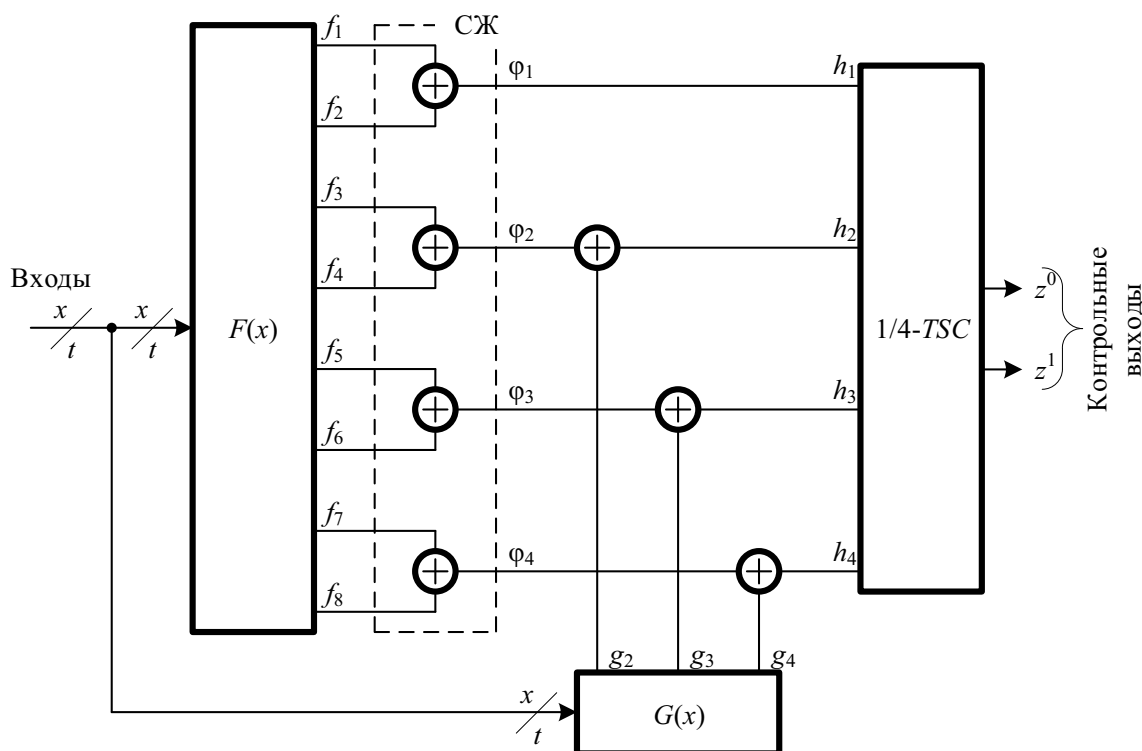
Рис. 6. Структура для определения значения функции  $h_4$  до оптимизации

Процесс синтеза СВК по представленной на рисунке 7 структуре производился по сформированному выше алгоритму – за тем лишь исключением, что выбирались не «четверки» выходов, а «тройки». Если оставались один или два выхода, не включенные в «тройки», они контролировались по методу дублирования. В таблицу 2 сведены полученные данные для 12 многовыходных комбинационных устройств. Среднее значение величины  $\mu=88,5\%$  при средней вероятности обнаружения ошибки  $p(\eta)=97,2\%$ .

Таблица 2. Результаты экспериментов с контролем групп выходов на основе 1/4-кода по «тройкам»

№	Схема	$n_{in}/n_{out}$	$L_{F(x)}$	$q$	$L_{CED}$	$L_D$	$\mu, \%$	$p(\eta), \%$
1	cm138a	6/8	41	2	141	174	81,1	99,1
2	misex	18/7	87	2	224	255	88	94,3
3	pclе	19/9	102	3	292	307	95,2	95,8
4	x2	10/7	69	2	188	221	85,1	96,7
5	5xp1	7/10	169	3	381	460	82,8	97,1
6	cm42a	4/10	41	3	165	202	81,7	97,5
7	cu	14/11	90	3	255	311	82	97,3
8	decod	5/16	62	5	278	321	86,6	99,2
9	tтt2	24/21	300	7	831	855	97,1	98,4
10	term1	34/10	230	3	553	581	95,1	95,2
11	vda	17/39	810	13	2043	2150	95	98,4
12	pm1	16/13	69	4	281	303	92,6	97,8
Среднее значение							88,5	97,2





**Рис. 7.** Базовая структура организации схемы встроенного контроля по 1/4-коду с предварительным сжатием сигналов

#### 4. Синтез схем встроенного контроля при использовании 1/4-кода с предварительным сжатием сигналов

Еще одним подходом к синтезу СВК по методу логического дополнения является использование предварительного сжатия сигналов от выходов блока  $F(x)$  с целью сокращения числа подсхем контроля [45]. Базовая структура со схемой предварительного сжатия сигналов представлена на рисунке 7. В ней подразумевается для восьмивыходного устройства  $F(x)$  выделение пар выходов и сжатие сигналов от них в схеме сжатия (СЖ) с целью формирования четырехразрядного кодового вектора  $\langle \varphi_4 \varphi_3 \varphi_2 \varphi_1 \rangle$ . Далее осуществляется контроль этого вектора по методу логического дополнения. Подобная структура фактически является развитием структуры метода самодвойственного паритета [23].

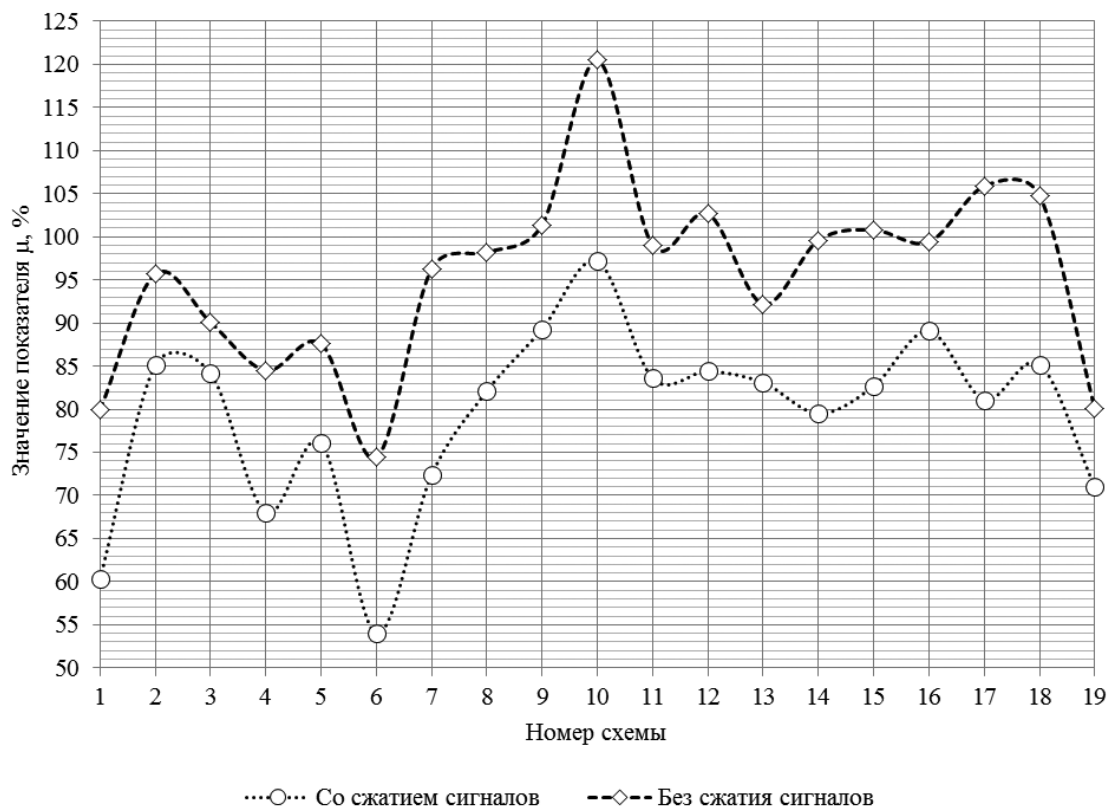
В таблице 3 представлены результаты экспериментов с контрольными комбинационными схемами с числом выходов  $m \geq 8$ . Для них получено среднее значение  $\mu = 79,4\%$  (рис. 8) – значительно меньше, чем по представленному выше способу. Однако при этом  $p(\eta) = 96,6\%$ , что, наоборот, несколько хуже (рис. 9).

**Таблица 3.** Результаты экспериментов с контролем групп выходов на основе 1/4-кода с предварительным сжатием сигналов

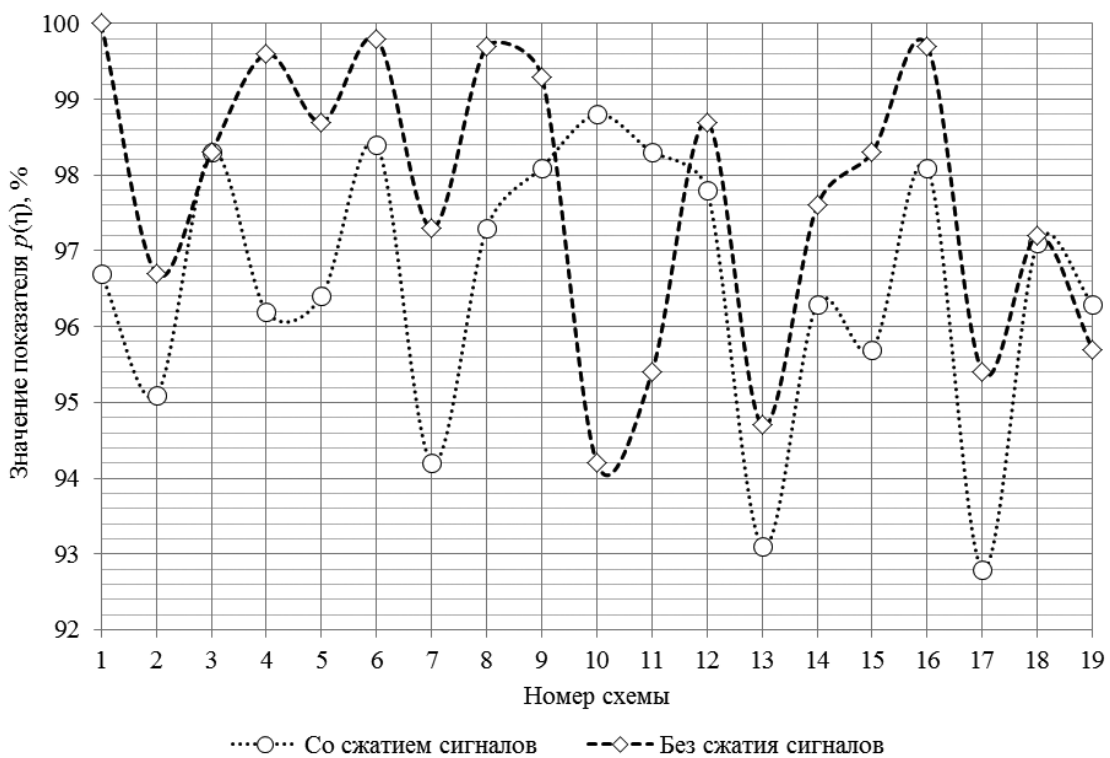
№	Схема	$n_{in}/n_{out}$	$L_{F(x)}$	$q$	$L_{G(x)}$	$\varphi, \%$	$L_{CED}$	$\mu, \%$	$p(\eta), \%$
1	cm138a	6/8	41	1	27,9	68	105	60,3	96,7
2	pclе	19/9	102	1	111,9	109,7	262	85,1	95,1
3	5xp1	7/10	169	1	154,5	91,4	384	84,2	98,3
4	cm42a	4/10	41	1	35,1	85,6	136	68	96,2
5	cu	14/11	90	1	74,3	82,6	236	76,1	96,4
6	decod	5/16	62	2	28,5	46	175	54	98,4
7	ldd	9/19	114	2	90,6	79,5	327	72,4	94,2
8	sct	19/15	109	1	96,2	88,3	332	82,1	97,3
9	unreg	36/16	152	2	154	101,3	446	89,3	98,1
10	cht	47/36	262	4	290	110,7	952	97,2	98,8
11	ttt2	24/21	300	2	265	88,3	714	83,6	98,3
12	tcon	17/16	49	2	60,3	123,1	249	84,4	97,8
13	term1	34/10	230	1	188	81,7	480	83,1	93,1
14	count	35/16	210	2	197	93,8	491	79,5	96,3
15	c8	28/18	214	2	199	93	536	82,7	95,7
16	lal	26/19	139	2	140	100,7	457	89,1	98,1
17	x1	51/35	456	4	434,5	95,3	1109	81,1	92,8
18	vda	17/39	810	4	783,3	96,7	1812	85,2	97,1
19	pm1	16/13	69	1	42	60,9	212	71	96,3
Среднее значение:					—	89,3	—	79,4	96,6

## Заключение

Использование метода логического дополнения до равновесного 1/4-кода позволяет на практике синтезировать самопроверяемые устройства автоматики и вычислительной техники с уменьшенной по сравнению с дублированием сложностью технической реализации. При этом существует возможность оптимизации показателей сложности технической реализации за счет гибкого выбора функций логического дополнения, реализуемых блоком контрольной логики. В процессе синтеза может учитываться статистическая информация об исходном устройстве, включающая в себя распределение нулевых и единичных значений реализуемых им функций на множестве входных наборов. Кроме того, может быть проведено изначальное моделирование неисправностей из заданного класса и зафиксировано распределение ошибок на выхо-



**Рис. 8.** Сравнение показателей  $\mu$  для СВК, синтезированных без сжатия и со сжатием сигналов



**Рис. 9.** Сравнение показателей  $p(\eta)$  для СВК, синтезированных без сжатия и со сжатием сигналов

дах объекта диагностирования. Наилучшие результаты с позиции сложности технической реализации дает применение при синтезе СВК первоначального сжатия сигналов, однако это приводит к небольшому снижению вероятности обнаружения ошибок на выходах объекта диагностирования. Лучшие результаты по обнаружению ошибок дает подход с выделением «троек» выходов с контролем по 1/4-коду.

В настоящей статье все эксперименты проводились без изменения структуры исходного устройства. Тем не менее, в процессе синтеза можно учитывать возможность и такой модификации [1, 14, 29]. Это позволяет не только повышать показатели обнаруживающей способности СВК, но и реализовывать полностью самопроверяемые системы. Также в работе не рассматривались особенности обеспечения полной тестируемости компонентов СВК – элементов сложения по модулю два и тестера. Указанные вопросы затронуты в ряде работ соавторов, например, в [46].

Способы синтеза СВК, представленные в статье, универсальны и могут применяться при синтезе самопроверяемых цифровых систем, реализованных на различной элементной базе, включая современные устройства с программируемой логикой.

### Благодарности

Авторы выражают признательность своим учителям, докторам технических наук, профессорам, заслуженным деятелям науки РФ Валерию Владимировичу и Владимиру Владимировичу Сапожниковым за помощь в работе, постановку задачи и всестороннее обсуждение результатов.

### Библиографический список

1. *Согомонян Е. С.* Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян, Е. В. Слабаков. – М.: Радио и связь, 1989. – 208 с.
2. *Микони С. В.* Общие диагностические базы знаний вычислительных систем / С. В. Микони. – СПб.: СПИИРАН, 1992. – 234 с.
3. *Ubar R.* Design and Test Technology for Dependable Systems-On-Chip (Premier Reference Source) / R. Ubar, J. Raik, H.-T. Vierhaus. – Information Science Reference, Hershey – New York, IGI Global, 2011. – 578 p.
4. *Дрозд А. В.* Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем / А. В. Дрозд, В. С. Харченко, С. Г. Антощук, Ю. В. Дрозд, М. А. Дрозд, Ю. Ю. Сулима. – Под ред. А. В. Дрозда и В. С. Харченко. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2012. – 614 с.
5. *Kharchenko V.* Green IT Engineering: Concepts, Models, Complex Systems Architectures / V. Kharchenko, Y. Kondratenko, J. Kacprzyk. – Springer Book series “Studies in Systems, Decision and Control”. – Vol. 74. – 2017. – 305 p. DOI 10.1007/978-3-319-44162-7.

6. *Гаврилов С. В.* Применение теории кодирования для повышения помехозащищенности комбинационных схем / С. В. Гаврилов, С. И. Гуров, Т. Д. Жукова, Д. И. Рыжова // Информационные технологии. – 2016. – Т. 22, № 12. – С. 931–937.
7. *Tshagharyan G.* Experimental Study on Hamming and Hsiao Codes in the Context of Embedded Applications / G. Tshagharyan, G. Harutyunyan, S. Shoukourian, Y. Zorian // Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. – Pp. 25–28. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110065.
8. *Стемповский А. Л.* Методы синтеза сбоеустойчивых комбинационных КМОП схем, обеспечивающих автоматическое исправление ошибок / А. Л. Стемповский, Д. В. Тельпухов, Т. Д. Жукова, С. И. Гуров, Р. А. Соловьев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 7 (192). – С. 197–210. DOI 10.23683/2311-3103-2017-7-197-210.
9. *Тельпухов Д. В.* Схема функционального контроля для комбинационных схем на основе R-кода / Д. В. Тельпухов, А. И. Деменева, Т. Д. Жукова, С. И. Гуров // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). – 2018. – № 4. – С. 98–104.
10. *Đug M.* Full Error Detection and Correction Method Applied on Pipelined Structure Using Two Approaches / M. Đug, S. Weidling, E. S. Sogomonyan, D. Jokic, M. Krstic // Journal of Circuits, Systems and Computers, 17 January 2020. – Pp. 1–16. DOI: 10.1142/S0218126620502187.
11. *Efanov D.* Generalized Algorithm of Building Summation Codes for the Tasks of Technical Diagnostics of Discrete Systems / D. Efanov, V. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov // Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017. – Pp. 365–371. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110126.
12. *Reynolds D. A.* Fault Detection Capabilities of Alternating Logic / D. A. Reynolds, G. Meize // IEEE Transactions on Computers. – 1978. – Vol. C-27. – Issue 12. – Pp. 1093–1098.
13. *Березюк Н. Т.* Кодирование информации (двоичные коды) / Н. Т. Березюк, А. Г. Андрущенко, С. С. Мощицкий, В. И. Глушков, М. М. Бенеша, В. А. Гаврилов; под ред. Н. Т. Березюка. – Харьков: Издательское объединение «Вища школа», 1978. – 252 с.
14. *Сапожников В. В.* Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Том 1: Классические коды Бергера и их модификации / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. – М.: Наука, 2020. – 383 с.
15. *Piestrak S. J.* Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes / S. J. Piestrak. – Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. – 111 p.
16. *Nicolaidis M.* On-Line Testing for VLSI – A Compendium of Approaches / M. Nicolaidis, Y. Zorian // Journal of Electronic Testing: Theory and Application. – 1998. – Vol. 12. – Issue 1–2. – Pp. 7–20. DOI: 10.1023/A:1008244815697.
17. *Das D.* Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multi-level Circuits / D. Das, N. A. Touba // Proceedings of the 17th IEEE VLSI Test Symposium, USA, CA, Dana Point, April 25–29, 1999. – Pp. 370–376.
18. *Mitra S.* Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? / S. Mitra, E. J. McCluskey // Proceedings of International Test Conference, 2000, USA, Atlantic City, NJ, 03–05 October 2000. – Pp. 985–994. DOI: 10.1109/TEST.2000.894311.
19. *Stempkovskiy A.* R-code for concurrent error detection and correction in the logic circuits / A. Stempkovskiy, D. Telpukhov, S. Gurov, T. Zhukova, A. Demeneva // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 29 January – 1 February 2018, Moscow, Russia. – Pp. 1430–1433. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317365.
20. *Гессель М.* Логическое дополнение – новый метод контроля комбинационных схем / М. Гессель, А. В. Морозов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 1. – С. 167–176.



21. Гессель М. Само тестируемая структура для функционального обнаружения отказов в комбинационных схемах // М. Гессель, А. В. Дмитриев, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 11. – С. 162–174.
22. Efanov D. Self-Dual Complement Method up to Constant-Weight Codes for Arrangement of Combinational Logical Circuits Concurrent Error-Detection Systems / D. Efanov, V. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov, G. Osadchy, D. Pivovarov // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, Georgia, September 13–16, 2019. – Pp. 136–143. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884398.
23. Saposhnikov Vl. V. Self-Dual Parity Checking – a New Method for on Line Testing / Vl. V. Saposhnikov, A. Dmitriev, M. Goessel, V. V. Saposhnikov // Proceedings of 14<sup>th</sup> IEEE VLSI Test Symposium, USA, Princeton, 1996. – Pp. 162–168.
24. Morozov A. New Self-Checking Circuits by Use of Berger-codes / A. Morozov, V. V. Saposhnikov, Vl. V. Saposhnikov, M. Goessel // Proceedings of 6th IEEE International On-Line Testing Workshop, Palma de Mallorca, Spain, 3–5 July 2000. – Pp. 171–176. DOI: 10.1109/OLT.2000.856626.
25. Сапожников В. В. Самопроверяемые дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
26. Das D. Synthesis of Circuits with Low-Cost Concurrent Error Detection Based on Bose-Lin Codes / D. Das, N. A. Touba // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. – 1999. – Vol. 15. – Issue 1–2. – Pp. 145–155. DOI: 10.1023/A:1008344603814.
27. Saposhnikov V. V. Design of totally self-checking combinational circuits by use of complementary circuits / V. V. Saposhnikov, Vl. V. Saposhnikov, A. Morozov, M. Goessel, G. Osadchy // Proceedings of 2th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2004), Crimea, Ukraine, September 15–17, 2004, pp. 83–87.
28. Гессель М. Контроль комбинационных схем методом логического дополнения / М. Гессель, А. В. Морозов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 8. – С. 161–172.
29. Göessel M. New Methods of Concurrent Checking: Edition 1 / M. Göessel, V. Ocheretny, E. Sogomonyan, D. Marienfeld. – Dordrecht: Springer Science+Business Media B. V., 2008. – 184 p.
30. Sen S. K. A Self-Checking Circuit for Concurrent Checking by 1-out-of-4 code with Design Optimization using Constraint Don't Cares / S. K. Sen // National Conference on Emerging trends and advances in Electrical Engineering and Renewable Energy (NCEEERE 2010), Sikkim Manipal Institute of Technology, Sikkim, held during 22–24 December, 2010.
31. Das D. K. Constraint Don't Cares for Optimizing Designs for Concurrent Checking by 1-out-of-3 Codes / D. K. Das, S. S. Roy, A. Dmitriev, A. Morozov, M. Gössel // Proceedings of the 10th International Workshops on Boolean Problems, Freiberg, Germany, September, 2012. – Pp. 33–40.
32. Сапожников В. В. Построение полностью самопроверяемых структур систем функционального контроля с использованием равновесного кода «1 из 3» / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Электронное моделирование. – 2016. – Т. 38, № 6. – С. 25–43.
33. Сапожников В. В. Построение самопроверяемых структур систем функционального контроля на основе равновесного кода «2 из 4» / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Проблемы управления. – 2017. – № 1. – С. 57–64.
34. Сапожников В. В. Метод логического дополнения на основе равновесного кода «1 из 4» для построения полностью самопроверяемых структур систем функционального контроля / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, Д. В. Пивоваров // Электронное моделирование. – 2017. – Т. 39, № 2. – С. 15–34.

35. Пивоваров Д. В. Организация систем функционального контроля комбинационных логических схем на основе метода логического дополнения по равновесному коду «1 из 5» / Д. В. Пивоваров // Автоматика на транспорте. – 2017. – Т. 3, № 4. – С. 605–624.
36. Пивоваров Д. В. Построение систем функционального контроля многовыходных комбинационных схем методом логического дополнения по равновесным кодам / Д. В. Пивоваров // Автоматика на транспорте. – 2018. – Т. 4, № 1. – С. 131–149.
37. Nikolos D. Self-Testing Embedded Two-Rail Checkers // Chapter 7 in On-Line Testing for VLSI. – 1998. – Pp. 69–79. – DOI 10.1007/978-1-4757-60-69-9-7.
38. Аксёнова Г. П. Необходимые и достаточные условия построения полностью проверяемых схем свертки по модулю 2 / Г. П. Аксёнова // Автоматика и телемеханика. – 1979. – № 9. – С. 126–135.
39. Sentovich E. M. Sequential Circuit Design Using Synthesis and Optimization / E. M. Sentovich, K. J. Singh, C. Moon, H. Savoj, R. K. Brayton, A. Sangiovanni-Vincentelli // Proceedings IEEE International Conference on Computer Design: VLSI in Computers & Processors, 11–14 October 1992, Cambridge, MA, USA, USA. – Pp. 328–333. DOI: 10.1109/ICCD.1992.276282.
40. Kunz W. Multi-Level Logic Optimization by Implication Analysis / W. Kunz, P. R. Menon // Proceedings of IEEE/ACM International Conference on Computer Aided Design (ICCAD'94), San Jose, CA, November, 1994. – Pp. 6–13.
41. Collection of Digital Design Benchmarks [<http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks/>].
42. Sentovich E. M. SIS: A System for Sequential Circuit Synthesis / E. M. Sentovich, K. J. Singh, L. Lavagno, C. Moon, R. Murgai, A. Saldanha, H. Savoj, P. R. Stephan, R. K. Brayton, A. Sangiovanni-Vincentelli // Electronics Research Laboratory, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Berkeley, 4 May 1992. – 45 p.
43. Carter W. C. Self-Checking Error Checker for Two-Rail Coded Data / W. C. Carter, K. A. Duke, P. R. Schneider // United States Patent Office, filed July 25, 1968, ser. No. 747533, patented Jan. 26, 1971, N. Y. – 10 p.
44. Сапожников В. В. Метод синтеза систем диагностирования на основе логического дополнения с уменьшенным числом элементов преобразования / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, Д. В. Пивоваров // Известия вузов. Приборостроение. – 2019. – Т. 62, № 12. – С. 1039–1052. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-12-1039-1052.
45. Сапожников В. В. Синтез схемы встроенного контроля для многовыходных комбинационных устройств на основе логического дополнения и сжатия сигналов / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Известия вузов. Приборостроение. – 2020. – Т. 63, № 7. – С. 581–597. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-7-581-597.
46. Efanov D. V. The Synthesis Conditions of Completely Self-Testing Embedded-Control Circuits Based on the Boolean Complement Method to the «1-out-of-m» Constant-Weight Code / D. V. Efanov, V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, D. V. Pivovarov // Automatic Control and Computer Sciences. – 2020. – Vol. 54. – Issue 2. – Pp. 8–99. DOI: 10.3103/S0146411620020042.

**Efanov D.V.**

Scientific and Technical Center «Integrated Monitoring Systems» LLC «Automation, Remote Control and Communication on Railway Transport» department, Russian University of Transport (MIIT)

**Osadchy G.V.**

Scientific and Technical Center «Integrated Monitoring Systems» LLC

**Leskovets I.V.**

Department «Transportation and technological machines»  
The Belarusian-Russian University, Mogilev

## **SYNTHESIS METHODS OF SELF-CHECKING COMBINATIONAL DEVICES OF AUTOMATIC CONTROLS BASED ON LOGICAL COMPLEMENT TO THE EQUILIBRIUM 1-OUT-OF 4 CODE**

The article is devoted to the development of the logical complement method for the synthesis of self-checking digital devices and systems. The article highlights the features of using the equilibrium 1-out-of 4 code for the synthesis of integrated control circuits of combinational logic devices by the method of logical complement. The basic structures of the organization of built-in control schemes by the method of logical complement to the equilibrium 1-out-of 4 code are described and several ways of organizing control schemes are considered. The first one implies the control of devices with the allocation of outputs fours and the use of conversion of three outputs out of four in the basic structure. There is another way of organizing the control circuit by the method of logical complement to the equilibrium code and it involves the search for outputs triplets and their addition to the four-digit code word of the 1-out-of 4 code by directly connecting the output of the supervisor logic block to the tester input without any signal conversion. The third method is associated with the use of a basic structure with the circuit for the preliminary signal compression from the unit under test and the reduced number of outputs control. The article presents the results of experimental studies for each of the methods of organizing the built-in control circuit and estimates the structures technical implementation complexity as well as the probability of detecting errors at the outputs of the unit under test when single-stuck faults are introduced. In many cases the logical complement method allows to synthesize simpler self-checking devices compared to the duplication method with high rates of error detection at the unit under test outputs.

Combinational logical device, control system, logical complement, equilibrium 1-out-of4 code, structural redundancy optimization, backing-up, checking circuit optimalization, signal compression circuits

DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-645-668

### **References**

1. *Sogomonyan E. S., Slabakov E. V.* (1989) Samoproveryayemyye ustroystva i otkazoustoychivyye sistemy [Self-checking devices and fault-tolerant systems]. Moscow, Radio i svyaz' [Radio and communication] Publ., 208 p. (In Russian)
2. *Mikoni S. V.* (1992) Obshchiye diagnosticheskiye bazy znaniy vychislitel'nykh sistem [General diagnostic knowledge base of computing systems]. Saint Petersburg, SPIIRAN Publ., 234 p. (In Russian)
3. *Ubar R., Raik J., Vierhaus H.-T.* (2011) Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source). Information Science Reference, Hershey – New York, IGI Global Publ., 578 p.

4. Drozd A. V., Harchenko V. S., Antoshchuk S. G., Drozd Yu. V., Drozd M. A., Sulima Yu. Yu. (2012) Rabochee diagnostirovanie bezopasnykh informatsionnoupravlyayushchih sistem [Objects and Methods of On-Line Testing for Safe Instrumentation and Control Systems]. Ed by A. V. Drozd, V. S. Harchenko. Khar'kov, Natsionalnyj aerokosmicheskij universitet im. N. E. Zhukovskogo (KhAI) Publ., 614 p. (In Russian)
5. Kharchenko V., Kondratenko Yu., Kacprzyk J. (2017) Green IT Engineering: Concepts, Models, Complex Systems Architectures. Springer Book series "Studies in Systems, Decision and Control", vol. 74, 305 p. DOI: 10.1007/978-3-319-44162-7.
6. Gavrilov S. V., Gurov S. I., Zhukova T. D., Ryzhova D. I. (2016) Primeneniye teorii kodirovaniya dlya povysheniya pomekhozashchishchennosti kombinatsionnykh skhem [Application of coding theory to improve noise immunity of combinational circuits]. *Informatsionnyye tekhnologii [Information technologies]*, vol. 22, no. 12, pp. 931–937. (In Russian)
7. Tshagharyan G., Harutyunyan G., Shoukourian S., Zorian Y. (2017) Experimental Study on Hamming and Hsiao Codes in the Context of Embedded Applications. Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017, pp. 25–28. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110065.
8. Stempkovskiy A. L., Tel'pukhov D. V., Zhukova T. D., Gurov S. I., Solov'yev R. A. (2017) Metody sinteza sboyeustoychivyykh kombinatsionnykh KMOP skhem, obespechivayushchikh avtomaticheskoye ispravleniye oshibok [Synthesis methods of fault-tolerant combination CMOS circuits, providing automatic correction of errors]. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, no. 7 (192), pp. 197–210. (In Russian) DOI: 10.23683/2311-3103-2017-7-197-210.
9. Telpukhov D. V., Demeneva A. I., Zhukova T. D., Gurov S. I. (2018) Skhema funktsional'nogo kontrolya dlya kombinatsionnykh skhem na osnove R-koda [Functional control scheme for combinational circuits based on the R-code]. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) [Problems of the development of promising micro- and nanoelectronic systems (MES)]*, no. 4, pp. 98–104. (In Russian)
10. Dug M., Weidling S., Sogomonyan E. S., Jokic D., Krstic M. (2020) Full Error Detection and Correction Method Applied on Pipelined Structure Using Two Approaches. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 17 January 2020, pp. 1–16. DOI: 10.1142/S0218126620502187.
11. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov V. I. (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 2, 2017, pp. 365–371. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110126.
12. Reynolds D. A., Meize G. (1978) Fault Detection Capabilities of Alternating Logic. *IEEE Transactions on Computers*, vol. C-27, iss. 12, pp. 1093–1098.
13. Berezyuk N. T., Andrushchenko A. G., Moshchitskiy S. S., Glushkov V. I., Benesha M. M., Gavrilov V. A. (1978) Kodirovaniye informatsii (dvoichnyye kody) [Information coding (binary codes)]. Kharkov, publishing association "Visha shkola" Publ., 252 p. (In Russian)
14. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V. (2020) Kody s summirovaniyem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. Tom 1: Klassicheskiye kody Bergera i ikh modi fikatsii. [Summed codes for technical diagnostic systems. Vol. 1: Classic Berger codes and their modifications]. Moscow, Nauka Publ., 383 p. (In Russian)
15. Piestak S. J. (1995) Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 111 p.
16. Nicolaidis M., Zorian Y. (1998) On-Line Testing for VLSI – A Compendium of Approaches. *Journal of Electronic Testing: Theory and Application*, vol. 12, iss. 1–2, pp. 7–20. DOI: 10.1023/A:1008244815697.



17. *Das D., Toubia N.A.* (1999) Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multilevel Circuits. Proceedings of the 17th IEEE VLSI Test Symposium, USA, CA, Dana Point, April 25–29, 1999, pp. 370–376.
18. *Mitra S., McCluskey E.J.* (2000) Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? Proceedings of International Test Conference, 2000, USA, Atlantic City, NJ, 3–5 October, 2000, pp. 985–994. DOI: 10.1109/TEST.2000.894311.
19. *Stempkovskiy A., Telpukhov D., Gurov S., Zhukova T., Demeneva A.* (2018) R-code for concurrent error detection and correction in the logic circuits. 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus), 29 January – 1 February, 2018, Moscow, Russia, pp. 1430–1433. DOI: 10.1109/EIconRus.2018.8317365.
20. *Gessel M., Morozov A. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V.* (2003) Logicheskoye dopolneniye – novyy metod kontrolya kombinatsionnykh skhem [Logic complement – a new method of control of combinational circuits]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], no. 1, pp. 167–176. (In Russian)
21. *Gessel M., Dmitriev A. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V.* (1999) Samotestiruyemaya struktura dlya funktsional'nogo obnaruzheniya otkazov v kombinatsionnykh skhemakh [A self-testable structure for functional fault detection in combination circuits]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], no. 11, pp. 162–174. (In Russian)
22. *Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov V. V., Osadchy G., Pivovarov D.* (2019) Self-Dual Complement Method up to Constant-Weight Codes for Arrangement of Combinational Logical Circuits Concurrent Error-Detection Systems. Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, Georgia, September 13–16, 2019, pp. 136–143. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884398.
23. *Sapozhnikov V. V., Dmitriev A., Goessel M., Sapozhnikov V. V.* (1996) Self-Dual Parity Checking – a New Method for on Line Testing. Proceedings of 14th IEEE VLSI Test Symposium, USA, Princeton, 1996, pp. 162–168.
24. *Morozov A., Saposhnikov V. V., Saposhnikov V. V., Goessel M.* (2000) New Self-Checking Circuits by Use of Berger-codes. Proceedings of 6th IEEE International On-Line Testing Workshop, Palma de Mallorca, Spain, 3–5 July, 2000, pp. 171–176. DOI: 10.1109/OLT.2000.856626.
25. *Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov V. V.* (1992). Self-checking discrete devices [Samoprovayemyye diskretnyye ustroystva]. St. Petersburg, Energoatomizdat Publ., 224 p.
26. *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*, vol. 15, iss. 1–2, pp. 145–155. DOI: 10.1023/A:1008344603814.
27. *Saposhnikov V. V., Saposhnikov V. V., Morozov A., Goessel M., Osadchy G.* (2004) Design of totally self-checking combinational circuits by use of complementary circuits. Proceedings of 2th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2004), Crimea, Ukraine, September 15–17, 2004, pp. 83–87.
28. *Goessel M., Morozov A. V., Sapozhnikov Val. V., Sapozhnikov V. V.* (2005) Kontrol' kombinatsionnykh skhem metodom logicheskogo dopolneniya [Test of combinational circuits by Boolean complement]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], iss. 8, pp. 161–172. (In Russian)
29. *Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D.* (2008) New Methods of Concurrent Checking. Ed. 1. Dordrecht, Springer Science+Business Media B. V., 184 p.
30. *Sen S. K.* (2010) A Self-Checking Circuit for Concurrent Checking by 1-out-of-4 code with Design Optimization using Constraint Don't Cares. *National Conference on Emerging trends and advances in Electrical Engineering and Renewable Energy (NCEEERE 2010)*, Sikkim Manipal Institute of Technology, Sikkim, held during 22–24 December, 2010.



31. Das D. K., Roy S. S., Dmitiriev A., Morozov A., Gössel M. (2012) Constraint Don't Cares for Optimizing Designs for Concurrent Checking by 1-out-of-3 Codes. Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Workshops on Boolean Problems, Freiberg, Germany, September, 2012, pp. 33–40.
32. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. & Efanov D. V. (2016) *Postroyeniye polnost'yu samoproveryayemykh struktur sistem funktsional'nogo kontrolya s ispol'zovaniyem ravnovesnogo koda "1 iz 3"* [Formation of totally self-checking structures of concurrent error detection systems with the use of 1-out-of-3 constant-weight code]. *Elektronnoye modelirovaniye* [Electronic Modeling], vol. 38, no. 6, pp. 25–43. (In Russian)
33. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. (2017). Postroenie samoproveryaemykh struktur sistem funktsional'nogo kontrolya na osnove ravnovesnogo koda «2 iz 4» [Design of Self-Checking Concurrent Error Detection Systems Based on 2-out-of-4 Constant-Weight Code]. *Problemy upravleniya* [Problems of Control], iss. 1, pp. 57–64. (In Russian)
34. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V., Pivovarov D. V. (2017). Metod logicheskogo dopolneniya na osnove ravnovesnogo koda «1 iz 4» dlya postroyeniya polnost'yu samoproveryaemykh struktur sistem funktsional'nogo kontrolya [Boolean complement method based on constant-weight code 1-out-of-4 for formation of totally self-checking concurrent error detection systems]. *Elektronnoye modelirovanie* [Electronic Modeling], vol. 39, iss. 2, pp. 15–34. (In Russian)
35. Pivovarov D. V. (2017) Organizatsiya sistem funktsional'nogo kontrolya kombinatsionnykh logicheskikh skhem na osnove metoda logicheskogo dopolneniya po ravnovesnomu kodu "1 iz 5" [Organization of systems of functional control of combinational logic circuits based on the method of logical complement according to the equilibrium code 1-out-of-5]. *Avtomatika na transporte* [Automation on Transport], vol. 3, no. 4, pp. 605–624. (In Russian)
36. Pivovarov D. V. (2018) Postroyeniye sistem funktsional'nogo kontrolya mnogovykhodnykh kombinatsionnykh skhem metodom logicheskogo dopolneniya po ravnovesnym kodam [Building of concurrent error detection systems of multi-output combinational circuits using the Boolean complement method by constant weight codes]. *Avtomatika na transporte* [Automatics on transport], vol. 4, no. 1, pp. 131–149. (In Russian)
37. Nikolos D. (1998) Self-Testing Embedded Two-Rail Checkers. On-Line Testing for VLSI. Chapter 7, pp. 69–79. DOI: 10.1007/978-1-4757-60-69-9-7.
38. Aksyonova G. P. (1979) *Neobkhodimyye i dostatochnyye usloviya postroyeniya polnost'yu proveryayemykh skhem svertki po modulyu 2* [Necessary and sufficient conditions for design of completely checkable modulo 2 convolution circuits]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], no. 9, pp. 126–135. (In Russian)
39. Sentovich E. M., Singh K. J., Moon C., Savoj H., Brayton R. K., Sangiovanni-Vincentelli A. (1992) Sequential Circuit Design Using Synthesis and Optimization. Proceedings IEEE International Conference on Computer Design: VLSI in Computers & Processors, 11–14 October 1992, Cambridge, MA, USA, USA, pp. 328–333. DOI: 10.1109/ICCD.1992.276282.
40. Kunz W., Menon P. R. (1994) Multi-Level Logic Optimization by Implication Analysis. Proceedings of IEEE/ACM International Conference on Computer Aided Design (ICCAD'94), San Jose, CA, November, 1994, pp. 6–13.
41. Collection of Digital Design Benchmarks. Available at: <http://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks/>.
42. Sentovich E. M., Singh K. J., Lavagno L., Moon C., Murgai R., Saldanha A., Savoj H., Stephan P. R., Brayton R. K., Sangiovanni-Vincentelli A. (1992) SIS: A System for Sequential Circuit Synthesis. Electronics Research Laboratory, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Berkeley, 4 May, 1992, 45 p.
43. Carter W. C., Duke K. A., Schneider P. R. Self-Checking Error Checker for Two-Rail Coded Data. United States Patent Office, filed July 25, 1968, ser. No. 747533, patented Jan. 26, 1971, New York, 10 p.

44. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V., Pivovarov D. V. (2019) Metod sinteza sistem diagnostirovaniya na osnove logicheskogo dopolneniya s umen'shennym chislom elementov preobrazovaniya [Method of diagnostic system synthesis based on Boolean complement with reduced number of correction elements]. Izvestiya vuzov. Priborostroyeniye [Proceedings of universities. Journal of Instrument Engineering], vol. 62, no. 12, pp. 1039–1052. (in Russian)
45. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. Sintez skhemy vstroynnogo kontrolya dlya mnogovykhodnykh kombinatsionnykh ustroystv na osnove logicheskogo dopolneniya i szhatiya signalov Synthesis of a built-in control circuit for multi-output combinational devices based on logical complement and signal compression. Izvestiya vuzov. Priborostroyeniye [Proceedings of universities. Journal of Instrument Engineering], vol. 63, no. 7, pp. 583–599. (in Russian)
46. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Pivovarov D. V. (2020) The Synthesis Conditions of Completely Self-Testing Embedded-Control Circuits Based on the Boolean Complement Method to the 1-out-of-m Constant-Weight Code. Automatic Control and Computer Sciences, vol. 54, iss. 2, pp. 8–99. DOI: 10.3103/S0146411620020042.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии  
профессором В. И. Хахановым*

*Поступила в редакцию 23.11.2020, принята к публикации 06.04.2021*

**ЕФАНОВ Дмитрий Викторович** — доктор технических наук, доцент, член Института инженеров электротехники и электроники (IEEE member), заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга», 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 (МИИТ)  
TrES-4b@yandex.ru

**ОСАДЧИЙ Герман Владимирович** — кандидат технических наук, заместитель генерального директора, главный инженер ООО НТЦ «Комплексные системы мониторинга», старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I  
osgerman@mail.ru

**ЛЕСКОВЕЦ Игорь Вадимович** — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Транспортные и технологические машины» Межгосударственного образовательного учреждения высшего образования «Белорусско-Российский университет»  
le@br.u.by

© Ефанов Д. В., Осадчий Г. В., Лесковец И. В., 2021

## СПИСОК СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В 2021 ГОДУ

### В ПОРЯДКЕ ДИСКУССИИ

*В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов* № 1 137–167  
Итерационные методы формирования наукометрических показателей с учетом полного множества цитируемых работ

### ИЗ ИСТОРИИ АВТОМАТИКИ

*С. В. Власенко, С. А. Сушков, С. В. Гришечко* № 4 631–644  
Августин Бетанкур как создатель устройств сигнализации для первых железных дорог Европы и предвестник систем железнодорожной автоматики

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

*Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, Л. Н. Логинова* № 4 539–564  
Подходы к моделированию пассажиропотоков в рамках функционирования интеллектуальной системы управления городскими рельсовыми транспортными системами

### ЖИВУЧЕСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ

*Д. В. Комнатный* № 3 379–394  
Комплексный анализ устойчивости систем управления движением поездов к сверхширокополосным электромагнитным импульсам преднамеренного воздействия

*В. И. Шаманов* № 3 395–413  
Влияние отказов в системах интервального регулирования на движение поездов по двухпутным участкам

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

*А. Е. Водясов, Д. М. Кирюхин, В. Г. Сидоренко* № 2 315–335  
Опыт подготовки кадров для обеспечения компьютерной безопасности транспортной отрасли

### МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА В ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

*А. А. Грачев, Г. И. Никитин, Д. Г. Плотников, А. В. Баните, Д. Е. Бортяков, А. С. Габриель* № 2 216–230  
Автоматизация расчета локальных напряжений в элементах коробчатого сечения пролетных строений с ездовыми балками по данным непрерывного мониторинга

**СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ**

- Е. О. Аверченков, Л. А. Баранов, М. А. Шевченко* № 3 343–361  
Функциональная структура комплекса систем управления движением поездов метрополитена
- А. В. Баните, Д. С. Деряга, О. В. Леоненко* № 4 565–583  
Совершенствование городской транспортной системы путем внедрения адаптивных систем управления дорожным движением
- В. В. Батраев* № 2 175–188  
Методы приема и синхронизации сигналов автоматической локомотивной сигнализации
- С. В. Бушуев, К. В. Гундырев, Н. С. Голочалов* № 1 7–20  
Повышение пропускной способности участка железной дороги с применением технологии виртуальной сцепки
- А. Б. Никитин, А. Н. Ковкин* № 3 362–378  
Управление электроприводами в системе микропроцессорной централизации МПЦ-МПК
- А. Н. Попов, С. Ю. Гришаев* № 1 21–38  
Оценка вероятности аварийной ситуации при вынужденной остановке автомобиля на переезде
- К. Н. Савинов, М. Г. Яшин, В. В. Трубицин* № 2 189–201  
Базовые принципы восстановления интервального регулирования движения поездов с применением технологии радиочастотной идентификации

**СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ**

- В. И. Грек, В. И. Сафонов* № 2 202–215  
Одно критическое замечание к испытаниям подшипниковых узлов скоростного подвижного железнодорожного состава

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ СИСТЕМЫ**

- Р. Б. Абдуллаев* № 3 452–476  
Синтез полностью самопроверяемых схем встроенного контроля на основе полиномиальных кодов для комбинационных логических устройств
- А. В. Горелик, И. А. Журавлев, А. В. Орлов, Д. В. Сперанский* № 1 85–100  
Синтез цифровых схем для генерации заданных выходных последовательностей

- Д. В. Ефанов, Г. В. Осадчий, М. В. Зуева* № 2 284–314  
Особенности обнаружения ошибок кодами с суммированием  
единичных информационных разрядов в кольце вычетов  
по заданному модулю в схемах встроенного контроля,  
синтезированных на основе метода логического дополнения
- Д. В. Ефанов, Г. В. Осадчий, И. В. Лесковец* № 4 645–668  
Методы синтеза самопроверяемых комбинационных  
устройств автоматики на основе логического дополнения  
до равновесного кода «1 из 4»
- Д. В. Ефанов, В. В. Хорошев* № 1 101–136  
Динамические вопросники для организации систем  
поддержки принятия решений, интегрированных  
в программные средства диагностирования и мониторинга  
устройств железнодорожной автоматики
- А. В. Пашуков* № 3 477–495  
Исследование особенностей обнаружения ошибок на выходах  
программируемых логических интегральных схем при  
функциональном контроле на основе модульных кодов  
суммированием

## **ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ**

- В. А. Бараусов, Вл. П. Бубнов, Ш. Х. Султонов, Д. В. Бараусов* № 2 231–251  
Алгоритмы управляющей программы системы автоматической  
очистки стрелочных переводов на базе датчика  
определения льда или снега на контролируемой поверхности
- А. Г. Кабецкий, А. Д. Манаков* № 4 503–521  
Нормы и методы определения электромагнитной  
совместимости современных систем автоматической  
локомотивной сигнализации и электроподвижного состава  
с асинхронным тяговым приводом на метрополитене
- К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин* № 2 252–267  
Комплексный синергетико-индикаторный подход  
к управлению процессами перевозок на интенсивных  
и малодеятельных линиях
- А. Д. Манаков, А. А. Порошин, В. А. Шатохин* № 4 522–538  
Активный метод защиты устройств электропитания  
микропроцессорных комплексов железнодорожной  
автоматики и телемеханики
- В. Н. Мячин, К. С. Боровикова, Д. П. Кривцов* № 2 268–283  
Особенности классификации улично-дорожной сети  
при построении графа дорог в транспортной модели



---

<i>О. Н. Покусаев, А. Е. Чекмарев, В. С. Евсеев, М. Л. Овсянников, К. А. Кожемякина</i> Эксплуатация существующих железнодорожных путей необщего пользования для организации пассажирского городского сообщения в районе Бирюлево Восточное в Москве	№ 1	9–56
<b>ЭЛЕКТРОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ</b>		
<i>В. П. Бубнов, В. А. Смагин</i> Несколько замечаний о самом важном элементе метрологии – человеке	№ 4	617–630
<i>К. А. Иванова, Д. Н. Левин, М. В. Шкурин</i> Матрица базы данных для прогнозирования нерегламентированных действий пилотов гражданской авиации в особой ситуации при выполнении полетного задания	№ 1	57–74
<i>Д. С. Кокорев, В. Г. Сидоренко, С. К. Хромов</i> Автоматизация организации работы службы поддержки пользователей автоматизированных систем управления транспортных предприятий	№ 3	414–437
<i>И. М. Кокурин</i> Решения задач интервального разграничения поездов	№ 3	438–451
<i>А. И. Сафронов, Е. В. Лысенко</i> Моделирование плана перевозочного процесса в утренний час «пик» на замкнутой большой кольцевой линии московского метрополитена	№ 4	584–616
<i>В. А. Смагин</i> Понятие обратного оптимального в смысле заполнения квантования информации	№ 1	75–84

## LIST OF ARTICLES PUBLISHED IN 2021

### DISCUSSION

- V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, D. V. Efanov* No. 1 137–167  
Iterative methods of scientific indicators formation  
with consideration to the full set of cited works

### HISTORY OF AUTOMATION

- S. V. Vlasenko, S. A. Sushkov, S. V. Grishechko* No. 4 631–644  
Agustin de Betancourt as creator of optical telegraph machine  
used on the first european railway lines and precursor of railway  
signalling systems

### INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS

- L. F. Baranov, V. G. Sidorenko, L. N. Loginova* No. 4 539–564  
Passenger flows modeling approaches within the framework  
of the functioning of the Intelli-gent control system of urban  
rail transportation systems

### VIABILITY, RELIABILITY, SAFETY

- D. V. Komnatny* No. 3 379–394  
Comprehensive stability analysis of train control systems  
to ultra-wideband electromagnetic pulses of intentional impact
- V. I. Shamanov* No. 3 395–413  
The effect of failures in interval control systems  
on the movement of trains on double-track sections

### BRIEF REPORTS

- A. E. Vodyasov, D. M. Kiryukhin, G. V. Sidorenko* No. 2 315–335  
Experience in training personnel to ensure the computer  
security of the transport industry

### MONITORING METHODS IN TRANSPORT

- A. A. Grachev, G. I. Nikitin, D. G. Plotnikov, A. V. Banite,  
D. E. Bortiakov, A. S. Gabriel* No. 2 216–230  
Automation of local voltage calculation in box-sectional  
elements of span structures with running beams according  
to continuous monitoring data

## TRANSPORT CONTROL SYSTEMS

- |   |       |         |
|---|-------|---------|
| <i>E. O. Averchenkov, L. A. Baranov, M. A. Shevchenko</i><br>Functional structure of the subway train traffic control system complex  | No. 3 | 343–361 |
| <i>A. V. Banite, D. S. Deryaga, O. V. Leonenko</i><br>Improvement of the urban transportation system by the introduction of adaptive traffic control systems polynomial codes for combination logic devices | No. 4 | 565–583 |
| <i>V. V. Batraev</i><br>Methods of reception and synchronization of signals of automatic cab signalling   | No. 2 | 175–188 |
| <i>S. V. Bushuev, K. V. Gundyrev, N. S. Golochalov</i><br>Increasing the capacity of the railway section with the use of virtual coupling technology  | No. 1 | 7–20    |
| <i>A. B. Nikitin, A. N. Kovkin</i><br>Electric point machines in the microprocessor controller and microprocessor interlocking system   | No. 3 | 362–378 |
| <i>A. N. Popov, S. Yu. Grishaev</i><br>Assessment of emergency probability at the time of vehicle involuntary stop on the railway crossing  | No. 1 | 21–38   |
| <i>K. N. Savinov, M. G. Yashin, V. V. Trubitsin</i><br>Basic principles of recovery of interval regulation of train traffic using radio frequency identification technology                                 | No. 2 | 189–201 |

## STANDARDIZATION AND CERTIFICATION

- |   |       |         |
|---|-------|---------|
| <i>V. I. Grek, V. I. Safonov</i><br>One issue in reference to the tests of axle-box bearings for high-speed rolling stock | No. 2 | 202–215 |
|---|-------|---------|

## TECHNICAL DIAGNOSTICS AND CONTROLLABLE SYSTEMS

- |   |       |         |
|---|-------|---------|
| <i>R. B. Abdullaev</i><br>Synthesis of fully self-checked schemes built-in control based on polynomial codes for combination logic devices      | No. 3 | 452–476 |
| <i>A. V. Gorelik, I. A. Zhuravlev, A. V. Orlov, D. V. Speranskiy</i><br>Synthesis of digital circuits for generating generated output sequences | No. 1 | 85–100  |

- |  |       |         |
|--|-------|---------|
| <i>D. V. Efanov, G. V. Osadchiy, M. V. Zueva</i><br>The characteristics of error detection by codes with the summation of single information bits in the ring of residues, according to a given modulus are analyzed, which are manifested in the synthesis of built-in control circuits using the Boolean complement method | No. 2 | 284–314 |
| <i>D. V. Efanov, G. V. Osadchy, I. V. Leskovets</i><br>Synthesis methods of self-checking combinational devices of automatic controls based on logical complement to the equilibrium 1-out-of-4 code   | No. 4 | 645–668 |
| <i>D. V. Efanov, V. V. Khoroshev</i><br>Dynamic questionnaires for organization of decision support systems integrated into software diagnosis and monitoring railway automation devices   | No. 1 | 101–136 |
| <i>A. V. Pashukov</i><br>Research of peculiarities of error detection on the outputs of programmable logic integrated circuits with functional control based on modular codes with summation   | No. 3 | 477–495 |

## OPERATION OF TRANSPORT SYSTEMS

- |   |       |         |
|---|-------|---------|
| <i>V. A. Barausov, Vl. P. Bubnov, Sh. Kh. Sulstonov, D. V. Barausov</i><br>Algorithms of the control program of automatic cleaning systems of the turnouts based on the sensor for determining ice or snow on the controlled surface      | No. 2 | 231–251 |
| <i>A. G. Kabetsky, A. D. Manakov</i><br>Norms and methods for determining the electromagnetic compatibility of modern automatic locomotive signaling systems and electric rolling stock with an asynchronous traction drive on the subway | No. 4 | 503–521 |
| <i>K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin</i><br>An integrated synergetic-indicator approach to the management of transportation processes on busy and low-density lines  | No. 2 | 252–267 |
| <i>A. D. Manakov, V. A. Shatokhin, A. A. Poroshin</i><br>Active protection method for power supply of microprocessor complexes of railway automation and remote control   | No. 4 | 522–538 |
| <i>V. N. Myachin, K. S. Borovikova, D. P. Krivtsov</i><br>Features of the classification of the street-road network when constructing the road graph in the transport model   | No. 2 | 268–283 |

- 
- O. N. Pokusaev, A. E. Chekmarev, V. S. Evseev, M. L. Ovsyannikov, K. A. Kozhemyakin* No. 1 39–56  
Operation of existing railways of noncommon organization uses for organising of passenger city service in the district of Biryulevo Vostochnoe in Moscow
- ELEKTRONIC SIMULATION**
- Vi. A. Smagin, Vi. P. Bubnov* No. 4 617–630  
Some remarks on the most important element of metrology – the person
- K. A. Ivanova, D. N. Levin, M. V. Shkurin* No. 1 57–74  
The matrix database for predicting unregulated actions of the flight crew in the inflight abnormal circumstances during the flight mission
- D. S. Kokorev, V. G. Sidorenko, S. K. Khromov* No. 3 414–437  
Automation of work organization support services for users of automated management systems of transportation companies
- I. M. Kokurin* No. 3 438–451  
Solution of problems for interval train separation
- A. I. Safronov, E. V. Lysenko* No. 4 584–616  
Modeling the plan of the transportation process during the morning rush hour on the closed Bolshaya koltsevaya line of the Moscow metro
- V. A. Smagin* No. 1 75–84  
Concept of return optimum in sense of filling of quantization of information



Подписано в печать с оригинал-макета 25.12.2021.  
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 22,625. Уч.-изд. л. 11,3125.  
Установочный тираж 300 экз. Заказ .

Отпечатано в типографии ООО «Издательство ОМ-Пресс»,  
190031, СПб., наб. реки Фонтанки, 117.