



# АВТОМАТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

---

# AUTOMATION ON TRANSPORT

№ 2 • Том 6

Июнь, 2020

---

June, 2020



## **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**

Л. А. Карпичева,  
генеральный директор ООО «ИД Т-ПРЕССА»

## **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 РЕДАКЦИИ**

190031, РФ, Санкт-Петербург, Московский пр., 9,  
кафедра «Автоматика и телемеханика  
на железных дорогах»,  
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 —  
д-р техн. наук, доцент *Д. В. Ефанов*  
Перевод — *Ю. А. Фаттахова*  
Литературный редактор  
и корректор — *Е. Г. Локтионова*  
Выпускающий редактор — *В. Е. Филиппова*  
Верстка — *Н. В. Стасеева*

Электронное сопровождение — *А. С. Иванов*

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020

## **FOUNDER**

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

## **PUBLISHER**

Liudmila A. Karpicheva, CEO  
«ID T-PRESS» LLC

## **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

## **ADDRESS**

190031, Russia, St. Petersburg,  
Moskovskiy ave., 9, «Automation and Remote Con-  
trol on Railways» department,  
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, D. Sc., Associate Professor  
*Dmitry V. Efanov*  
English translation *Yulia A. Fattakhova*  
Editing and proofreading  
*Eugenia G. Loktionova*  
Executive editor *Viktoria E. Philippova*  
Layout *Nadezda V. Staseeva*

Electronic maintenancy *Aleksei S. Ivanov*

© PSTU, 2020

## МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

*Валерий Сапожников*

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

*Константин Бочков*

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

*Сергей Власенко*

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

*Александр Дундуа*

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

*Марек Мезитис*

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

*Йохен Тринкауф*

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

*Раймунд Убар*

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

*Владимир Хаханов*

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

*Фуниан Ху*

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

*Христо Христов*

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

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*Никитин Александр Борисович*

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

*Соколов Вадим Борисович*

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

*Баранов Леонид Аврамович*

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

*Бестемьянов Петр Филимонович*

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

*Бушуев Сергей Валентинович*

канд. техн. наук, доцент,  
УрГУПС, Екатеринбург

*Василенко Михаил Николаевич*

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

*Долгий Игорь Давидович*

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

*Ефанов Дмитрий Викторович*

д-р техн. наук, доцент,  
РУТ, Москва

*Кокурин Иосиф Михайлович*

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

*Марков Дмитрий Спиридонович*

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

*Наседкин Олег Андреевич*

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

*Никищенко Сергей Алексеевич*

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

*Пыркин Антон Александрович*

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

*Розенберг Ефим Наумович*

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

*Сапожников Владимир Владимирович*

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

*Шаманов Виктор Иннокентьевич*

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

*Ходаковский Валентин Аветикович*

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

## INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL

*Valery Sapozhnikov*

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

*Konstantin Bochkov*

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

*Sergey Vlasenko*

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

*Alexander Dundua*

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

*Marek Mezitis*

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

*Johann Trinckauf*

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

*Raimund Ubar*

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

*Vladimir Hahanov*

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

*Funian Hu*

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

*Khristo Khristov*

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

## EDITORIAL BOARD

*Alexander B. Nikitin*

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

*Vadim B. Sokolov*

Ph. D., Associate professor, executive secretary  
of «Automation on Transport»,  
Emperor Alexander I St. Petersburg State  
Transport University, St. Petersburg

*Leonid A. Baranov*

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

*Peter F. Bestemiyarov*

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

*Sergey V. Bushuev*

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

*Michael N. Vasilenko*

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

*Igor D. Dolgiy*

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

*Dmitry V. Efanov*

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

*Iosif M. Kokurin*

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

*Dmitry S. Markov*

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

*Oleg A. Nasedkin*

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

*Sergey A. Nikischenkov*

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

*Anton A. Pyrkin,*

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

*Efim N. Rozenberg*

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

*Vladimir VI. Sapozhnikov*

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

*Victor I. Shamanov*

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

*Valentin A. Khodakovsky*

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

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

*А. Н. Ковкин*

Инверторы как средство безопасного управления двигателями  
стрелочных электроприводов . . . . . 121

*В. А. Кузюков, А. Ю. Васильев, Р. И. Шушпанов*

Управление напольными объектами микропроцессорных  
систем железнодорожной автоматики и телемеханики  
с использованием радиоканала . . . . . 134

### ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

*В. В. Демьянов, А. В. Пультяков, М. Э. Скоробогатов, В. А. Алексеенко*

Методика определения порогового значения отношения сигнал/помеха  
для систем автоматической локомотивной сигнализации . . . . . 149

*А. Г. Котенко, О. В. Котенко*

Динамические модели управления работой станции  
в рамках концепции киберфизических систем. . . . . 165

### ЭЛЕКТРОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

*Д. В. Сперанский, А. В. Горелик, А. В. Орлов*

Задачи оптимизации ресурсов в области технической  
эксплуатации систем автоматики и телемеханики . . . . . 184

*Д. С. Марков, М. Б. Соколов, В. Б. Соколов*

Формализованная схема процесса  
имитационного моделирования рельсовой линии . . . . . 204

### ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ СИСТЕМЫ

*А. Ю. Мухонад, Ю. Ф. Мухонад*

Программная реализация сложных управляющих автоматов. . . . . 222

## CONTENTS

### TRANSPORT CONTROL SYSTEMS

*A. N. Kovkin*

Invertors as means of secure control for electric switch mechanisms . . . . . 121

*V. A. Kuzyukov, A. Yu. Vasiliev, R. I. Shushpanov*

Control of microprocessor-based systems floor facilities for railway automation  
and remote control involving the use of radio channel . . . . . 134

### OPERATION OF TRANSPORT SYSTEMS

*V. V. Demyanov, A. V. Pulyakov, M. E. Skorobogatov, V. A. Alekseenko*

Method of threshold determination of signal-to-noise ratio  
for automatic cab signaling systems . . . . . 149

*A. G. Kotenko, O. V. Kotenko*

Dynamic models of yard operation management within  
the concept of cyber-physical systems . . . . . 165

### ELECTRONIC SIMULATION

*D. V. Speranskiy, A. V. Gorelik, A. V. Orlov*

Tasks of resource optimization in the sphere of automation  
and remote control systems maintenance . . . . . 184

*D. S. Markov, M. B. Sokolov, V. B. Sokolov*

Formalized scheme for the railway line simulation modeling process. . . . . 204

### TECHNICAL DIAGNOSTICS AND CONTROLLABLE SYSTEMS

*A. Yu. Mukhopad, Yu. F. Mukhopad*

Program implementation of complicated control automata. . . . . 222

УДК 681.518.5:004.052.32

**А. Н. Ковкин, канд. техн. наук**

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

## **ИНВЕРТОРЫ КАК СРЕДСТВО БЕЗОПАСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯМИ СТРЕЛОЧНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

В статье рассмотрены вопросы, связанные с использованием преобразовательных схем, формирующих трехфазное переменное напряжение, для реализации сопряжения управляющего вычислительного комплекса системы микропроцессорной централизации стрелок и сигналов с электрическими приводами станционных стрелок, оснащенными трехфазными асинхронными двигателями переменного тока. В начале статьи рассмотрены современные тенденции развития энергетической электроники в части создания преобразователей электрической энергии и частотно-регулируемого электрического привода. Обозначена проблематика, связанная с использованием частотно-регулируемого привода для управления удаленными электрическими машинами.

В ходе изложения материала сформулированы специфические требования к устройствам управления стрелочными приводами на железнодорожном транспорте и обоснована целесообразность отказа от использования широтно-импульсной модуляции и применения в качестве устройств сопряжения инверторов, предусматривающих низкочастотную работу коммутационных элементов. Рассмотрена схема мостового инвертора, выполненная на основе силовых биполярных транзисторов с изолированным затвором и реализующая формирование ступенчато-прямоугольных напряжений на обмотках двигателя. Кроме того, сформулированы требования к реализации электропитания инверторов в составе устройств сопряжения, в частности определены величины постоянных напряжений на входе инвертора, обеспечивающие величину крутящего момента двигателя, аналогичную той, которая имеет место в существующих системах электрической централизации.

Рассмотрены вопросы практической реализации трехфазных мостовых инверторов с низкочастотной коммутацией на основе современной элементной базы, предложено решение, обеспечивающее оптимизацию временных параметров полупроводниковых ключей. Уделено внимание проблематике согласования инвертора как устройства сопряжения с многоканальными вычислительными структурами безопасных систем железнодорожной автоматики. Предложен способ безопасного формирования управляющих сигналов для силовых ключей инвертора, состоящий в использовании генератора управляющих сигналов, питание которого формируется схемой безопасного логического элемента.

Устройство сопряжения с объектами, функциональный преобразователь, трехфазный асинхронный двигатель, инвертор, низкочастотная коммутация, ступенчато-прямоугольное напряжение, крутящий момент, биполярный транзистор с изолированным затвором, генератор управляющих сигналов

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-2-121-133

## Введение

Безопасность современной системы железнодорожной автоматики, построенной на основе вычислительных средств, обеспечивается путем многоканальной обработки информации и использования специальных технических решений для сопряжения вычислительного комплекса с управляемыми объектами [1–3]. Решение проблемы безопасности на уровне устройств сопряжения с объектами (УСО) может быть достигнуто путем использования для коммутации цепей исполнительных объектов реле первого класса надежности. Однако такой подход не позволяет реализовать одно из основных преимуществ микропроцессорных систем, состоящее в малых габаритах и высокой технологичности аппаратных средств. Поэтому современные тенденции развития систем железнодорожной автоматики предполагают для непосредственного управления объектами преимущественное использование силовых полупроводниковых ключей и малогабаритных реле с жестко связанными контактными группами (safety relay). Безопасность функционирования аппаратуры в этом случае обеспечивается особым построением схем, исключающим подачу питания на исполнительный объект при возникновении отказов.

Известными принципами обеспечения безопасности в отечественной практике реализации УСО являются программно-аппаратный контроль исправности полупроводниковых коммутационных элементов с гарантированным отключением питания в случае выявления отказа и использование функциональных преобразователей (ФП) с несимметричным отказом, осуществляющих преобразование энергии источника питания за счет динамической работы коммутационных элементов. Учитывая современный уровень развития силовой элементной базы и преобразовательной техники, а также относительную сложность контроля исправности коммутационных элементов и реализации гарантированного отключения, можно утверждать, что использование ФП — перспективное направление в разработке безопасных УСО.

Безопасное поведение УСО на основе ФП при возникновении отказов коммутационных элементов объясняется утратой способности к преобразованию напряжения источника питания, обеспечивающего функционирование исполнительного объекта. Достоинством преобразовательных схем по сравнению с решениями на основе safety relay можно считать отсутствие дефицитной элементной базы и совместимость с современными системами бесперебойного электропитания на основе шин постоянного тока, поскольку в качестве исходного напряжения для преобразования используется именно постоянное напряжение. Применение преобразовательных схем в качестве безопасных УСО наиболее целесообразно в тех случаях, когда нет необходимости в использовании разделительных трансформаторов для обеспечения безопасности, что случается при управлении объектами, нечувствительными к постоянному напряжению.

В современных стрелочных приводах, применяемых на железнодорожных станциях, используются трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. На ротор воздействует вращающееся магнитное поле, которое создается путем подачи на обмотки статора трехфазного переменного напряжения. Важное свойство данной электрической машины с точки зрения безопасного управления — невозможность вращения ротора под воздействием постоянного тока. Это определяет особый интерес к использованию преобразовательных схем, формирующих трехфазное напряжение, в качестве средства управления данным исполнительным объектом. При этом следует определить оптимальный режим работы силовых ключей, обеспечивающий эффективное использование инвертора в качестве устройства управления приводами железнодорожных стрелок. Кроме того, необходимо сформулировать требования к реализации электропитания данного устройства управления и разработать технические решения для безопасного согласования инвертора с управляющими вычислительными средствами.

### **1. Формирование трехфазного переменного напряжения для двигателей стрелочных приводов**

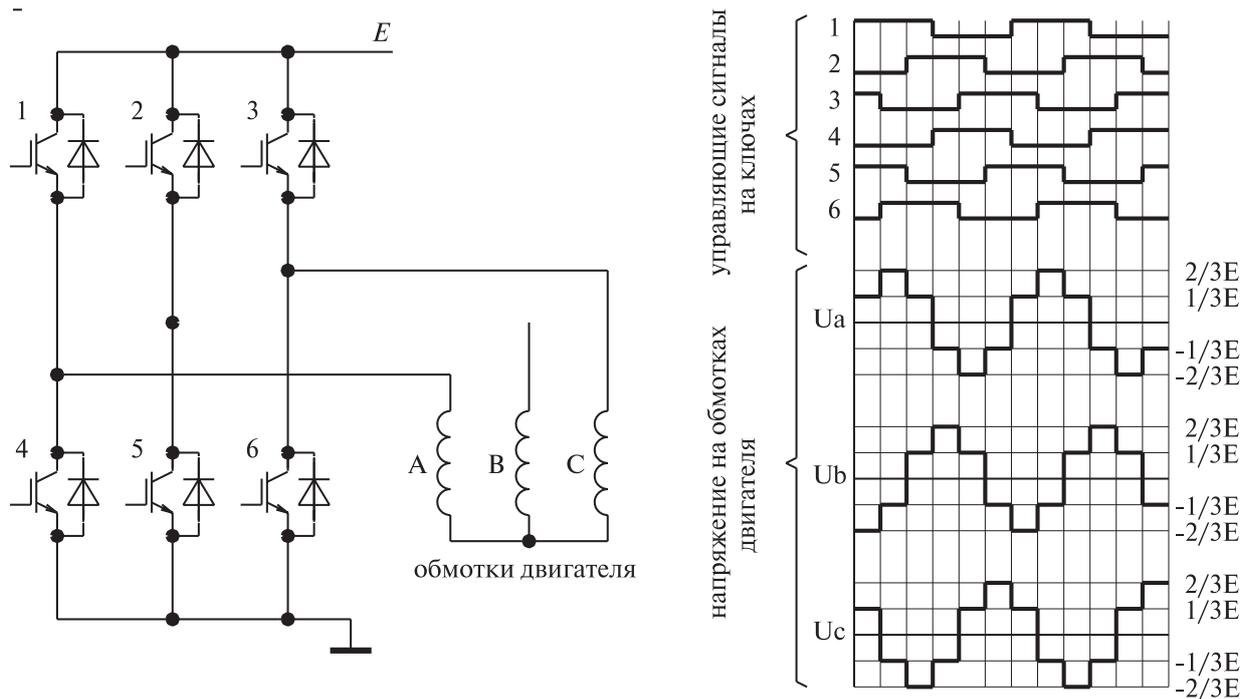
В качестве преобразовательной схемы, позволяющей создавать трехфазное напряжение для двигателей, обычно рассматривается мостовой инвертор напряжения. Одна из областей применения трехфазных инверторов — системы электропитания. В этом случае инверторы используются для получения трехфазного напряжения при наличии первичного источника постоянного напряжения [4]. Относительно несложные преобразователи формировали напряжение прямоугольной или ступенчатой формы. Более прогрессивные технические решения обеспечивали получение синусоидальных напряжений за счет применения различных электрических фильтров и широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Трехфазные инверторы применяются и для реализации частотно-регулируемого электропривода (ЧРП), который сегодня широко используется в промышленности и на транспорте [5].

Одним из основных достижений, связанных с реализацией ЧРП, стала возможность плавного изменения частоты вращения асинхронных и синхронных электрических машин путем изменения частоты трехфазного напряжения. Для сохранения постоянного крутящего момента регулирование частоты следует сопровождать пропорциональным изменением величины напряжения на обмотках двигателя. Чтобы уменьшить потери в обмотках, форма тока должна быть максимально приближена к синусоиде. Указанные требования проще всего обеспечить, используя ШИМ в сочетании с высокой частотой переключения коммутационных элементов преобразователя. В результате применение высокочастотной коммутации фактически стало нормой при разработке преобразовательных устройств. Технические решения, предусматривающие работу коммутационных приборов на низких частотах, весьма редко попадают в поле зрения современных разработчиков.

В случае использования трехфазных инверторов в качестве УСО в железнодорожных системах автоматики такая тенденция нуждается в критической оценке. Связано это с иной «системой ценностей» в данной области, а также с необходимостью централизованного управления объектами, удаленными на большое расстояние. Если речь идет о стрелочном приводе, задача изменения частоты вращения двигателя не ставится. Величина потерь в обмотках не имеет определяющего значения в силу кратковременного режима работы приводов и тепловой инерции двигателей. Фактически преобразовательная схема рассматривается исключительно как средство реализации безопасного управления, а значит, нет необходимости в использовании ШИМ как средства регулирования напряжения и получения синусоидальных токов в обмотках. Необходимо понимать, что значительная протяженность кабельных линий, соединяющих двигатели приводов с преобразовательными устройствами, существенно обостряет проблемы, связанные с высокочастотной коммутацией цепей. Отмечается возможность опасного и мешающего влияния на цепи других устройств, что особенно актуально для систем железнодорожной автоматики. Стоит упомянуть и известные недостатки ЧРП, проявляющиеся при удаленном размещении управляемых двигателей. Во-первых, возникают значительные токи утечки через емкость кабельной линии, что создает дополнительную нагрузку на преобразовательную схемотехнику. Во-вторых, высокая скорость переключения коммутационных элементов преобразователя в сочетании с большой длиной кабеля способствует возникновению импульсных перенапряжений на обмотках двигателей и в конечном счете приводит к преждевременному изнашиванию изоляции обмоточного провода.

Указанные проблемы можно решать путем установки электрических фильтров, обеспечивающих подавление высокочастотных гармоник на выходе преобразователей. Однако применение схем фильтрации нельзя рассматривать в качестве рационального решения при создании микропроцессорных систем централизации, реализующих управление значительным количеством стрелочных приводов, поскольку использование электрических фильтров заметно увеличивает габариты и стоимость аппаратуры.

Учитывая вышесказанное, оптимальным вариантом для безопасного управления стрелочными приводами переменного тока следует считать использование трехфазных мостовых схем преобразования с низкочастотной коммутацией [6–8]. Низкая частота переключения обеспечивает уменьшение динамических потерь на силовых ключах. Это позволяет серьезно сократить размеры радиаторов, реализующих отведение тепла от полупроводниковых компонентов, что способствует заметному улучшению массогабаритных показателей аппаратуры. Схемное решение трехфазного инвертора, реализованное на основе современной элементной базы, а также временная диаграмма, поясняющая работу трехфазного преобразователя при низкочастотном управлении ключами, показаны на рисунке 1.



**Рис. 1.** Схема трехфазного мостового инвертора для управления двигателем стрелочного привода и временная диаграмма работы

Форма напряжения на обмотках двигателя зависит от схемы соединения обмоток и алгоритма управления силовыми ключами. При соединении обмоток по схеме «звезда» и равной длительности открытого и закрытого состояния каждого ключа на обмотках двигателя формируется ступенчато-прямоугольное напряжение, характеризующееся относительно небольшим коэффициентом гармоник, — приблизительно равным 14 % [4].

Величина постоянного напряжения, подаваемого на преобразовательную схему, должна быть такой, чтобы крутящий момент двигателя был эквивалентен моменту, существующему при работе на синусоидальных напряжениях. При определении параметров источника питания преобразовательной схемы за основу можно принять известное положение: крутящий момент асинхронного двигателя при работе на несинусоидальных напряжениях является суммой крутящихся моментов, создаваемых в отдельности каждой гармоникой.

Если не учитывать падения напряжения на открытых ключах, разложение ступенчатого напряжения, формируемого на обмотках двигателя, в ряд Фурье дает следующее выражение для мгновенного значения напряжения [9]:

$$u(t) = \frac{2E}{\pi} \sin \omega t + \sum_{k=5}^{k=\infty} \frac{2E}{\pi k} \sin k\omega t, \quad (1)$$

где  $E$  — величина постоянного напряжения на шине питания инвертора,  $k$  — порядковый номер гармоники напряжения. Первое слагаемое в данном выражении определяет величину основной гармоники. Третья гармоника в ступенчатом

напряжении отсутствует. Для рассматриваемой формы напряжения номер гармоники может принимать только нечетные и не кратные трем значения. Вращающиеся моменты, создаваемые высшими гармониками, имеют различные направления. Гармоники с порядковым номером  $6n + 1$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) создают крутящий момент, совпадающий по направлению с моментом, создаваемым основной гармоникой. Гармоники с порядковым номером  $6n - 1$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) создают крутящий момент противоположного направления. Из формулы (1) видно, что амплитуда напряжения убывает по мере роста номера гармоники. Крутящий момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения на обмотках статора. Если учесть квадратичную зависимость момента от напряжения, а также то, что моменты, создаваемые высшими гармониками, в силу своей разнонаправленности частично компенсируют друг друга, можно с достаточной для практики точностью считать результирующий момент асинхронной машины равным моменту, создаваемому основной гармоникой напряжения. Учитывая выражение (1), действующее значение напряжения основной гармоники можно определить следующим образом:

$$U = \frac{\sqrt{2}E}{\pi}. \quad (2)$$

Учитывая (2), при заданном значении действующего напряжения основной гармоники постоянное напряжение должно иметь величину:

$$E = \frac{U\pi}{\sqrt{2}}. \quad (3)$$

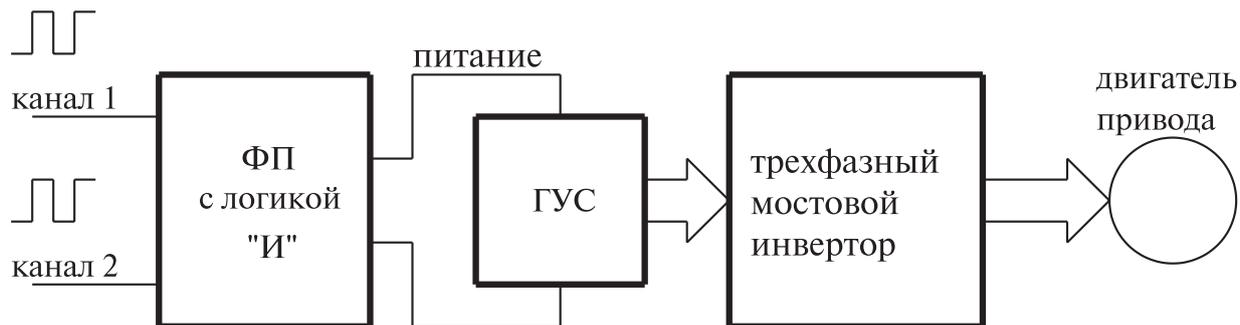
При помощи формулы (3) можно определить величину постоянного напряжения на входе инвертора, обеспечивающую крутящий момент, аналогичный тому, который происходит при эксплуатации стрелочных приводов в релейных системах электрической централизации. Номинальное значение линейного напряжения в рабочей цепи стрелочных приводов принято равным 220 В. Фазное напряжение будет 127 В. Если пренебречь падением напряжения на открытых ключах преобразовательной схемы, то, согласно (3), переменное напряжение 127 В можно получить при величине постоянного напряжения 282 В. Типовое значение напряжения на открытом силовом ключе в современных преобразовательных схемах имеет величину около 1,5 В. Ток двигателя протекает через два открытых транзистора. Поэтому, учитывая потери на ключах, требуемую величину постоянного напряжения целесообразно принять равной 285 В. Для управления удаленными стрелками существующие устройства электропитания формируют напряжения, на 5 % превышающие номинальное значение. С учетом этого при значительном удалении объектов постоянное напряжение на входе инвертора должно иметь величину около 300 В.

## 2. Элементная база трехфазного мостового инвертора и принципы безопасного управления ключами

В современной преобразовательной технике для мощностей порядка нескольких киловатт в качестве полупроводниковых ключей успешно используются полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET) или биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) [10–16]. Основным достоинством различных типов транзисторов с изолированным затвором становится минимальное потребление мощности от источника управляющих сигналов, что позволяет использовать для управления ключами относительно несложные схемные решения, реализуемые в микроэлектронном исполнении. Разрабатывая преобразователи для электрических приводов, работающих при напряжениях от 200 В, предпочтительнее использовать IGBT. Эти транзисторы сочетают в себе положительные качества полевых и биполярных приборов и при величинах рабочего напряжения порядка нескольких сотен вольт имеют меньшую, чем у MOSFET, величину статических потерь. Диоды, включенные параллельно транзисторам (рис. 1), используются для рекуперации энергии, накапливаемой в индуктивности нагрузки. Указанные диоды, как правило, входят в состав современных IGBT, разработанных для использования в схемах управления двигателями.

Особенность IGBT (по сравнению с ранее применявшимися полупроводниковыми ключами) — высокое быстродействие. Время включения и выключения современных приборов сокращено до сотен наносекунд, Это положительный момент в условиях высокочастотной работы ключей. В контексте низкочастотной коммутации при наличии протяженных кабельных линий данное свойство ключа будет скорее недостатком, чем достоинством, поскольку усиливает негативные эффекты, связанные с большой скоростью изменения напряжений на выходе преобразовательной схемы.

Существуют различные возможности искусственного ограничения скорости изменения напряжения при использовании быстродействующих силовых ключей [10]. Применительно к силовым ключам с изолированным затвором наименее затратным и довольно эффективным способом ограничения скорости изменения напряжений можно считать увеличение сопротивления в цепи затворов транзисторов. В типовых схемных решениях, работающих на высокой частоте, сопротивление резисторов, включаемых в цепь затворов, обычно имеет величину, не превышающую 100 Ом. В преобразователях, работающих на низких частотах, величина данного сопротивления может быть многократно увеличена. Результаты экспериментальных исследований, проводимых автором, показывают, что оптимальная величина сопротивления резисторов в цепях затворов IGBT при работе на частоте 50 Гц имеет величину порядка единиц кОм. Дальнейшее увеличение сопротивления до десятков кОм и более приводит к заметному ухудшению энергетической эффективности преобразовательной схемы, поскольку динамические потери на ключах возрастают до значений, соизмеримых с величинами потерь проводимости.



**Рис. 2.** Структура безопасного УСО на основе трехфазного мостового инвертора в системе микропроцессорной централизации МПЦ-МПК

Управляющие сигналы для силовых ключей трехфазного мостового преобразователя могут генерироваться вычислительными средствами микропроцессорной системы автоматики. Однако в ходе практической реализации аппаратуры сопряжения предпочтительным вариантом оказывается использование отдельных генераторов управляющих сигналов (ГУС) в составе УСО. Объясняется это стремлением к более эффективному использованию вычислительных ресурсов системы, а также необходимостью исключения повреждения силовых компонентов при возникновении сбоев в работе управляющего вычислительного комплекса. Ранее для построения таких генераторов применялись транзисторные и микроэлектронные схемы с «жесткой логикой» [4]. Сегодня в основном используется программируемая элементная база (микроконтроллеры), что позволяет значительно упростить схемные решения, реализовать более совершенные алгоритмы работы и обеспечить легкую перенастройку временных параметров управляющих сигналов без изменения аппаратных средств. Непосредственное управление силовыми ключами реализуется с помощью драйверов, которые представляют собой микросхемы, обеспечивающие формирование управляющих импульсов с требуемыми параметрами и защиту силовых полупроводниковых ключей в аварийных режимах [10, 17]. Пример такой реализации безопасного управления инвертором для дублированной безопасной структуры показан на рисунке 2.

В данном примере безопасное управление реализуется путем формирования питания ГУС с помощью ФП малой мощности, реализующих логическую обработку динамических сигналов от управляющего вычислительного комплекса [18, 19].

## Заключение

Перспективным вариантом реализации безопасного управления стрелочными приводами переменного тока в микропроцессорных системах централизации становится использование инверторов — преобразовательных схем, формирующих переменное напряжение. Современная практика использования инверторов

в системах электропитания и частотно-регулируемом приводе предусматривает высокочастотную работу коммутационных элементов с широтно-импульсной модуляцией. Управление стрелочными приводами на железнодорожном транспорте требует иного подхода, что связано с отсутствием задачи регулирования частоты вращения и необходимостью управления двигателями, удаленными на значительное расстояние от преобразовательного устройства. В качестве основных ориентиров при выборе технических решений можно назвать обеспечение минимальных габаритов и стоимости аппаратуры в пересчете на один исполнительный объект, а также минимизацию электромагнитных влияний на цепи других устройств. В указанных условиях наиболее эффективен известный принцип формирования трехфазного напряжения, предусматривающий работу полупроводниковых ключей на частоте 50 Гц.

Инверторы, используемые в качестве устройства сопряжения с приводами, следует создавать на основе современной элементной базы, исключающей необходимость применения сложных схемотехнических решений. В составе устройств сопряжения не должна использоваться крупногабаритная и дорогостоящая элементная база, в частности силовые трансформаторы. Алгоритм управления силовыми ключами должен обеспечивать формирование на обмотках двигателей напряжения ступенчато-прямоугольной формы, характеризующегося минимальным значением коэффициента гармоник.

Основным критерием выбора величины постоянного напряжения, преобразуемого инвертором, становится обеспечение крутящего момента, эквивалентного тому, который реализуется в существующих системах электрической централизации при использовании синусоидальных напряжений. Анализ воздействия ступенчатого напряжения, формируемого на обмотках двигателя, позволяет сделать вывод, что величина крутящего момента определяется напряжением основной гармоники. Соответственно, постоянное напряжение должно быть таким, чтобы среднеквадратичное значение основной гармоники было равно фазному напряжению, обеспечиваемому устройствами электропитания релейных систем электрической централизации. Расчеты показывают, что для выполнения данного условия величина постоянного напряжения должна составлять 285 В.

Оптимальным решением при выборе элементной базы для построения инверторов, обеспечивающих работу нагрузки мощностью порядка единиц кВт, можно считать использование биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT). Свойственная этим транзисторам высокая скорость переключения — недостаток в условиях управления удаленными объектами. Простой и эффективный метод ограничения быстродействия полупроводниковых ключей с изолированным затвором — увеличение сопротивления в цепях затворов. Результаты экспериментальных исследований, проводимых автором, дают основания утверждать, что при работе силовых ключей на частоте 50 Гц наилучшие результаты могут достигаться при величинах сопротивлений порядка единиц кОм.

В ходе практической реализации УСО на основе инверторов неизбежно возникает проблема реализации безопасного управления преобразовательной схемой. Как вариант эффективного решения данной проблемы предложено использование отдельных генераторов управляющих сигналов для каждого исполнительного объекта, питание которых формируется маломощными функциональными преобразователями, работающими под непосредственным управлением вычислительных средств микропроцессорной системы автоматики.

Новизна данного исследования состоит в разработке рекомендаций и технических решений, обеспечивающих эффективное использование известных принципов преобразования электрической энергии для построения безопасной аппаратуры управления стрелочными приводами на основе современной элементной базы. Предложенные решения успешно реализованы в системе микропроцессорной централизации МПЦ-МПК, разработанной специалистами Петербургского государственного университета путей сообщения [20]. Первым объектом внедрения аппаратуры сопряжения с приводами на основе инверторов явилась станция промышленного транспорта в Сургуте на предприятии «Нефтегазоргсинтез». Систему МПЦ-МПК ввели в эксплуатацию на указанной станции в 2007 году. Сейчас аппаратура сопряжения с напольным оборудованием на основе преобразовательных схем введена в постоянную эксплуатацию в составе системы МПЦ-МПК на ряде станций промышленного и магистрального железнодорожного транспорта России, а также на объектах Петербургского метрополитена.

### Библиографический список

1. *Никитин А. Б.* Принципы безопасного сопряжения с объектами в микропроцессорных системах железнодорожной автоматики / А. Б. Никитин, Н. А. Журавлева, А. Н. Ковкин, В. А. Соколов // Автоматика на транспорте. — 2019. — Т. 5, № 2. — С. 186–201.
2. *Brauer H.* Das elektronische Stellwerk EIA / H. Brauer // Signal und Draht. — 1989. — N5. — P. 87–102.
3. *Eue W.* SIMIS-C-Die Kompaktversion des Sicheren Mikrocomputer-systems SIMIS / W. Eue, M. Gronemeyer // Signal und Draht. — 1987. — Vol. 79, N 4. — P. 81–85.
4. *Gottlieb I. M.* Power Supplies, Switching Regulators, Inverters and Converters: 2<sup>th</sup> Edition / I. M. Gottlieb. — 1994. — 479 p.
5. *Avery P.* The truth about five common VFD myths / P. Avery // Yaskawa. — 2015. — 6 p.
6. *Балуев Н. Н.* Преобразователи для питания стрелочных электроприводов / Н. Н. Балуев, Ю. А. Алешечкин, А. Б. Никитин, А. Н. Ковкин // Автоматика, связь, информатика. — 2012. — № 3. — С. 2–5.
7. *Ковкин А. Н.* Бесконтактное управление электродвигателями в системах автоматики железных дорог и метрополитенов / А. Н. Ковкин // Проблемы безопасности и надежности микропроцессорных комплексов: сб. трудов научно-практической конференции. — СПб.: ПГУПС, 2015. — С. 18–23.
8. *Ковкин А. Н.* Электронное управление электродвигателями в системах железнодорожной автоматики / А. Н. Ковкин, А. М. Костроминов, Ю. И. Ефименко // Электротехника. — 2016. — № 5. — С. 61–65.

9. *Ротанов Н. А.* Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями / Н. А. Ротанов, А. С. Курбасов, Ю. Г. Быков, В. В. Литовченко; под ред. Н. А. Ротанова. — М.: Транспорт, 1991. — 336 с.
10. *Воронин П. А.* Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение / П. А. Воронин. — М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2001. — 384 с.
11. *Флоренцев С. Н.* Состояние и перспективы развития приборов силовой электроники на рубеже столетий (анализ рынка) / С. Н. Флоренцев // Электротехника. — 1999. — № 4. — С. 2–10.
12. *Wintrich A.* Application manual power semiconductors / A. Wintrich, N. Ulrich, T. Reimann, W. Tursky. — 2010. — 464 p.
13. *Попов А.* Применение IGBT в преобразовательной технике / А. Попов, С. Попов // Новости электроники. — 2013. — № 5. — С. 35–46.
14. *Blake C.* IGBT or MOSFET: Choose Wisely / C. Blake, Ch. Bull // International Rectifier. — 1999. — 5 p.
15. *Chou W.* Ultra-fast 1200V IGBTs reduce switching and conduction losses. — URL: [https://www.researchgate.net/publication/292885929\\_Ultra-fast\\_1200\\_V\\_IGBTs\\_reduce\\_switching\\_and\\_conduction\\_losses](https://www.researchgate.net/publication/292885929_Ultra-fast_1200_V_IGBTs_reduce_switching_and_conduction_losses) (дата обращения: 05.02.2019).
16. IGBT Characteristics. Application Note AN-983 // International Rectifier. — 2012. — 16 p.
17. *Булычев А.* Ключ на плечо! Особенности применения высоковольтных драйверов производства IR / А. Булычев, К. Автушенко // Новости электроники. — 2013. — № 5. — С. 20–26.
18. *Гавзов Д. В.* Бесконтактные УСО для микропроцессорных централизаций. Проблемы безопасности функциональных преобразователей с несимметричным отказом / Д. В. Гавзов, А. Н. Ковкин // Разработка и эксплуатация новых устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики: сб. научных трудов. — СПб: ПГУПС, 2004. — С. 46–49.
19. *Ковкин А. Н.* Практическая реализация логической обработки управляющих сигналов в дублированной безопасной системе с использованием преобразовательных схем / А. Н. Ковкин // Транспорт Урала. — 2019. — № 3. — С. 52–58.
20. *Сапожников В. В.* Микропроцессорная система электрической централизации МПЦ-МПК / В. В. Сапожников, А. Б. Никитин // Наука и транспорт. — 2009. — № 1. — С. 18–21.

#### **A. N. Kovkin**

*The department of "Automation and Remote Control on the Railway",*

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

### **INVERTORS AS MEANS OF SECURE CONTROL FOR ELECTRIC SWITCH MECHANISMS**

Issues related to the use of converting schemes were considered in the article; the latter form three-phase alternating voltage in order to conjugate supervisory computer control system of computer-based interlocking control with electric drives of station switches, equipped with three-phase asynchronous alternating current motors. Modern trends for power electronics were examined at the beginning of the article particularly concerning the development of electric energy transducers and frequency-controlled electric drive. Problems related to the use of frequency-controlled drive for remote electric machinery control were stated.

Specific requirements for point machine control on railway transport were formulated in course of presentation of basic material. Moreover, the appropriateness of pulse-width modulation disuse, as well as application of invertors as conjugation facilities, requiring low-frequency operation of switching elements, was justified. A scheme of bridge inverter performed on the basis of insulated-gate bipolar transistors was examined; the former carrying out the formation of stepwise rectangular voltage at motor windings. The requirements to electric power supply of invertors being part of conjugation facilities were also formulated. Particularly, constant voltage values at the output of the inverter, providing torque data similar to that in the current electric interlocking systems, were determined.

Issues of practical realization of three-phase bridge invertors with low-frequency commutation based on current integrated circuit were considered. A solution providing optimization of timing parameters for semiconductor keys was suggested. Attention was paid to problems of concordance of the inverter as interface with multi-channel computational structures in railway automation security systems. A method of safe formation of control signals for power keys of the inverter, consisting in control signal generator usage, was introduced. It should be noted that the power supply of the latter is formed by means of a safe gate circuit.

Interface, functional generator, three-phase induction motor, inverter, low-frequency commutation, stepwise rectangular voltage, torque, insulated gate bipolar transistor, control signal generator

## References

1. Nikitin A. B., Zhuravleva N. A., Kovkin A. N. & Sokolov V. A. (2019) Printsipy bezopasnogo sopryazheniya s obyektamy v mikroprotsessornykh sistemakh zheleznodorozhnoy avtomatiki [Approaches to secure interfacing with objects in microprocessor-based systems of railway automation]. *Avtomatika na transporte [Transport automation]*, vol. 5, no. 2, pp. 186–201. (In Russian)
2. Brauer H. (1989) Das elektronische Stellwerk EIA. *Signal und Draht*, no. 5, pp. 87–102.
3. Eue W. & Gronemeyer M. (1987) SIMIS-C-Die Kompaktversion des Sicheren Mikrocomputer-systems SIMIS. *Signal und Draht*, vol. 79, no. 4, pp. 81–85.
4. Gottlieb I. M. (1994) Power Supplies, Switching Regulators, Inverters and Converters. 2 Edition, 479 p.
5. Avery P. (2015) The truth about five common VFD myths. *Yaskawa*, 6 p.
6. Baluev N. N., Aleshechkin Yu. A., Nikitin A. B. & Kovkin A. N. (2012) Preobrazovately dlya pitaniya strelochnykh elektroprivodov [Converters for power supply of electric switch mechanisms]. *Avtomatika, svyaz, informatika [Automation, telecommunication, information technology]*, no. 3, pp. 2–5. (In Russian)
7. Kovkin A. N. (2015) Beskontaktnoye upravleniye elektrodvigatelyamy v sistemakh avtomatiki zheleznnykh dorog i metropolitenov [Contactless control of electric motors in systems of railway and subway automation]. *Problemy bezopasnosti i nadezhnosti mikroprotsessornykh kompleksov [Security and reliability issues of microprocessor-based complexes]*. Sbornik trudov nauchno-prakticheskoy konferentsii [Collected papers of research and training conference]. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University] Publ., pp. 18–23. (In Russian)
8. Kovkin A. N., Kostrominov A. M. & Efimenko Yu. I. (2016) Elektronnoye upravleniye elektrodvigatelyamy [Electronic control of electric motors in railway automation systems]. *Elektrotehnika [Electrical engineering]*, no. 5, pp. 61–65. (In Russian)
9. Rotanov N. A., Kurbasov A. S., Bykov Yu. G. & Litovchenko V. V. (1991) Elektropodvizhniy sostav s asinkhronnymy tyagovymy dvigatelyamy [The electric stock with asynchronous driving motors]. Ed. by N. A. Rotanov. Moscow, Transport Publ., 336 p. (In Russian)

10. Voronin P. A. (2001) Siloviye poluprovodnikovkiye klyuchi: semeistva, kharakteristiki, primeneniye [Power semiconductor keys: range, features, application]. Moscow, “Dodeka-XXI” [“Dodeka-XXI” Publishing house] Publ., 384 p. (In Russian)
11. Florentsev S. N. (1999) Sostoyaniye i perspektivy razvitiya priborov silovoy elektroniki na rubezhe stoletiy (analiz rynka) [Condition and development prospects of power electronics facilities at the turn of the century (market research)]. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering], no. 4, pp. 2–10. (In Russian)
12. Wintrich A., Ulrich N., Reimann T. & Tursky W. (2010) Application manual power semiconductors, 464 p.
13. Popov A. & Popov S. (2013) *Primeneniye IGBT v preobrazovatelnoy tekhnike* [IGBT application in converter equipment]. *Novosti elektroniki* [News of electronic engineering], no. 5, pp. 35–46. (In Russian)
14. Blake C. & Bull Ch. (1999) IGBT or MOSFET: Choose Wisely. *International Rectifier*, 5 p.
15. Chou W. Ultra-fast 1200V IGBTs reduce switching and conduction losses. URL: [https://www.researchgate.net/publication/292885929\\_Ultra-fast\\_1200\\_V\\_IGBTs\\_reduce\\_switching\\_and\\_conduction\\_losses](https://www.researchgate.net/publication/292885929_Ultra-fast_1200_V_IGBTs_reduce_switching_and_conduction_losses) (accessed: 05.02.2019).
16. (2012) IGBT Characteristics. Application Note AN-983. *International Rectifier*, 16 p.
17. Bulychev A. & Avtushenko K. (2013) Klyuch na plecho! Osobennosti primeneniya vysokovoltnykh draiverov proizvodstva IR [Shoulder arms! Application specificities of high voltage IR-production drivers]. *Novosti elektroniki* [News of electronic engineering], no. 5, pp. 20–26. (In Russian)
18. Gavzov D. V. & Kovkin A. N. (2004) Beskontaktniye USO dlya mikroprotsessornykh tsentralizatsiy. Problemy bezopasnosti funktsionalnykh preobrazovateley s nesimmetrichnym otkazom [Non-contact remote terminal unit for computer-based interlocking. Security issues of function generators with asymmetric failure]. *Razrabotka i ekspluatatsiya novykh ustroystv i sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniky* [Elaboration and operation of new facilities and systems of railway automation and remote control]. Sbornik nauchnykh trudov [Collected papers]. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University] Publ., pp. 46–49. (In Russian)
19. Kovkin A. N. (2019) Prakticheskaya realizatsiya logicheskoy obrabotki upravlyayushchikh signalov v dublirovannoy bezopasnoy sisteme s ispolzovaniyem preobrazovatelnykh skhem [Physical embodiment of logic processing of control signals in a duplicate trustworthy system involving transforming schemes]. *Transport Urala* [The Ural Transport], no. 3, pp. 52–58. (In Russian)
20. Sapozhnikov V. V., Nikitin A. B. (2009) Mikroprotsessornaya sistema elektricheskoy tsentralizatsii MPTs-MPK [Microprocessor-based system of electric interlocking Computer-based Interlocking — Microprocessor Controller]. *Nauka i transport* [Science and transport], no. 1, pp. 18–21. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии А. Б. Никитиным  
Поступила в редакцию 16.02.2020, принята к публикации 03.03.2020*

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

© Ковкин А. Н., 2020

УДК 621.396.931

**В. А. Кузюков, канд. техн. наук**  
**А. Ю. Васильев**  
**Р. И. Шушпанов**

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

## **УПРАВЛЕНИЕ НАПОЛЬНЫМИ ОБЪЕКТАМИ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОКАНАЛА**

В статье рассматривается возможность применения радиоканала для управления напольными объектами микропроцессорной централизации на железнодорожной станции с учетом обеспечения требуемых показателей надежности и безопасности ответственного технологического процесса движения поездов. На примере типовой участковой станции, с установленной микропроцессорной централизацией с децентрализованным размещением устройств сопряжения с объектами управления и контроля рассматривается организация сети радиосвязи, в которой на прикладном уровне применяется открытый протокол информационного обмена openSAFETY. В статье исследована зависимость вероятности ошибки от коэффициента расширения полосы частот канала в  $n$  раз. По результатам исследования предложено расширение полосы пропускания радиоканала с целью повышения помехоустойчивости радиосвязи в условиях сложной помеховой обстановки на станции. Кроме того, в работе приводятся расчетные соотношения для оценки требуемой скорости передачи информации по радиоканалу исходя из ее объема. Полученные зависимости можно использовать в качестве одного из критериев выбора радиопередающего оборудования. Представлен краткий обзор существующей в настоящее время каналообразующей аппаратуры, которая может работать в разрешенном для ОАО «РЖД» диапазоне частот.

Длина (вес) посылки, количество управляемых объектов, коэффициент избыточности, вероятности появления ошибочного бита, полоса пропускания, помехоустойчивость

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-2-134-148

### **Введение**

Российские железные дороги представляют собой сложную многоотраслевую систему. Повседневную работу железнодорожного транспорта обеспечивает комплекс технологических процессов, включающий:

- перевозку пассажиров и грузов;
- формирование и расформирование составов (маневры, экипировка, ро-спуск на сортировочных станциях);
- техническое обслуживание и ремонт пути, подвижного состава, устройств автоматики и связи, энергоснабжения, искусственных сооружений;
- обслуживание пассажиров, грузоотправителей и грузополучателей;
- управление и координацию подразделений железнодорожного транспорта [1–3].

Большое значение в системе управления технологическими процессами имеет радиосвязь. Ею охвачены практически все основные технологические процессы, что определяется спецификой инфраструктуры железных дорог — значительной протяженностью и наличием множества мобильных объектов. Специфика решаемых задач и высокие требования к надежности и качеству связи определили необходимость создания различных по назначению и способам организации систем радиосвязи на железных дорогах России [4, 5].

Стоит отметить, что радиоканал пока широко не применяется для управления устройствами сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), поскольку в первую очередь следует обеспечить требуемую надежность и безопасность для осуществления ответственного технологического процесса движения поездов. С другой стороны, необходимо изменить нормативную базу, регламентирующую организацию движения, с целью внедрения данных технологий.

Настоящая статья рассматривает возможности использования радиоканала для управления напольными объектами железнодорожной автоматики и телемеханики. Поставлены вопросы, связанные с оценкой устойчивости функционирования радиоканала, а именно добавления коэффициента избыточности полосы пропускания для увеличения помехоустойчивости, что позволит увеличить безопасность и надежность передачи сообщений [6, 7].

### **Входные данные и постановка задачи**

В качестве исходных данных в статье рассматривается двухпутная участковая станция. Структурная схема связи для управления напольными объектами по радиоканалу применительно к рассмотренной станции представлена на рисунке 1. В качестве протокола информационного обмена на канальном уровне предлагается открытый протокол openSAFETY, который можно использовать в системах, связанных с обеспечением функциональной безопасности. Общая схема реализации протокола представлена на рисунке 2, а длина и структура служебного сообщения, наиболее часто передающегося между устройствами, — на рисунке 3 [8, 9].

На станции находится 64 напольных объекта (30 стрелок и 34 светофора), которыми требуется управлять посредством радиоканала.

Для решения поставленной задачи рядом с постом ЭЦ нужно разместить две базовые станции — основную и резервную. На них будут располагаться радиомодемы.

Для резервной базовой станции можно использовать горячий или холодный резерв.

В горячем резерве, в зависимости от требований заказчика, резервная базовая станция работает в режиме дублирования или решения вспомогательных задач и в любой момент готова взять на себя функции основной базовой станции. В холодном резерве резервная базовая станция отключена и начинает работать только при отказе основной базовой станции [10].

От поста электрической централизации протянут сигнальный кабель к каждой базовой станции. На приемной стороне располагается радиомодем, который получает сигналы от базовой станции и передает информацию о состоянии объекта управления от объектного контроллера.

Для организации связи на станции потребуются:

- 30 радиомодемов для управления стрелками;
- 34 радиомодема для управления светофорами;
- два радиомодема (основной и резервный) для передачи команд на исполнительные объекты и контрольной информации на базовые станции.

Таким образом, всего потребуется 66 радиомодемов.

### Структурная схема связи

Структурная схема связи приведена на рисунке 1. Передающее устройство (ПУ) обменивается информацией с преобразователем, который кодирует информацию в последовательный интерфейс, поддерживаемый радиомодемом. Сигнал с радиомодема идет на антенну А, вся конструкция образует базовую станцию (БС) [11, 12].

В качестве протокола для организации сети беспроводной связи управления предлагается использовать протокол openSAFETY.

### Протокол openSAFETY, команды для управления объектами

Протокол openSAFETY — это открытый протокол для информационного обмена между компонентами технических систем с учетом обеспечения требований по функциональной безопасности. Стоит отметить, что openSAFETY — открытый протокол в отношении не только патентных прав и законодательства, но и реализации, т. к. он не привязан к какому-либо конкретным шинам и подходит для любых каналов, промышленных сетей стандарта Ethernet и специализированных промышленных систем передачи данных. Группа стандартизации EPSG активно способствует внедрению openSAFETY во все протоколы передачи данных, а также оказывает содействие при прохождении сертификации и проведении проверок соответствия [13, 14].

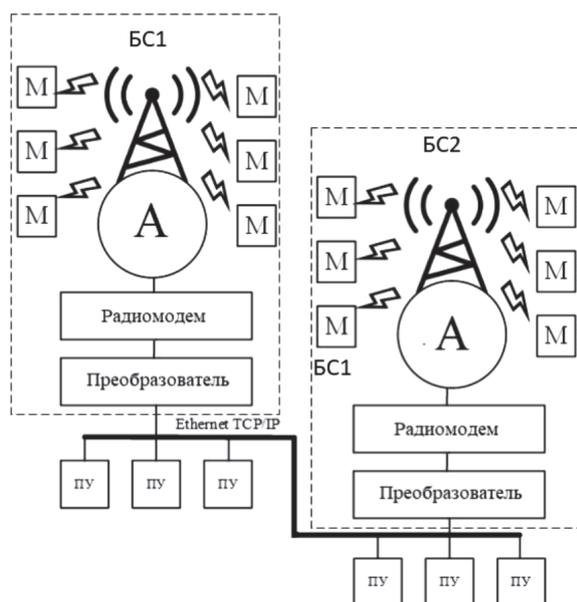
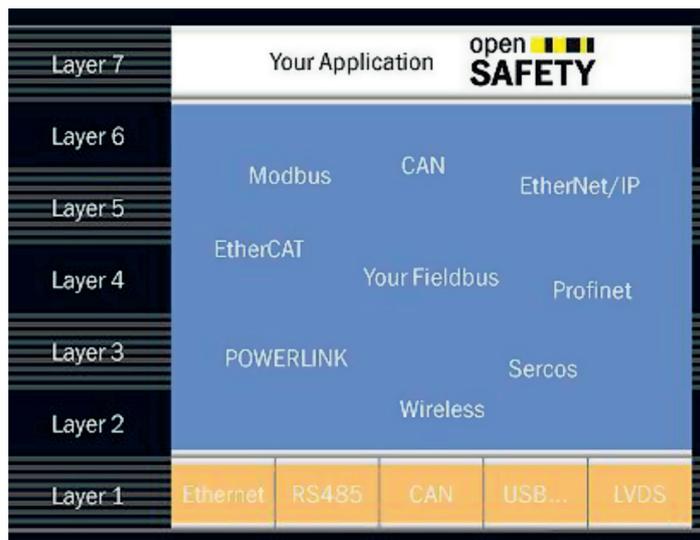
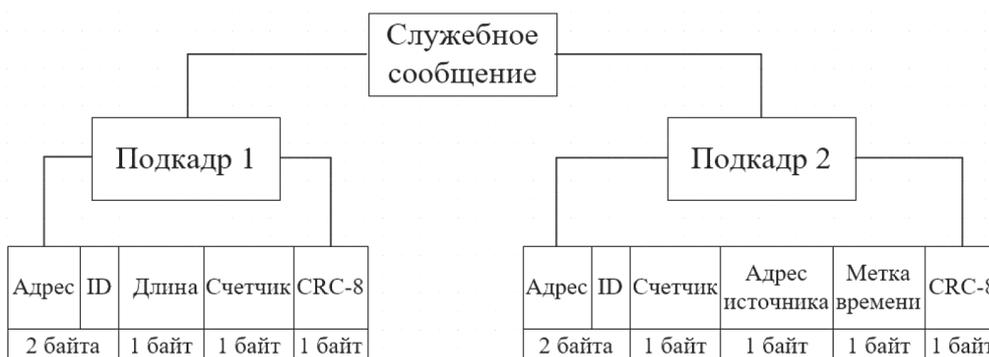


Рис. 1. Структурная схема связи радиомодемов

Для взаимодействия центрального поста и объекта управления в системе используют три типа сообщений: служебное сообщение, сообщение с управ-



**Рис. 2.** Схематическое представление общей реализации протокола openSAFETY



**Рис. 3.** Кадр служебного сообщения

ляющей информацией (приказ) и сообщение с контрольной информацией (статус). Служебные сообщения необходимы для контроля работоспособности радиоканала и обеспечения функциональной безопасности. Они имеют уменьшенный объем по сравнению с сообщениями приказов и статусов, чтобы не нагружать канал [15].

Пример структуры кадра служебного сообщения указанного протокола представлен на рисунке 3.

Как следует из рисунка, для передачи кадра служебного сообщения требуется 11 байт.

### **Зависимость вероятности ошибки от коэффициента избыточности**

Отдельно рассмотрим вопрос увеличения помехоустойчивости системы за счет расширения полосы пропускания. Выведем зависимость вероятности ошибки от коэффициента избыточности (коэффициент расширения полосы частот в  $n$  раз).

Из теории передачи аналоговых сигналов известно, что одним из критериев качества сигнала является  $S/N$ , что определяется как отношение средней мощности сигнала ( $S$ ) к средней мощности шума ( $N$ ). В цифровых системах связи чаще используется нормированная версия  $S/N$ , обозначаемая как  $E_b/N_0$ , где  $E_b$  — энергия бита. Ее можно описать как мощность сигнала  $S$ , умноженную на время передачи бита информации  $T_b$ ,  $N_0$  — это спектральная плотность мощности шума. Ее можно выразить как мощность шума  $N$ , деленную на ширину полосы  $W$ . Поскольку время передачи бита и скорость передачи битов взаимно обратны,  $T_b$  можно заменить на  $1/R$ , где  $R$  — это битовая скорость.

Перепишем выражение так, чтобы было явно видно: отношение  $E_b/N_0$  представляет собой отношение  $S/N$ , нормированное на ширину полосы и скорость передачи битов: 
$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{N} \left( \frac{W}{R} \right).$$

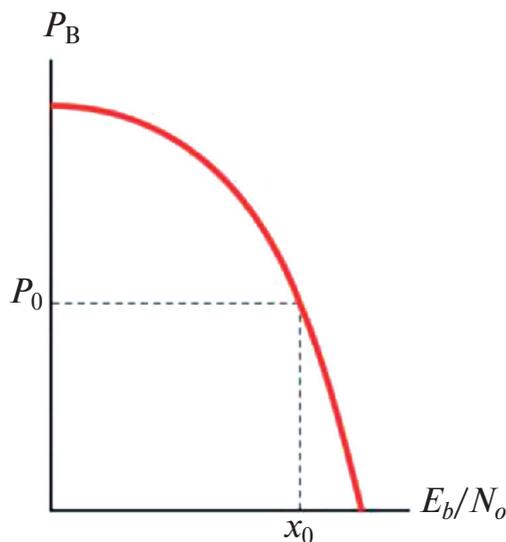
При расширении полосы частот, т. е. введении коэффициента избыточности, получим прямо пропорциональную зависимость энергии бита от нее:  $E_b \sim K_i \cdot W$ . Таким образом, с увеличением полосы пропускания увеличивается энергия бита, следовательно, увеличивается отношение  $E_b/N_0$ . Одной из важнейших метрик качества в системах цифровой связи является график зависимости вероятности появления ошибочного бита  $P_b$  (BER — Bit Error Probability) от  $E_b/N_0$ . Выражения, описывающие эту зависимость, очень громоздки, однако с небольшой погрешностью (около 0,1 дБ) они могут быть упрощены и представлены в виде: 
$$P_b \left( \frac{E_b}{N_0} \right) = 2 \cdot \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left[ \sqrt{\frac{3 \log 3M}{2(M-1)} \cdot \frac{E_b}{N_0}} \right],$$

где  $M$  — число элементов пространства сигналов при цифровой модуляции. В общем виде зависимость представлена на рисунке 4 [16–18].

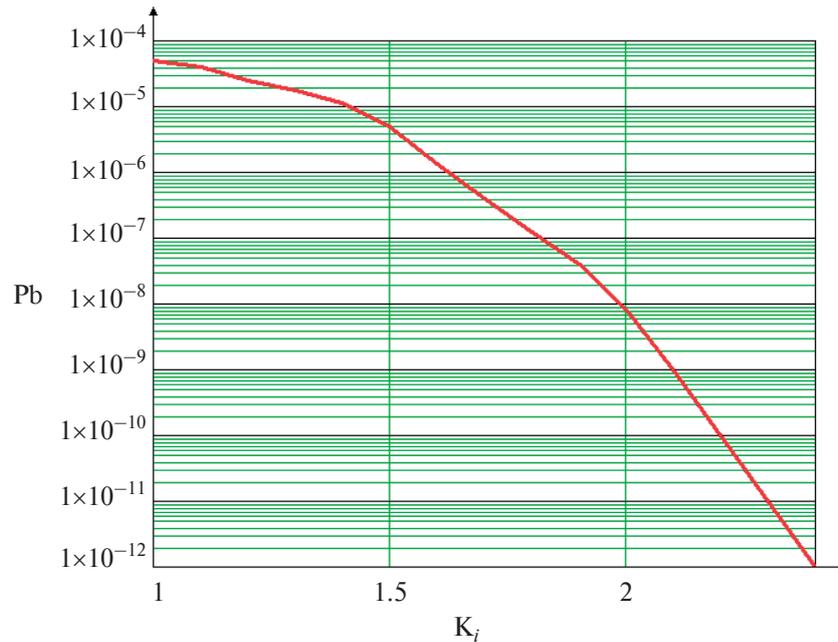
Из этого графика видно, что с увеличением отношения  $E_b/N_0$  уменьшается вероятность появления ошибочного бита. Из этого можно получить зависимость  $P_b$  от  $K_i$  и построить график этой зависимости (рис. 5).

Из графика видно, что при увеличении коэффициента избыточности вероятность появления ошибочного бита уменьшается.

Значит, один из способов повышения помехоустойчивости передачи информации по беспроводным сетям — увеличение полосы пропускания.



**Рис. 4.** График зависимости вероятности появления ошибочного бита  $P_b$  от  $E_b/N_0$



**Рис. 5.** График зависимости  $P_b$  от  $K_i$

### Расчет требуемой скорости передачи

Для расчета требуемой скорости передачи с целью организации сети управления введем следующие обозначения:

- $t$  — время доставки сообщения, с;
- $a$  — длина (вес) посылки, бит;
- $N$  — количество управляемых объектов;
- $K_i$  — коэффициент избыточности.

При расчете полосы пропускания, требуемой на один объект, с учетом коэффициента избыточности формула будет выглядеть так:

$$V = K_i \cdot \frac{2a}{t}, \text{ бит/с.} \quad (1)$$

Тогда получаем общую скорость на все объекты:

$$v = V \cdot N, \text{ бит/с.} \quad (2)$$

Необходимое число радиоканалов для передачи данных на все объекты может быть определено по формуле:

$$k = \frac{v}{\lambda}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  — скорость передачи радиоустройства на одной длине волны, кбит/с:

$$k = \frac{K_i \cdot 2 \cdot a \cdot N}{t \cdot \lambda}. \quad (4)$$

При большем количестве управляемых объектов и увеличении длины посылки будет возрастать и требуемое количество радиоканалов.

На количество каналов влияют также время доставки сообщения, длина (вес) посылки и количество управляемых объектов, рассчитанных по формуле (1). Формулу (4) удобно использовать как критерий выбора радиомодема.

Покажем применение формулы (4) для выбора приемопередающей аппаратуры. В качестве примера рассмотрим существующие радиомодем Guardian 100 и радиостанцию «МОСТ», работающие в разрешенной для ОАО «РЖД» полосе частот 136–174 МГц [19].

### Радиомодем Guardian

Модем Guardian 100 (рис. 6) — промышленный радиомодем, обеспечивающий высокоскоростную передачу данных. Он применяется для широкого спектра приложений, требующих высокой надежности и отказоустойчивости, и удаленной диагностики. Асинхронный модем Guardian спроектирован для высокоскоростного и эффективного обмена данными по радиоканалу со скоростью до 19,2 кбит/с в полосе частот 25 кГц.

Guardian разработан как для развертывания новых, так и для расширения существующих сетей сбора данных, в которых используются радиомодемы T-96SR. Данные передаются в радиоканал в той последовательности, в которой были приняты радиомодемом от контроллера, терминала или компьютера, без искажений и дополнительной обработки. Имеет встроенную функцию удаленной диагностики, позволяющую в реальном масштабе времени контролировать состояние устройства (наличие питания, температуру, напряжение, мощность сигнала, наличие соединения с антенно-фидерными устройствами) [20].



Рис. 6. Внешний вид радиомодема Guardian 100

### Радиостанция «МОСТ»

Радиостанция «МОСТ» (радиомодем) предназначена для обмена цифровой информацией по радиоканалу в симплексном и (или) полудуплексном режиме; представлена на рисунке 7.

К внешним устройствам радиостанция подключается через стандартный последовательный порт RS-232. Кабели питания и антенны подключаются к разъемам на задней панели радиомодема. Металлический корпус обеспечивает высокий уровень защиты от внешних помех.

Радиостанция (радиомодем) обладает широким набором сервисных функций, повышающих ее эксплуатационные характеристики: есть возможность измерения и выдачи информации об уровне входного сигнала, КСВн антенно-фидерного устройства, напряжении питания, температуре внутри корпуса приемопередатчика и др. [21].

Рассчитаем количество каналов при использовании этих радиомодемов.



Рис. 7. Внешний вид радиостанции «МОСТ»

### Определение времени цикла передачи сообщения

Согласно п. 4.5.3.2 ГОСТ 33894 [22], одним из ключевых требований к системам МПЦ является обновление данных о состоянии контролируемых путевых объектов, которое должно происходить в реальном времени с задержкой не более 2 с относительно эксплуатационного события. Данное время складывается из:

- времени обработки сообщения объектным контроллером (ОК), включающим в себя два собственных цикла для приема сообщения и передачи ответа;
- времени передачи сообщения от ОК к управляющему вычислительному комплексу (УВК);
- времени цикла УВК, включающего в себя три цикла (прием, обработка, передача);
- времени передачи сообщения от УВК к автоматизированному рабочему месту (АРМ) оператора;
- времени обработки сообщения АРМ, как и времени цикла ОК, включающего в себя два цикла (прием и передача).

Поскольку ОК находятся в непосредственной близости от napольных устройств, а передача данных с них осуществляется по радиоканалу, необходимо определить время передачи ОК–УВК при заданном общем времени реакции системы в 2 с.

Оценим это время с учетом того, что для существующих систем МПЦ можно принять цикл ОК и АРМ равным 100 мс, а цикл УВК — 300 мс.

Таким образом, исходя из требований ГОСТ:

$2 \cdot t_{OK} + t_{OK-УВК} + 3 \cdot t_{ЦП} + t_{ЦП-АРМ} + 2 \cdot t_{АРМ} = 2$  (с) и выразив отсюда  $t_{OK-УВК}$  и подставляя принятые значения, получим:

$$t_{OK-УВК} = 2 - 3 \cdot 0,3 - 2 \cdot 0,1 - 2 \cdot 0,1 - 0,1 = 0,6 \text{ (с)}.$$

Из этого результата следует, что системе с принятыми допущениями времен цикла на передачу сообщения необходимо 600 мс. За это время УВК должен сделать запрос на объект управления и получить актуальную и достоверную информацию с объектного контроллера о состоянии объекта [23].

С целью уменьшения нагрузки на канал связи информационный обмен сообщениями приказов и статусов с объектными контроллерами по радиоканалу должен осуществляться только при необходимости изменить их состояние или при изменении их собственного состояния в результате неисправности, т. е. спорадически. Однако для обеспечения нужного уровня безопасности функционирования системы необходимо, чтобы в остальное время канал был заполнен служебными сообщениями, цель которых — непрерывный контроль исправности устройств и самого канала связи. Поэтому в дальнейших расчетах примем, что основную нагрузку на канал создают служебные сообщения, а не сообщения приказа и статуса. Допущение обосновано тем, что вероятность одновременного выхода всех устройств из строя или необходимость одновременной передачи всем устройствам приказов довольно низка и этими событиями можно пренебречь. Согласно рисунку 3, длина (вес) посылки  $a = 11$  байт. Коэффициент избыточности ( $K_i$ ) примем равным 2, чтобы вероятность появления ошибочного бита, по рисунку 5, была около  $10^{-8}$ , что позволит увеличить безопасность и надежность передачи сообщений [24, 25].

### **Оценка радиомодемов при использовании для радиоуправления напольными устройствами ЖАТ**

Полоса пропускания рассчитывается по формуле (1):

$$V = K_i \cdot \frac{2a}{t} = 2 \cdot 2 \cdot 11 / 0,6 = 73,33 \text{ байт/с} \approx 74 \text{ байт/с}.$$

Общая загрузка радиомодема на передачу по формуле (2):

$$v = V \cdot N = 74 \text{ байт/с} \cdot 64 = 4736 \text{ байт/с}.$$

Рассчитаем скорость передачи данных в двустороннем режиме для радиомодема и переведем скорость в кбит/с:

$$\frac{2 \cdot 4736 \frac{\text{байт}}{\text{с}} \cdot 8}{1024} = 55,5 \text{ кбит/с}.$$

## Максимальные скорости передачи данных радиомодемов

Наименование оборудования	Максимальная скорость
Радиомодем Guardian 100	19,2 кбит/с
Радиомодем МОСТ	9,6 кбит/с

В таблице приведены максимальные скорости передачи данных для радиомодемов.

Для требуемой скорости передачи с применением радиомодемов Guardian 100 требуется:

$$\frac{55,5 \frac{\text{кбит}}{\text{с}}}{19,2 \frac{\text{кбит}}{\text{с}}} \approx 3 \text{ канала,}$$

а при использовании радиомодемов МОСТ —

$$\frac{55,5 \frac{\text{кбит}}{\text{с}}}{9,6 \frac{\text{кбит}}{\text{с}}} \approx 6 \text{ каналов.}$$

Исходя из расчета скорости, можно сделать вывод, что рациональнее использовать радиомодем Guardian 100, т. к. его скорость в два раза выше, а число каналов вдвое меньше.

### Заключение

В представленной статье был рассмотрен пример реализации радиоканала для управления напольными объектами в микропроцессорной системе управления железнодорожной автоматикой и телемеханикой на станции.

В качестве объекта исследования рассматривалась двухпутная участковая станция. Для организации информационного обмена в системе была разработана структурная схема связи. В качестве протокола информационного обмена на прикладном уровне предложено использовать открытый протокол openSAFETY, который может применяться практически с любыми наиболее распространенными протоколами канального уровня. Применительно к указанному протоколу в статье приводится классификация типов сообщений, используемых для информационного обмена между компонентами системы.

Особое внимание в статье уделено вопросам обеспечения помехоустойчивости передачи информации в условиях тяжелой помеховой обстановки на электрифицированной станции. Исследована зависимость вероятности ошибки от величины коэффициента расширения полосы частот канала в  $n$  раз. Показано, что с расширением полосы частот канала в два раза вероятность появления

ошибочного бита снижается примерно на три-четыре порядка, что становится эффективным способом повышения помехоустойчивости передачи и обеспечения функциональной безопасности.

Приведены расчетные соотношения для определения требуемой скорости передачи в зависимости от объема передаваемой информации. На основании полученной оценки выполнено сравнение двух типов существующей каналообразующей аппаратуры с учетом ограничений по полосе разрешенных к использованию частот. Показано, что применение радиомодема Guardian 100 более рационально по сравнению с радиомодемом МОСТ.

Кроме того, в статье приведена оценка времени цикла передачи сообщения с учетом выполнения действующих нормативных требований по функциональной безопасности. Получена величина времени цикла, равная 600 мс.

Для получения более полной картины необходимо в дальнейшем сосредоточиться на вопросах обеспечения надежности радиоканала, его помехозащищенности и информационной безопасности, а также на исследовании экономической эффективности предлагаемого решения.

#### Библиографический список

1. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2007. — 1104 с.
2. *Романчиков А. М.* Цифровизация железнодорожного транспорта в России / А. М. Романчиков, В. А. Гросс, Д. В. Ефанов, А. Ю. Васильев // Транспорт Российской Федерации. — 2018. — № 6 (79). — С. 10–13.
3. *Theeg G.* Railway Signalling & Interlocking: 3ed Edition / G. Theeg, S. Vlasenko. — Germany, Leverkusen PMC Media House GmbH, 2020. — 552 p.
4. *Волков А. А.* Варианты модема для цифровой системы радиосвязи / А. А. Волков, В. А. Кузюков, М. С. Морозов // Мир транспорта. — 2017. — Т. 15, № 6 (73). — С. 48–56.
5. *Волков А. А.* Повышение эффективности цифровой железнодорожной системы радиосвязи GSM-R / А. А. Волков, О. Е. Журавлев, В. А. Кузюков // Успехи современной радиоэлектроники. — 2013. — № 9. — С. 32–36.
6. *Васильев А. Ю.* Новые требования и функции в жизненном цикле МПСУ ЖАТ» / А. Ю. Васильев, А. В. Симаков, В. А. Гросс // Автоматика, связь, информатика. — 2018. — № 8. — С. 27–29.
7. *Darwish T. S.* Fog Based Intelligent Transportation Big Data Analytics in The Internet of Vehicles Environment: Motivations, Architecture, Challenges and Critical Issues / T. S. Darwish, K. A. Bakar // IEEE Access. — 2018. — Vol. 6. — P. 15679–15701.
8. *Шаманов В. И.* Обобщенная математическая модель процесса эксплуатации систем автоматизации и телемеханики / В. И. Шаманов // Автоматика на транспорте. — 2016. — Т. 2, № 2. — С. 163–179.
9. *Шаманов В. И.* Управление процессом модернизации комплексов систем железнодорожной автоматизации и телемеханики / В. И. Шаманов // Автоматика на транспорте. — 2015. — Т. 1, № 3. — С. 237–250.
10. *Фурсов С. И.* Новые решения в области технической диагностики и мониторинга / С. И. Фурсов, А. Ю. Васильев, Н. В. Пушкин // Автоматика, связь, информатика. — 2017. — № 10. — С. 8–10.

11. *Hall C.* Modern Signalling: 5th Edition / C. Hall. — UK, Shepperton: Ian Allan Ltd, 2016. — 144 p.
12. *Grover J.* Wireless Sensor Network in Railway Signalling System / J. Grover, A. Grover // 2015 5<sup>th</sup> International Conference on Communication Systems and Network Technologies. — 2015. — P. 308–313.
13. OpenSAFETY. — URL: <http://open-safety.ru/> (дата обращения: 05.12.2019).
14. *Domingues J. L. M.* Diagnostic levels in railway applications / J. L. M. Domingues // Signal Draht. — 2004. — N 1/2. — P. 31–34.
15. *Hahanov V.* Cyber Physical Computing for IoT-driven Services / V. Hahanov. — New York, Springer International Publishing AG, 2018. — 279 p. DOI: 10.1007/978-3-319-54825-8.
16. Digital Video Broadcasting (DVB). Measurement guidelines for DVB // ETSI. — France, 2001. — 175 p.
17. *Песков С.* Расчет вероятности ошибки в цифровых каналах связи / С. Песков, А. Ищенко // ТЕЛЕ-СПУТНИК. — 2010. — № 11. — С. 70–75.
18. *Flammini F.* Railway safety, reliability and security: Technologies and Systems Engineering / F. Flammini. — IGI Global, 2012. — 462 p.
19. Рекомендации по внедрению цифровой технологической радиосвязи на железнодорожном транспорте стандарта GSM-R // Организация сотрудничества железных дорог (ОСЖД). — 2005. — 48 с.
20. Guardian (Гардиан) — высокоскоростной радиомодем. — URL: <http://www.dataradio.ru> (дата обращения: 05.12.2019).
21. Радиостанция (радиомодем) «МОСТ». — URL: <https://www.irz.ru> (дата обращения: 05.12.2019).
22. ГОСТ 33894–2016. Система железнодорожной автоматики и телемеханики на железнодорожных станциях. Требования безопасности и методы контроля. — М.: Стандартинформ, 2019. — 32 с.
23. *Bauer T.* Digital Railway Stations for Increased Throughput and a Better Passenger Experience / T. Bauer, D. N. Benito // Signal+Draht. — 2018. — Iss. 7+8. — P. 6–12.
24. *Ефанов Д. В.* Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: монография / Д. В. Ефанов. — СПб.: ПГУПС, 2016. — 171 с.
25. *Stäuble R.* Digital Signalling in the Simmental / R. Stäuble, P. Gschwend // Signal+Draht. — 2018. — Iss. 10. — P. 40–46.

**V. A. Kuzyukov**

**A. Yu. Vasiliev**

**R. I. Shushpanov**

*Chair of "Railway Automation, Remote Control and Telecommunication",  
Russian University of Transport, Moscow*

## **CONTROL OF MICROPROCESSOR-BASED SYSTEMS FLOOR FACILITIES FOR RAILWAY AUTOMATION AND REMOTE CONTROL INVOLVING THE USE OF RADIO CHANNEL**

Radio channel applicability was considered in the article in order to control computer-based interlocking floor facilities at the railway station taking into account the provision of the required

reliability and security indices of a responsible engineering procedure that is train traffic process. Radio communication networking, in which a non-proprietary protocol of information exchange openSAFETY is applied at application level, is considered by means of computer-based interlocking with decentralized interface of bridging devices with control and monitoring objects in terms of a standardized local station. The dependence of error probability from band-width spreading factor of channel frequency by a factor of  $n$  was studied in the article. Bandwidth widening of the radio channel was suggested according to the results of the research in order to improve interference immunity of radio communication under complex interference conditions at the station. Moreover, design ratios for estimation of the desired speed of data communication via a radio channel, based on its volume, were presented in the study. The obtained dependencies may be used as one of the selection criteria for radio-transmitting equipment. A brief review of the current channel equipment was presented, which can function in the frequency range authorized for "Russian Railways" JSC.

Parcel length (weight), the number of controlled objects, redundancy coefficient, bit error probability, bandwidth, interference immunity

## References

1. *Sklyar B.* (2007) Tsifrovaya svyaz. Teoreticheskiye osnovy i prakticheskoye primeneniye [Digital communication. Theoretical basis and practical application]. Moscow, "Williams" Publ., 1104 p. (In Russian)
2. *Romanchikov A. M., Gross V. A., Efanov D. V. & Vasiliev A. Y.* (2018) Tsifrovizatsiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossii [Digitization of railway transport in Russia]. Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation], no. 6 (79), pp. 10–13. (In Russian)
3. *Theeg G. & Vlasenko S.* (2020) Railway Signalling & Interlocking. 3rd Edition. Germany, Leverkusen PMC Media House GmbH, 552 p.
4. *Volkov A. A., Kuzyukov V. A. & Morozov M. S.* (2017) Varianty modema dlya tsifrovoy sistemy radiosvyazy [Modem options for digital radiocommunication system]. Mir transport [The world of transport], vol. 15, no. 6 (73), pp. 48–56. (In Russian)
5. *Volkov A. A., Zhuravlev O. E. & Kuzyukov V. A.* (2013) Povysheniye effektivnosti tsifrovoy zheleznodorozhnoy sistemy radiosvyazy GSM-R [Efficiency improvement of digital railway radiocommunication system GSM-R]. Uspekhy sovremennoy radioelektroniky [Achievements of modern radioelectronics], no. 9, pp. 32–36. (In Russian)
6. *Vasiliev A. Y., Simakov A. V. & Gross V. A.* (2018) Noviyе trebovaniya i funktsii v zhiznennom tsikle MPSU ZhAT [New requirements and functions in the lifecycle of MPSU ZhAT (Microprocessor-based Control System Railway Automation and Telemechanics)]. Avtomatika, svyaz, informatika [Automation, telecommunication, information technology], no. 8, pp. 27–29. (In Russian)
7. *Darwish T. S. & Bakar K. A.* (2018) Fog Based Intelligent Transportation Big Data Analytics in The Internet of Vehicles Environment: Motivations, Architecture, Challenges and Critical Issues. IEEE Access, vol. 6, pp. 15679–15701.
8. *Shamanov V. I.* (2016) Obobshchennaya matematicheskaya model protsessа ekspluatatsii sistem avtomatiki i telemekhaniki [Generalized mathematical model of operation process of automation and remote control systems]. Avtomatika na transporte [Transport automation], vol. 2., no. 2, pp. 163–179. (In Russian)
9. *Shamanov V. I.* (2015) Upravleniye protsessom modernizatsii kompleksov sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Remodeling process control in the

- system complex of railway automation and telemechanics]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], vol. 1, no. 3, pp. 237–250. (In Russian)
10. *Fursov S. I., Vasiliev A. Y. & Pushkin N. V.* (2017) *Noviye resheniya v oblasti tekhnicheskoy diagnostiki i monitoringa* [New solutions in the sphere of engineering diagnostics and monitoring]. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, telecommunication, information technology], no. 10, pp. 8–10. (In Russian)
  11. *Hall C.* (2016) *Modern Signalling*. 5th Edition. UK, Shepperton, Ian Allan Ltd, 144 p.
  12. *Grover J. & Grover A.* (2015) *Wireless Sensor Network in Railway Signalling System*. 2015 5<sup>th</sup> International Conference on Communication Systems and Network Technologies, pp. 308–313.
  13. OpenSAFETY. URL: <http://open-safety.ru/> (accessed: 05.12.2019).
  14. *Domingues J. L. M.* (2004) Diagnostic levels in railway applications. *Signal Draht*, no. ½, pp. 31–34.
  15. *Hahanov V.* (2018) *Cyber Physical Computing for IoT-driven Services*. New York, Springer International Publishing AG, 279 p. DOI: 10.1007/978-3-319-54825-8.
  16. (2001) *Digital Video Broadcasting (DVB). Measurement guidelines for DVB*. ETSI. France, 175 p.
  17. *Peskov S. & Ishchenko A.* (2010) *Raschet veroyatnosti oshibky v tsifrovyykh kanalakh svyazy* [Error probability calculation in digital communication channels]. *TELE-SPUTNIK*, no. 11, pp. 70–75. (In Russian)
  18. *Flammini F.* (2012) *Railway safety, reliability and security: Technologies and Systems Engineering*. IGI Global, 462 p.
  19. (2005) *Rekomendatsii po vnedreniyu tsifrovoy tekhnologicheskoy radiosvyazy na zheleznodorozhnom transporte standarta GSM-R* [Guidelines on implementation of digital engineering radiocommunication on railway transport of GSM-R standard]. *Organizatsiya sotrudnichestva zheleznikh dorog (OSZhD)* [Organization for Railways Cooperation (OSZhD)], 48 p. (In Russian)
  20. *Guardian (Gardian) — vysokoskorostnoy radiomodem* [Guardian — highspeed radio modification]. URL: <http://www.dataradio.ru> (accessed: 05.12.2019). (In Russian)
  21. *Radiostantsiya (radiomodem) “MOST”* [Radio station (radio modification) «MOST»]. URL: <https://www.irz.ru> (accessed: 05.12.2019). (In Russian)
  22. (2019) *GOST 33894–2016. Sistema zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniky na zheleznodorozhnykh stantsiyakh. Trebovaniya bezopasnosti i metody kontrolya* [GOST 33894–2016. The system of railway automation and telemechanics on railway stations. Security regulations and control methods]. Moscow, Standartinfrom Publ., 32 p. (In Russian)
  23. *Bauer T. & Benito D. N.* (2018) *Digital Railway Stations for Increased Throughput and a Better Passenger Experience*. *Signal+Draht*, Iss. 7+8, pp. 6–12.
  24. *Efanov D. V.* (2016) *Funktsionalniy kontrol i monitoring ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniky. Monografiya* [Concurrent error detection and monitoring of railway automation and remote control facilities. Monograph]. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University], 171 p. (In Russian)
  25. *Stäubli R. & Gschwend P.* (2018) *Digital Signalling in the Simmental*. *Signal+Draht*, iss. 10, pp. 40–46.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Вал. В. Сапожниковым  
Поступила в редакцию 26.02.2020, принята к публикации 20.04.2020*

**КУЗЮКОВ Василий Александрович** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта  
e-mail: super-1990@yandex.ru

**ВАСИЛЬЕВ Антон Юрьевич** — старший преподаватель кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта; главный специалист ООО «Локотех-Сигнал» (Москва)  
e-mail: vasiliev.a.ur@gmail.com

**ШУШПАНОВ Роман Игоревич** — студент Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта  
e-mail: kolsovai@yandex.ru

© Кузюков В. А., Васильев А. Ю., Шушпанов Р. И., 2020

УДК 656.259

**В. В. Демьянов, д-р техн. наук**

**А. В. Пультяков, канд. техн. наук**

**М. Э. Скоробогатов**

**В. А. Алексеенко, канд. техн. наук**

*Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь»,*

*Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск*

## **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРОГОВОГО ЗНАЧЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ПОМЕХА ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ**

В среде MATLAB+Simulink на имитационном виртуальном стенде было проведено моделирование канала автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа при действии стационарных гармонических и случайных импульсных помех. Параметром, по которому оценивалось влияние отношения сигнал/помеха на формо-временные характеристики сигнала числового кода, выступала длительность первого интервала между импульсами в кодовой группе кодов «Ж» и «З». Нормативное значение этого интервала принято в пределах от 120 до 180 миллисекунд. По результатам моделирования были определены значения порогового отношения сигнал/помеха для заданных несущих частот при действии стационарной или случайной помехи. По полученным результатам построены графики зависимости длительности первого интервала между импульсами от порогового отношения сигнал/помеха для сигнала числового кода. Для верификации полученных результатов на основе экспериментальных данных проведен расчет наиболее вероятных интервалов пороговых значений отношения сигнал/помеха. Данные получены в процессе эксплуатации систем автоматической локомотивной сигнализации на горно-перевальных участках Восточно-Сибирской железной дороги, оборудованных электро-тягой переменного тока. Расчет выборочных характеристик генеральной совокупности наблюдений проводился для несущих частот 25 и 75 Гц при действии стационарных гармонических и случайных импульсных помех. Рассчитанные значения пороговых отношений сигнал/помеха, полученные по результатам моделирования, во всех случаях попали в наиболее вероятные интервалы пороговых значений, полученные по результатам экспериментальных измерений. Рассчитанные значения порогового значения отношения сигнал/помеха при действии случайной импульсной помехи оказались ниже, чем при действии стационарной гармонической помехи, что соответствует классическим представлениям о помехоустойчивости радиотехнических систем.

Автоматическая локомотивная сигнализация, сбои автоматической локомотивной сигнализации, статистические характеристики отношения сигнал/помеха, имитационный виртуальный стенд, стационарные и случайные помехи автоматической локомотивной сигнализации

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-2-149-164

### **Введение**

Рост объемов перевозок требует повышения провозной и пропускной способностей железных дорог, что, в свою очередь, требует модернизации технических устройств, применяемых на железнодорожном транспорте.

За обеспечение заданных значений провозной и пропускной способностей железных дорог при поддержании требуемого уровня безопасности движения отвечает технический комплекс интервального регулирования движения поездов (ИРДП), в состав которого входят следующие подсистемы:

- автоматическая блокировка;
- автоматическая локомотивная сигнализация (АЛС);
- электрическая централизация;
- диспетчерская централизация.

В указанном техническом комплексе системам АЛС принадлежит чрезвычайно важное место, поскольку с помощью средств АЛС обеспечивается повышение вероятности правильного восприятия сигнального показания локомотивного светофора, контроль бдительности машиниста, а также контроль скорости движения подвижного состава, что является необходимыми функциями для реализации автоведения поездов как в отечественных, так и в зарубежных системах [1–5].

Система АЛС представляет собой комплекс технических средств с определенными параметрами надежности. Работа устройств АЛС основана на передаче информации о состоянии впереди лежащих участков пути, которая поступает с напольных устройств через индуктивный канал передачи информации на локомотивные приемные устройства [1].

Сбой или отказ в работе любой из составных частей АЛС ведет к снижению провозной и пропускной способностей участков железных дорог, снижению участковой скорости и уровня безопасности движения. Так, за 2018 год было принято к учету 6960 сбоев в работе систем АЛС в границах Восточно-Сибирской железной дороги (ВСЖД). Известные результаты расследования сбоев АЛС говорят о том, что наибольшее мешающее воздействие на работу локомотивных устройств автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа (АЛСН) оказывают импульсные случайные и гармонические стационарные помехи [6–8].

Основное негативное влияние импульсных и гармонических помех на сигнал АЛСН сводится к искажению его временных и амплитудных характеристик, а именно — на недопустимое искажение длительности импульсов числового кода и интервалов между импульсами в кодовой группе. Это вызвано тем, что при действии импульсных и стационарных помех происходит «заполнение» интервалов между импульсами, что приводит к неправильной дешифрации сигналов числового кода в локомотивном дешифраторе и появлению сбоев в работе АЛСН [9–15].

Требуемый уровень устойчивости работы АЛСН может достигаться за счет использования более совершенных способов кодирования [16–19]. Для повышения пороговых значений сигнал/помеха устройств АЛС до нормативных значений необходимы новые технические решения на современной элементной базе [20, 21]. Для верификации предлагаемых решений широко используются методы статистического и имитационного моделирования [22–27].

Целью настоящей работы является разработка методики, позволяющей определить пороговые значения отношения сигнал/помеха, при которых с заданной вероятностью возникает сбой в работе локомотивных устройств АЛСН при воздействии стационарной гармонической или случайной импульсной помехи. Данная методика может быть использована как для совершенствования процесса технической диагностики комплекса АЛСН, так и для оценки эффективности новых технических решений, направленных на модернизацию локомотивных устройств АЛСН.

### **Определение порога помехоустойчивости АЛСН при искажениях временных параметров сигнала числового кода**

Основное проявление действия помех на работу локомотивных устройств АЛСН — искажение временных параметров сигнала числового кода. В связи с этим удобно оценить порог помехоустойчивости локомотивных устройств АЛСН, привязав отношение сигнал/помеха к предельно допустимым отклонениям временных параметров сигнала числового кода, выход за пределы которых влечет сбой в работе АЛСН. Определяющей становится длительность первого интервала между импульсами числового кода, измеренная на уровне 0,5 от амплитуды импульса (активная длительность импульса). Нормативная длительность данного интервала должна лежать в границах от 120 до 180 мс [1]. Исходя из этого, дальнейшая оценка пороговых значений отношения сигнал/помеха будет производиться на основе измерения отклонения данного параметра под воздействием помех в сравнении с указанными эталонными значениями.

Для выполнения исследований был разработан имитационный виртуальный стенд для проверки временных параметров числового кода при действии стационарных и случайных помех в среде MATLAB+Simulink [28]. Структурная схема виртуального стенда представленного на рисунке 1 и включает в себя:

- блок «Z 25 Hz» — модель источника сигнала числового кода «З» с временными параметрами, соответствующими кодовому путевому трансмиттеру КПТ-515;

- блок «FL-25/75M» — модель локомотивного фильтра ФЛ-25/75М, настроенного на полосу пропускания от 18 до 32 Гц;

- блок «Amp detektor» — модель усилителя УК25/75, на выходе которого формируются импульсы постоянного тока;

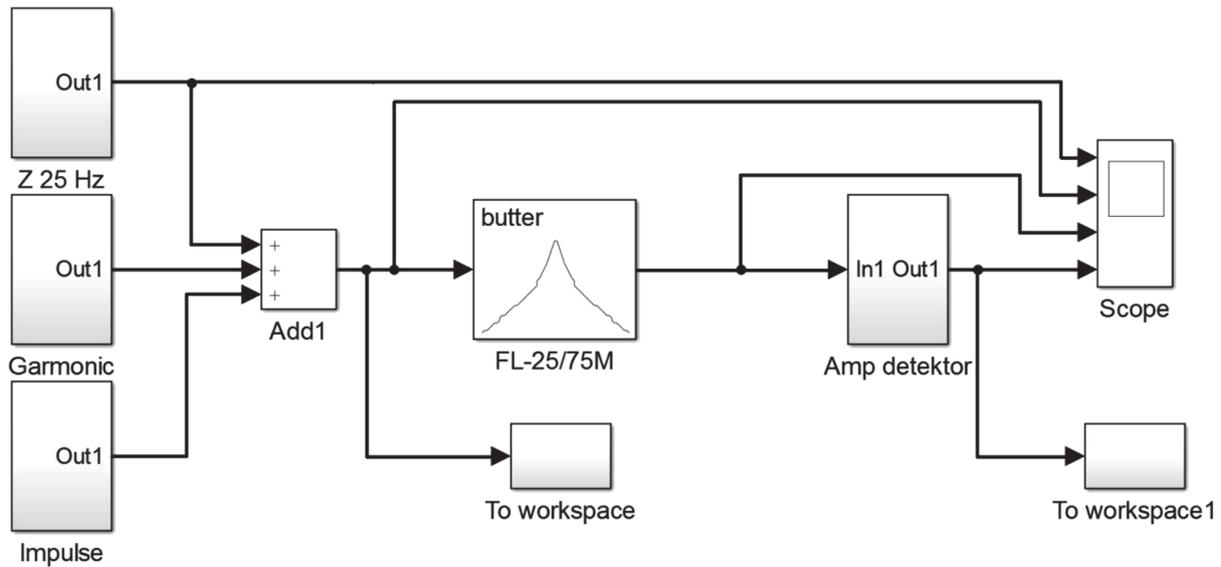
- блок «Scope» — многоканальный осциллограф;

- блок «To workspace» — предназначен для сохранения выходного сигнала блока «Amp detektor» с целью его последующей обработки;

- «Garmonic» — имитационная модель стационарной гармонической помехи;

- «Impulse» — имитационная модель случайной импульсной помехи с частотой;

- «Add1» — блок, реализующий математическую операцию сложения.



**Рис. 1.** Имитационный стенд для измерения временных параметров числового кода

Математическая модель стационарной гармонической помехи описывается формулой 1 и представляет собой сумму 1, 3, 5, 7, 9 и 11 гармоник обратного тягового тока. Выбор именно этих гармоник обусловлен тем, что в них сконцентрировано до 95 % энергии ОТГ. Амплитуда каждой гармоники определяется в зависимости от требуемого значения отношения сигнал/помеха:

$$U_{\text{СТ}}(t) = \sum_{i=0}^5 a_i \cdot e^{-(1+2i)} \cdot \cos((1+2i)\omega t + \varphi_i), \quad (1)$$

где  $a_i$  — амплитуда  $i$ -й гармоники, полученная по результатам имитационного моделирования в программном комплексе «Кортес»;  $\varphi_i$  — начальная фаза  $i$ -ой гармоники, изменяющаяся по нормальному закону распределения в диапазоне от 0 до  $2\pi$ .

Математическая модель случайной импульсной помехи описывается формулой 2. Данная помеха представляет собой самый неблагоприятный вариант, когда она попадает на интервал между импульсами:

$$U_{\text{СИ}}(t) = \sum_{j=0}^{20} a_j \cdot \left[ 1 \left( t - 1,6k - 0,38 + \frac{0,12}{2} \right) - \right. \\ \left. - 1 \left( t - 1,6k - 0,38 - \frac{0,12}{2} \right) \right] \cdot \cos(2\pi j t + \varphi_j), \quad (2)$$

где  $a_j$  — амплитуда  $i$ -й гармоники по результатам натурных измерений во время эксплуатации;  $\varphi_j$  — начальная фаза  $i$ -й гармоники, изменяющаяся по нормальному закону распределения в диапазоне от 0 до  $2\pi$ ;  $j$  — частота  $j$ -й гармоники в Гц.

Технологический алгоритм работы имитационного стенда заключается в следующем.

1. Задать несущую частоту полезного сигнала (может принимать значения 25 или 75 Гц), выбрать тип кодовой посылки («Ж» или «З») и задать значение отношения сигнал/помеха равным 1.

2. С помощью имитационного стенда измерить длительность первого интервала между импульсами при заданных параметрах.

3. Уменьшить значение отношения сигнал/помеха на 0,1 и повторить измерение длительности первого интервала. Данный этап следует повторять до достижения значения отношения сигнал/помеха меньше или равно 0,1.

4. По полученным значениям построить зависимость длительности первого интервала от величины отношения сигнал/помеха и по полученному графику определить пороговые значения данного отношения.

Блок-схема алгоритма работы имитационного стенда представлена на рисунке 2. Предполагается использование данного алгоритма в режиме постобработки данных. Алгоритм реализован в программной среде MATLAB+Simulink и позволяет оценить длительность первого интервала между импульсами кодовой посылки в зависимости от величины отношения сигнал/помеха на входе локомотивного фильтра.

Для проверки работоспособности стенда первоначально было проведено моделирование полезного сигнала числового кода «З» (рис. 3, а) без учета влияния каких-либо помех. Данный сигнал задан в виде радиоимпульсов с временными

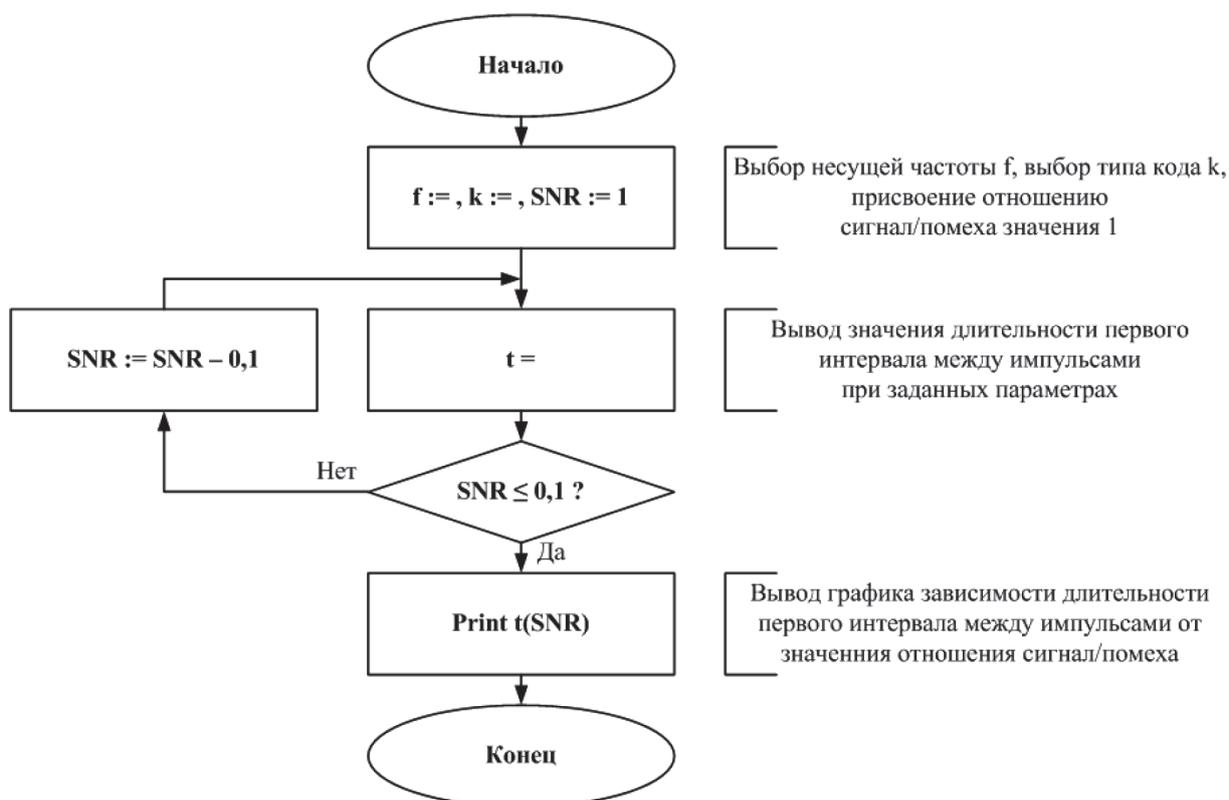
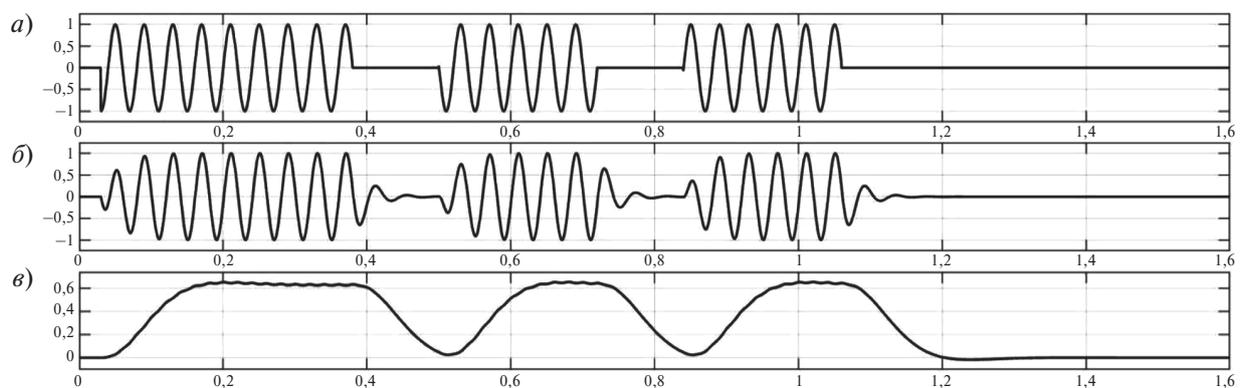


Рис. 2. Алгоритм работы имитационного стенда

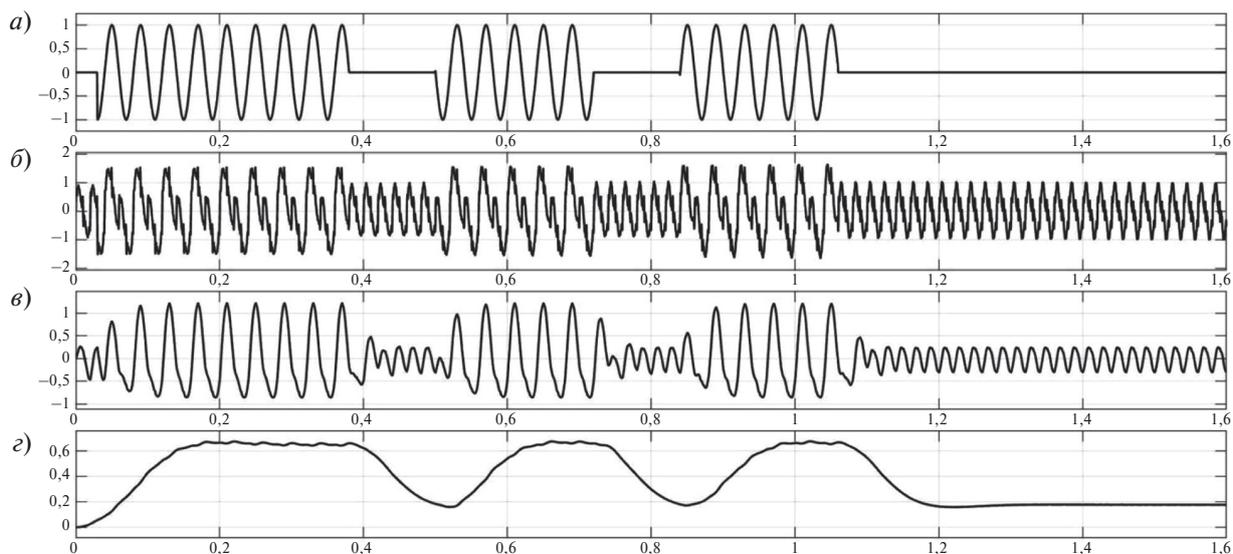
параметрами КПТ-515, амплитуда сигнала составляет 1 В. После прохождения сигнала через модель локомотивного фильтра (рис. 3, б) происходят его амплитудные искажения, но импульсы переменного тока тем не менее имеют четкую форму и между ними хорошо видны интервалы. На выходе модели локомотивного усилителя (рис. 3, в) сигнал проходит процедуру амплитудного детектирования; на осциллограмме можно увидеть огибающую полезного сигнала с явно видимыми импульсами постоянного тока. Длительность первого интервала составляет 125,5 мс. Поскольку данная величина находится в границах требуемых значений, можно сделать вывод о том, что предложенный имитационный виртуальный стенд для проверки временных параметров числового кода является работоспособным.

С помощью имитационного стенда был произведен ряд экспериментальных моделирований при разных значениях отношений сигнал/помеха. Целью этого этапа исследований стала собственно оценка порогового отношения сигнал/помеха, при котором возникают недопустимые искажения временных параметров сигнала числового кода в условиях воздействия стационарной или случайной помехи с заданными характеристиками.

В качестве полезного сигнала в данной модели используется код «З» с несущей частотой 25 Гц (рис. 4, а), а источником стационарной гармонической помехи стал блок «Garmonic». На осциллограмме, где представлена смесь полезного сигнала со стационарной гармонической помехой (рис. 4, б), прослеживаются импульсы числового кода, однако видно, что произошло заполнение интервалов между ними стационарной помехой. После фильтрации в блоке локомотивного фильтра (рис. 4, в) импульсы полезного сигнала видны в более явном виде, но интервалы между ними заполнены гармонической помехой. После амплитудного детектирования (рис. 4, г) четко прослеживаются импульсы постоянного тока, однако из-за заполнения интервалов между импульсами полезного сигнала гармонической помехой в составе детектированного сигнала



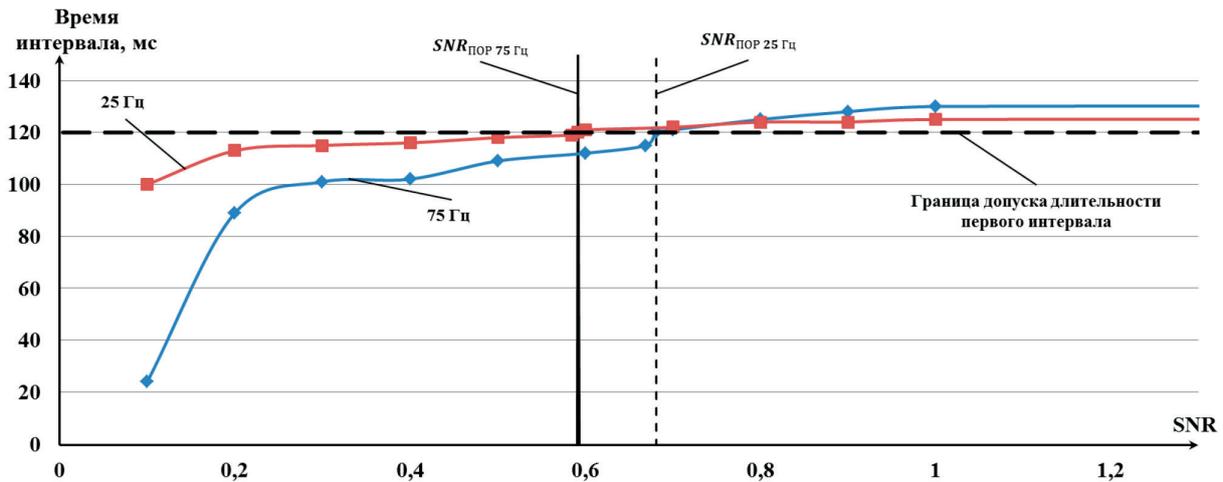
**Рис. 3.** Осциллограммы сигнала числового кода «З»: а — на выходе локомотивных катушек; б — на выходе локомотивного фильтра; в — на выходе локомотивного усилителя-детектора



**Рис. 4.** Осциллограммы сигнала числового кода «3»: *а* — без искажений; *б* — при наложении стационарной гармонической помехи; *в* — на выходе локомотивного фильтра; *г* — на выходе локомотивного усилителя-детектора

ла появляется постоянная составляющая. При достижении этой паразитной постоянной составляющей уровня срабатывания реле счетчиков импульсов релейного дешифратора произойдет сбой в работе приемных локомотивных устройств АЛСН, поскольку интервалы между импульсами искажаются и перестают надежно различаться. В представленном на рисунке 4 случае длительность первого интервала между импульсами составила 115 мс, что на 5 мс меньше нормативного значения, т. е. в данной ситуации можно ожидать сбоя в работе локомотивных устройств АЛСН.

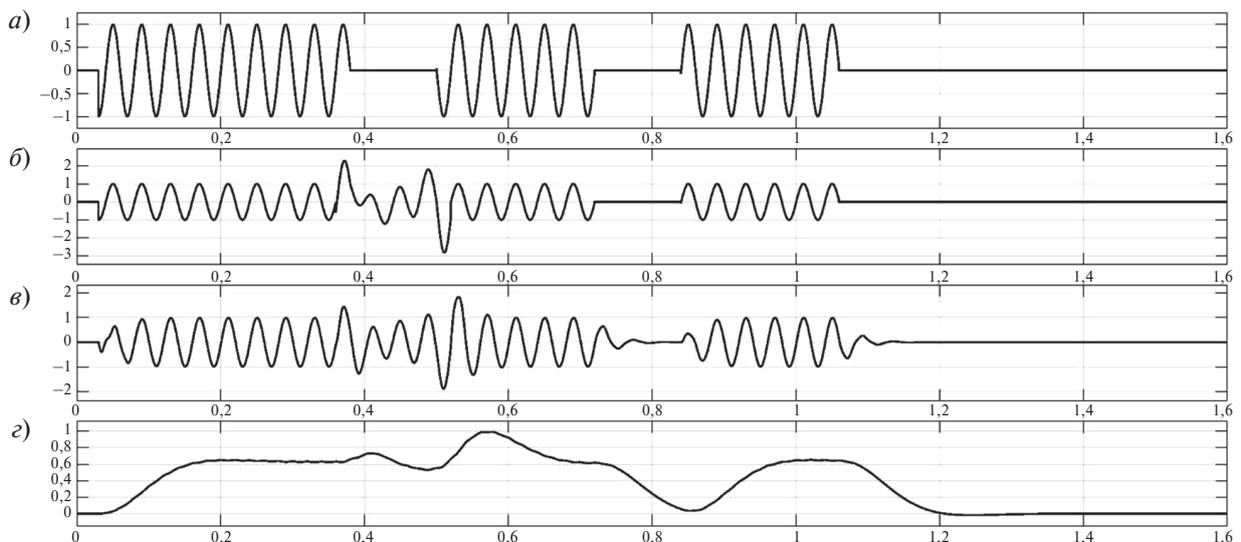
Подобным образом был проведен ряд экспериментальных моделирований с разным отношением сигнал/помеха для несущей частоты полезного сигнала 25 Гц, а также 75 Гц. На рисунке 5 дано обобщение результатов этих экспериментов в виде зависимости длительности первого интервала между импульсами от значения отношения сигнал/помеха. Красным цветом показана зависимость при действии стационарной гармонической помехи на частоте несущего сигнала 25 Гц, а синим — то же самое на частоте несущего сигнала числового кода 75 Гц. На рисунке 5 также указаны пороговые значения отношения сигнал/помеха, при которых наблюдается недопустимое искажение временных параметров сигнала числового кода: 0,681 для частоты 25 Гц (показано штриховой линией) и 0,592 для частоты 75 Гц (показано сплошной линией). Можно видеть, что система АЛСН при несущей частоте 75 Гц имеет более высокую помехозащищенность, поскольку значение порогового отношения сигнал/помеха в таком случае меньше, чем у сигнала при несущей частоте 25 Гц. Исходя из этого, одним из способов снижения количества сбоев в работе системы АЛСН может выступать переход на несущую частоту 75 Гц.



**Рис. 5.** Зависимость длительности первого интервала между импульсами кода «3» от отношения сигнал/помеха при действии стационарной гармонической помехи

Для выполнения аналогичного исследования влияния случайных импульсных помех на длительность интервала между импульсами сигнала числового кода в представленной имитационной модели использовался блок Impulse. Моделирование данной помехи проводилось для двух несущих частот полезного сигнала (25 и 75 Гц).

В качестве полезного сигнала в данной модели также используется код «3» с несущей частотой 25 Гц (рис. 6, а). На осциллограмме смеси полезного сигнала со случайной импульсной помехой (рис. 6, б) видно, что произошло заполнение интервала между импульсами случайной помехой. После фильтрации в локомотивном фильтре (рис. 6, в) амплитуда помехи в интервале между



**Рис. 6.** Осциллограммы сигнала числового кода «3»: а — без искажений; б — при наложении случайной импульсной помехи; в — на выходе локомотивного фильтра; г — на выходе локомотивного усилителя-детектора

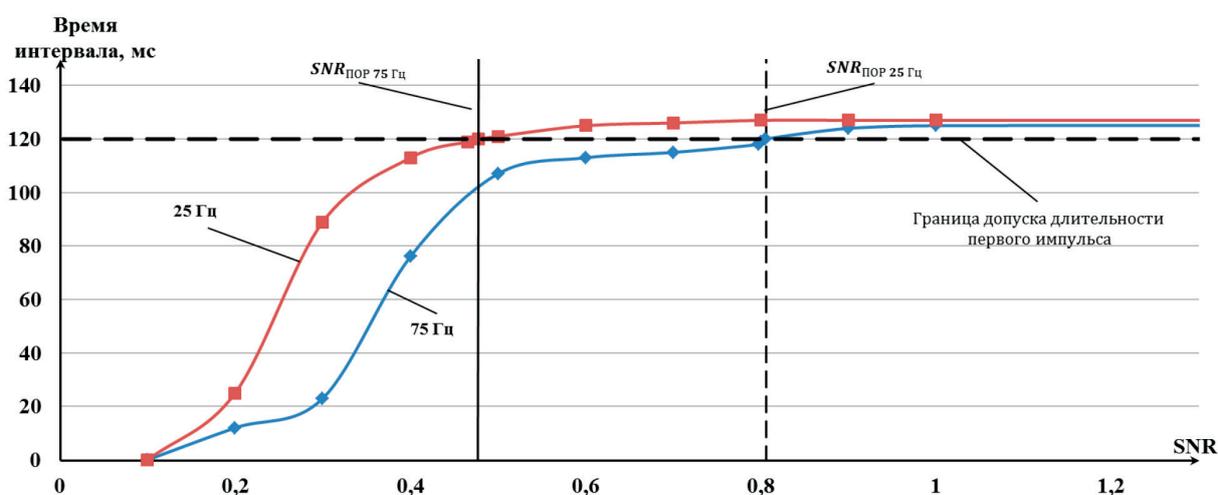
первыми импульсами сохраняется и размывает интервал между импульсами числового кода. После амплитудного детектирования (рис 6, з) интервал между первыми импульсами отсутствует, т. к. он был целиком заполнен соразмерной помехой. Такая ситуация приведет к срыву кодирования данной кодовой посылки.

По результатам имитационного моделирования аналогичным образом, как рассмотрено выше, была получена характеристика зависимости длительности первого интервала от отношения сигнал/помеха (см. рис. 7).

Красным цветом на рисунке 7 показана зависимость длительности первого интервала между импульсами при действии случайной импульсной помехи на частоте несущего сигнала 25 Гц, а синим — на частоте 75 Гц. Можно видеть, что пороговые значения данного отношения составляют 0,805 для частоты 25 Гц (показано штриховой линией) и 0,478 для частоты 75 Гц (показано сплошной линией). Из представленных на рисунке 6 результатов можно сделать однозначный вывод: сигнал числового кода при несущей частоте 75 Гц имеет намного больший запас помехоустойчивости по сравнению с частотой 25 Гц.

### Практическая верификация рассчитанных значений порогового отношения сигнал/помеха

Верификация результатов, полученных по представленной методике, проводилась с помощью пороговых значений отношения сигнал/помеха, полученных по результатам обработки измерений сигналов на входе локомотивного фильтра АЛСН. Измерения проводились при движении поездов разного веса в различных погодных условиях. Генеральная совокупность наблюдений охватывает период измерений с 2014 по 2018 годы и содержит более 50 серий измерений, проведенных во время экспериментальных поездок.



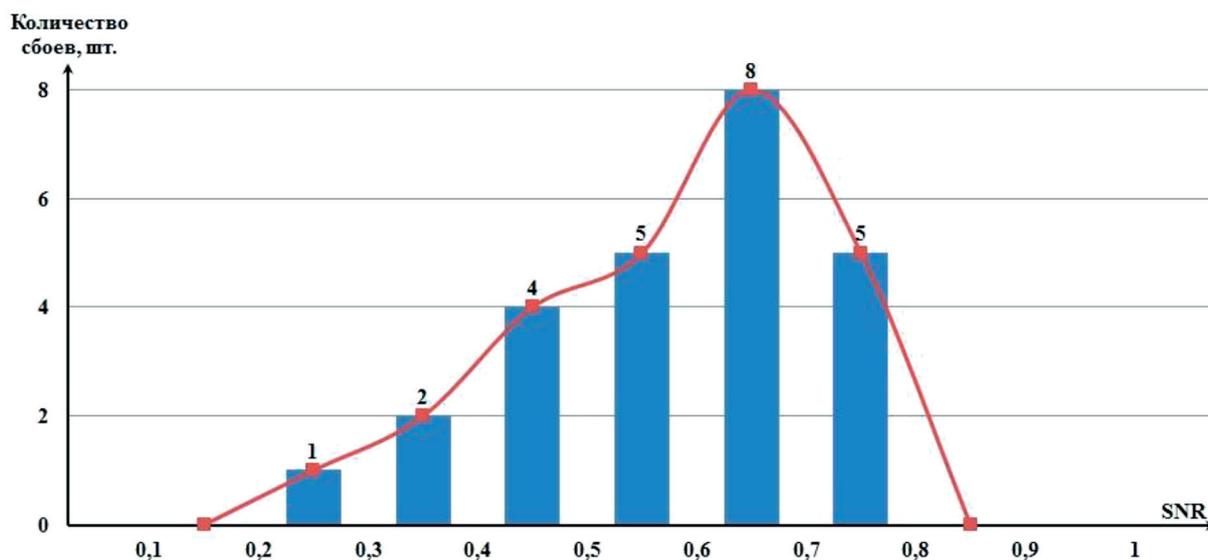
**Рис. 7.** Зависимость длительности первого интервала между импульсами от отношения сигнал/помеха при действии случайной импульсной помехи

Отдельно оценивалось влияние стационарной гармонической помехи на полезный сигнал АЛСН с несущей частотой 25 и 75 Гц. Для определения значений отношения сигнал/помеха было проанализировано по 25 случаев зафиксированных сбоев в работе АЛСН, вызванных асимметрией обратного тягового тока для каждой из указанных несущих частот. Для каждого такого сбоя был определен уровень полезного сигнала и уровень стационарных гармонических помех.

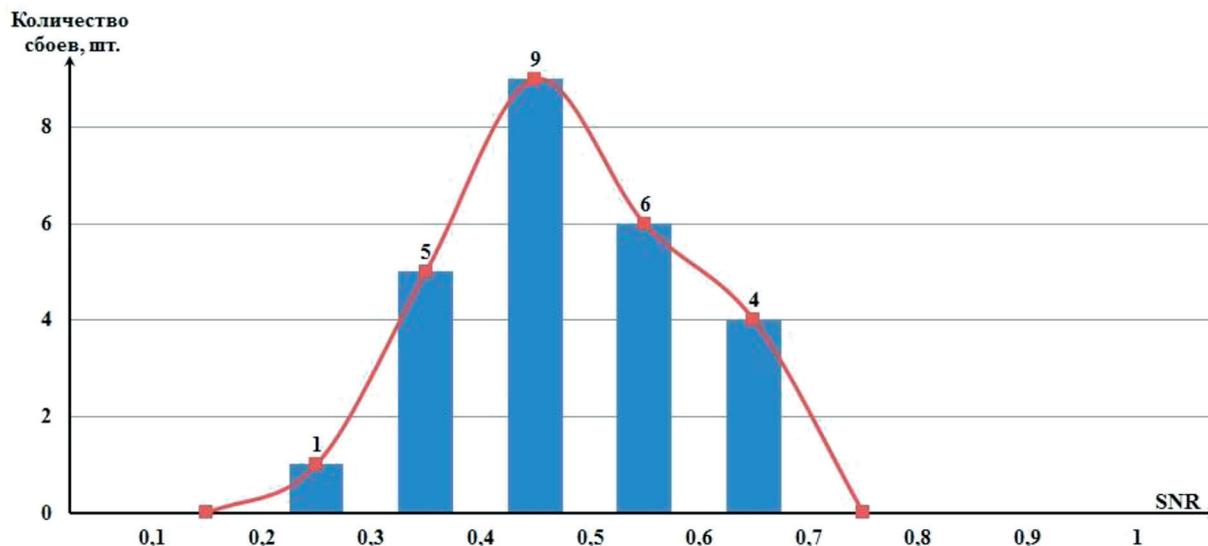
Расчет порогового отношения сигнал/помеха проводился следующим образом. На первом этапе были выбраны те фрагменты записей экспериментальных поездок, при которых регистрировался сбой в работе системы АЛСН. Затем проводился анализ спектра полученных фрагментов записи смеси сигнал/помеха с целью выделения значений гармоник полезного сигнала, а также действующей помехи. На заключительном этапе производился расчет отношения сигнал/помеха, где интенсивность сигнала и помехи представлена с помощью среднеквадратических значений полезного сигнала и действующей помехи.

На основании данной методики для каждого сбоя был рассчитан наиболее вероятный интервал для порогового значения отношения сигнал/помеха (рис. 8).

Из сравнения результатов имитационного моделирования и практических измерений видно, что значения порогового отношения сигнал/помеха при действии стационарной гармонической помехи, полученные при помощи имитационного моделирования сигнала числового кода (рис. 5), приблизительно соответствуют наиболее вероятному интервалу практически измеренного отношения сигнал/помеха в пределах 0,6–0,7 (рис. 8). Такое совпадение позволяет сделать вывод о том, что представленная методика является работоспособной.



**Рис. 8.** Распределение значений порогового отношения сигнал/помеха при действии стационарной гармонической помехи



**Рис. 9.** Распределение значений порогового отношения сигнал/помеха при действии стационарной гармонической помехи

Аналогичным образом рассчитаны статистические параметры реального отношения сигнал/помеха для случаев сбоев в работе устройств АЛСН при действии случайной импульсной помехи на несущих частотах АЛСН 25 и 75 Гц. Результаты расчетов для несущей частоты 75 Гц представлены на рисунке 9.

Как видно из рисунка 9, наиболее вероятный интервал значений порогового отношения сигнал/помеха под действием случайной импульсной помехи при частоте полезного сигнала 75 Гц лежит в пределах от 0,4 до 0,5, что также соответствует рассчитанному по методике пороговому значению данного отношения (рис. 7).

## Заключение

В статье предложена методика, с помощью которой можно определить пороговые значения отношения сигнал/помеха, при превышении которых наиболее вероятны сбои в работе системы АЛСН.

По представленной методике с помощью имитационного виртуального стенда был проведен расчет временных параметров числового кода в зависимости от значения отношения сигнал/помеха. Результаты анализа показали, что наибольшую защищенность от стационарных и случайных импульсных помех имеет сигнал числового кода на несущей частоте 75 Гц.

Для верификации полученных пороговых значений отношения сигнал/помеха были обработаны данные в канале АЛСН, полученные во время экспериментальных измерений на горно-перевальных участках ВСЖД. Верификация проводилась для стационарной гармонической помехи и отдельно для случайной импульсной помехи. Пороговые значения отношения сигнал/помеха, полученные по разработанной методике, во всех случаях попали в наиболее вероятные интервалы, рассчитанные по результатам экспериментальных измерений.

Предложенная методика и имитационный стенд для проверки временных параметров числового кода могут быть эффективно использованы для контрольно-поверочных испытаний аппаратуры АЛСН в лабораторных условиях.

### Библиографический список

1. *Брылеев А. М.* Автоматическая локомотивная сигнализация и авторегулировка / А. М. Брылеев, О. Поупе, В. С. Дмитриев и др. — М.: Транспорт, 1981. — 320 с.
2. *Railway Operation and Control.* 3rd edition. — Washington: VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace, 2014. — 284 p.
3. *Sauer C.* Gleisstromkreise — ein veraltetes oder aktuelles Mittel zur Gleisfreimtding / C. Sauer // *Eisenbahningenieur.* — 2014. — N 7. — P. 25–30.
4. *Tasler G.* The introduction of highly automatic operation — towards fully automatic train operation / G. Tasler, V. Knollmann // *Signal und Draht.* — 2018. — N 6. — P. 64–68.
5. *Carrouée C.* Integration of Automatic Train Warning into the best interlocking simulation / C. Carrouée, G. Rege, I. Hrivnák, K. Verheyden, M. Wilmart // *Signal und Draht.* — 2014. — N 8. — P. 49–52.
6. *Шаманов В. И.* Электромагнитная совместимость систем железнодорожной автоматики и телемеханики / В. И. Шаманов. — М.: «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. — 244 с.
7. *Леушин В. Б.* Особенности каналов автоматической локомотивной сигнализации магистральных железных дорог / В. Б. Леушин, Р. Р. Юсупов. — Самара: СамГУПС, 2007. — 115 с.
8. *Ogunsola A.* Electromagnetic. Compatibility in Railways: analysis and management / A. Ogunsola, A. Mariscotti. — Berlin: Springer, 2013. — 600 p.
9. *Пультяков А. В.* Анализ влияния неравномерной намагниченности рельсов на устойчивость работы АЛСН / А. В. Пультяков, Ю. А. Трофимов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* — 2011. — № 1 (30). — С. 206–210.
10. *Пультяков А. В.* Системный анализ устойчивости работы систем автоматической локомотивной сигнализации / А. В. Пультяков, М. Э. Скоробогатов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* — 2018. — Т. 57, № 1. — С. 79–89.
11. *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.
12. *Воротилкин А. В.* Проблемы влияния тяжеловесных поездов на приборы безопасности при электротяге переменного тока / А. В. Воротилкин, А. П. Хоменко, В. И. Шаманов // *Железнодорожный транспорт.* — 2006. — № 10. — С. 17–21.
13. *Шевердин И. Н.* Влияние тяжеловесных поездов на рельсовые цепи и АЛСН / И. Н. Шевердин, В. И. Шаманов, Ю. А. Трофимов, А. В. Пультяков // *Автоматика, связь, информатика.* — 2006. — № 10. — С. 16–19.
14. *Леушин В. Б.* Помехоустойчивость приемников АЛСН при приеме кодовых комбинаций в условиях действия флуктуационных помех / В. Б. Леушин, Р. Р. Юсупов, Э. К. Блачев, Н. Р. Барашкова // *Вестник транспорта Поволжья.* — 2009. — № 3 (19). — С. 39–41.
15. *Шаманов В. И.* Защищенность локомотивных приемников АЛС от помех / В. И. Шаманов // *Автоматика, связь, информатика.* — 2013. — № 4. — С. 14–19.
16. *Сапожников В. В.* Исследование свойств кодов Хэмминга и их модификаций в системах функционального контроля / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // *Автоматика на транспорте.* — 2015. — Т. 1, № 3. — С. 311–337.

17. *McCluskey E. J.* Logic Design Principles: With Emphasis on Testable Semicustom Circuits / E. J. McCluskey. — New Jersey: Prentice Hall PTR, 1986. — 549 p.
18. *Fujiwara E.* Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications / E. Fujiwara. — New York: John Wiley & Sons, 2006. — 720 p.
19. *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.
20. *Скоробогатов М. Э.* Узкополосный цифровой фильтр для выделения сигналов АЛСН в условиях действия интенсивных помех / Скоробогатов М. Э. // Транспорт Урала. — 2019. — № 4 (63). — С. 20–27.
21. *Smith S. W.* Digital signal processing: a practical guide for engineers and scientists / S. W. Smith. — USA: Newnes, 2013. — 650 p.
22. *Haykin S.* Adaptive filter theory: 4 edition / S. Haykin. — New Jersey: Prentice Hall, 2001. — 936 p.
23. *Бестемьянов П. Ф.* Методика статистического моделирования электромагнитных помех в каналах автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте / П. Ф. Бестемьянов // Электротехника. — 2015. — № 9. — С. 2–8.
24. *Присухина И. В.* Имитационная модель электрического кодового сигнала в российских системах интервального регулирования движения поездов на основе рельсовых цепей / И. В. Присухина, Д. В. Борисенко, С. А. Лунев // Труды СПИИРАН. — 2019. — № 5 (18). — С. 1212–1238.
25. *Засов В. А.* Компенсация помех в приемниках сигналов автоматической локомотивной сигнализации / В. А. Засов // Автоматика на транспорте. — 2019. — № 1. — С. 32–44.
26. *Шаманов В. И.* Моделирование генерации помех токами рельсовой тяговой сети / В. И. Шаманов // Автоматика, связь, информатика. — 2014. — № 10. — С. 5–9.
27. *Авсиевич А. В.* Имитационная модель АЛСН для исследования надежности приема кодовых комбинаций в пакете MATLAB/SIMULINK / А. В. Авсиевич, А. Р. Гумаров // Мехатроника, автоматизация и управление на транспорте: Материалы Всероссийской науч.-практ. конференции. — Самара: СамГУПС, 2019. — С. 11–15.
28. *Дьяконов В. П.* MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров / В. П. Дьяконов. — М.: ДМК Пресс, 2011. — 976 с.

**V. V. Demyanov**

**A. V. Puptyakov**

**M. E. Skorobogatov**

**V. A. Alekseenko**

*Chair of "Automation, Remote Control and Telecommunication",  
Irkutsk State Transport University, Irkutsk*

## **METHOD OF THRESHOLD DETERMINATION OF SIGNAL-TO-NOISE RATIO FOR AUTOMATIC CAB SIGNALING SYSTEMS**

Modeling of a continuous-type automatic locomotive signaling channel was conducted in the environment of MATLAB+Simulink on a simulation virtual test desk under stationary harmonic and random pulse noises. The size of the first interval between pulses in the "J" and "Z" code group was the

parameter for the evaluation of signal-to-noise ratio influence on shape-time signal characteristics of the numerical code. Standard value of this interval is accepted within the limits of 120 to 180 milliseconds (ms). According to the results of modeling threshold value of signal-to-noise ratio was determined for the given carrier frequencies under the influence of stationary or random noise. Dependency graphs of the size of the first interval between pulses and threshold value of signal-to-noise ratio for the numerical code signal were designed by the obtained results. In order to verify the obtained results most probable intervals of threshold value of signal-to-noise ratio were calculated on the basis of experimental data. The data in question was received during automatic cab signaling systems operation at the mountain pass areas of the East Siberian Railway equipped with alternate-current electric traction. Calculation of sample characteristics of the general population of observations was conducted for carrier frequencies of 25 and 75 Hz under the influence of stationary harmonic and random pulse noises. Calculated threshold values of signal-to-noise ratio, obtained by the results of modeling, made it into most probable intervals of threshold values, obtained by the results of experimental observations, in all cases. Calculated threshold values of signal-to-noise ratio under the influence of random pulse noise were lower compared to those under the influence of stationary harmonic noise; the latter agrees with the classical concept of jamming resistance of radio engineering systems.

Automatic cab signaling, automatic cab signaling failure, statistical characteristics of signal-to-noise ratio, simulation virtual test desk, stationary and random noise of automatic cab signaling

## References

1. *Brylev A. M., Poype O., Dmitriev V. S. et al.* (1981) *Avtomaticheskaya lokomotivnaya signalizatsiya i avtoregulirovka* [Automatic cab signaling and automatic control]. Moscow, Transport Publ., 320 p. (In Russian)
2. (2014) *Railway Operation and Control*. 3rd edition. Washington, VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace, 284 p.
3. *Sauer C.* (2014) Gleisstromkreise — ein veraltetes oder aktuelles Mittel zur Gleisfreimtdling. *Eisenbahningenieur*, no. 7, pp. 25–30.
4. *Tasler G. & Knollmann V.* (2018) The introduction of highly automatic operation — towards fully automatic train operation. *Signal und Draht*, no. 6, pp. 64–68.
5. *Carrouée C., Rege G., Hrivnák I., Verheyden K. & Wilmart M.* (2014) Integration of Automatic Train Warning into the best interlocking simulation. *Signal und Draht*, no. 8, pp. 49–52.
6. *Shamanov V. I.* (2013) *Elektromagnitnaya sovmestimost system zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki* [Electromagnetic compatibility of railway automation and remote control systems]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Training and Methodology Centre for Railway Transport] Publ., 244 p. (In Russian)
7. *Leushin V. B. & Yusupov R. R.* (2007) *Osobennosty kanalov avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii magistralnykh zheleznykh dorog* [Specificities of automatic cab signaling channels for mainline railway]. Samara, SamGUPS [Samara State Transport University] Publ., 115 p. (In Russian)
8. *Ogunsola A. & Mariscotti A.* (2013) *Electromagnetic. Compatibility in Railways: analysis and management*. Berlin, Springer Publ., 600 p.
9. *Pulyakov A. V. & Trofimov Yu. A.* (2011) *Analiz vliyaniya neravnomernoy namagnichenosti relsov na ustoichivost raboty ALSN* [Analysis of uneven rail magnetization influence on operation stability of continuous automatic cab signaling]. *Sovremenniye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye* [Modern technologies. Systems analysis. Simulation], no. 1 (30), pp. 206–210. (In Russian)

10. *Pulyakov A. V. & Skorobogatov M. E.* (2018) Sistemniy analiz ustoichivosty raboty sistem avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii [System analysis of operation stability of automatic cab signaling systems]. *Sovremenniytehnologii. Sistemniy analiz. Modelirovaniye* [Modern technologies. Systems analysis. Simulation], vol. 57, no. 1, pp. 79–89. (In Russian)
11. *Shamanov V. I., Pulyakov A. V. & Trofimov Yu. A.* (2009) Vliyaniye usloviy ekspluatatsii na ustoichivost raboty ALSN [The influence of service conditions on continuous automatic cab signaling operation stability]. *Zheleznodorozhniy transport* [Railway transport], no. 5, pp. 46–50. (In Russian)
12. *Vorotilkin A. V., Khomenko A. P. & Shamanov V. I.* (2006) Problemy vliyaniya tyazhelovesnykh poezdov na pribory bezopasnosti pry elektrotzyage peremennogo toka [Problems of influence of heavy trains on security devices during alternate current traction]. *Zheleznodorozhniy transport* [Railway transport], no. 10, pp. 17–21. (In Russian)
13. *Sheverdin I. N., Shamanov V. I., Trofimov Yu. A. & Pulyakov A. V.* (2006) Vliyaniye tyazhelovesnykh poezdov na relsoviye tsepy i ALSN [Influence of heavy trains on track circuits and continuous automatic cab signaling]. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, telecommunication, information technology], no. 10, pp. 16–19. (In Russian)
14. *Leushin V. B., Yusupov R. R., Blachev E. K. & Barashkova N. R.* (2009) Pomekhoustoichivost prijemnikov ALSN pry prijeme kodovykh kombinatsiy v usloviyakh deistviya fluktuatsionnykh pomekh [Jamming resistance of continuous automatic cab signaling receivers when receiving code combinations under fluctuation noise]. *Vestnik transporta Povolzhya* [Bulletin of the Volga region transport], no. 3 (19), pp. 39–41. (In Russian)
15. *Shamanov V. I.* (2013) Zashchishchennost lokomotivnykh priemnikov ALS ot pomekh [Jamming resistance of automatic locomotive signaling system receivers]. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, telecommunication, information technology], no. 4, pp. 14–19. (In Russian)
16. *Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. & Efanov D. V.* (2015) Issledovaniye svoystv kodov Khemminga i ikh modifikatsiy v sistemakh funktsionalnogo kontrolya [The study of properties of Hamming codes and their modifications in concurrent error detection systems]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], vol. 1, no. 3, pp. 311–337. (In Russian)
17. *McCluskey E. J.* (1986) Logic Design Principles: With Emphasis on Testable Semicustom Circuits. New Jersey, Prentice Hall PTR Publ., 549 p.
18. *Fujiwara E.* (2006) Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. New York, John Wiley & Sons Publ., 720 p.
19. *Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E. & Marienfeld D.* (2008) New Methods of Concurrent Checking. Edition 1. Dordrecht, Springer Science+Business Media B. V. Publ., 184 p.
20. *Skorobogatov M. E.* (2019) Uzkopolosniy tsifrovoy filtr dlya vydeleniya signalov ALSN v usloviyakh deistviya intensivnykh pomekh [Narrow-band digital filter for CACS signal extraction under high-intensity noise]. *Transport Urala* [The Ural Transport], no. 4 (63), pp. 20–27. (In Russian)
21. *Smith S. W.* (2013) *Digital signal processing*. A practical guide for engineers and scientists. USA, Newnes Publ., 650 p.
22. *Haykin S.* (2001) Adaptive filter theory. 4 edition. New Jersey, Prentice Hall Publ., 936 p.
23. *Bestemyanov P. F.* (2015) Metodika statisticheskogo modelirovaniya elektromagnitnykh pomekh v kanalakh avtomatiki i telemekhaniki na zheleznodorozhnom transporte [Statistical modeling of electromagnetic interference in channels of railway automation and remote control]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], no. 9, pp. 2–8. (In Russian)

24. *Prisukhina I. V., Borisenko D. V. & Lunjev S. A.* (2019) Imitatsionnaya model elektricheskogo kodovogo signala v rossiyskikh sistemakh intervalnogo regulirovaniya dvizheniya poezdov na osnove relsovykh tsepey [Simulation model of an electric code signal in Russian train separation systems based on rail circuits]. *Trudy SPIIRAN [Proceedings of St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences]*, no. 5 (18), pp. 1212–1238. (In Russian)
25. *Zasov V. A.* (2019) Kompensatsiya pomekh v prijemnikakh signalov avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii [Noise compensation in automatic cab signaling receivers]. *Avtomatika na transporte [Transport automation]*, no. 1, pp. 32–44. (In Russian)
26. *Shamanov V. I.* (2014) Modelirovaniye generatsii pomekh tokamy relsovoy tyagovoy sety [Noise generation modeling by current of the railway electric traction network]. *Avtomatika, svyaz, informatika [Automation, telecommunication, information technology]*, no. 10, pp. 5–9. (In Russian)
27. *Avsievich A. V. & Gumarov A. R.* (2019) Imitatsionnaya model ALSN dlya issledovaniya nadezhnosti priyema kodovykh kombinatsiy v pakete MATLAB/SIMULINK [CAC simulation model for the study of receiving reliability of code combinations in MATLAB/SIMULINK pack]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravleniye na transporte [Transport mechatronics, automation and control]*. Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Proceedings of All-Russian research and training conference]. Samara, SamGUPS [Samara State Transport University] Publ., pp. 11–15. (In Russian)
28. *Dyakonov V. P.* (2011) MATLAB i SIMULINK dlya radioinzhenerov [MATLAB and SIMULINK for radio engineers]. Moscow, DMK Press, 976 p. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии В. И. Шамановым  
Поступила в редакцию 16.02.2020, принята к публикации 10.03.2020*

*ДЕМЬЯНОВ Владислав Владимирович* — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» Иркутского государственного университета путей сообщения;  
e-mail: sword1971@yandex.ru

*ПУЛЬТЯКОВ Андрей Владимирович* — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматика, телемеханика и связь» Иркутского государственного университета путей сообщения;  
e-mail: pultyakov@irgups.ru

*СКОРОБОГАТОВ Максим Эдуардович* — старший преподаватель кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» Иркутского государственного университета путей сообщения;  
e-mail: skor\_maxim@mail.ru

*АЛЕКСЕЕНКО Владимир Александрович* — кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» Иркутского государственного университета путей сообщения;  
e-mail: bezvoprosov03@mail.ru

© Демьянов В. В., Пультяков А. В.,  
Скоробогатов М. Э., Алексеенко В. А., 2020

УДК 656.22

**А. Г. Котенко, д-р техн. наук**  
**О. В. Котенко, канд. техн. наук**

*Кафедра "Управление эксплуатационной работой",  
Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I, Санкт-Петербург*

## **ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ СТАНЦИИ В РАМКАХ КОНЦЕПЦИИ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

В работе изложена информационно-технологическая концепция киберфизических систем, реализуемых на базе промышленного интернета вещей. Показано, что применительно к железнодорожным станциям такие системы способны обеспечить реализацию технологий управляемой самоорганизации функционирования технологических процессов и могут рассматриваться как варианты интеллектуальных самоуправляемых станционных систем. Выделены проблемы организации функционирования киберфизических систем по отношению к условиям станционной работы, а именно: неопределенность поведения подсистем работы станции, хаотичность избыточности их взаимосвязей, разнообразие функций управления и территориальная распределенность объектов. В этих условиях существенно ужесточаются требования к четкости выражения и упорядоченности физических и вычислительных процессов, формальному определению целей, пространственно-временных, технических, технологических и финансовых ограничений. Сделан вывод об актуализации проблем рациональной организации технологических процессов работы станций в случае перехода к промышленному интернету вещей.

Особое внимание обращается на вопросы управления потерями при осуществлении технологических операций. Изложен подход к моделированию технологического процесса работы станции в рамках концепции киберфизических систем. В основе подхода лежит динамический альтернативный системный граф с управляемой структурой. Предложена структура технологических операций и механизм управления потерями в рамках подхода. Рассмотрены базовые динамические модели программного управления эксплуатационной работой станции, направленные на регулирование интенсивности станционной работы и продолжительности технологических операций. Отмечена важность сохранения накопленного в процессе управления станционными системами оценочного инструментария для организации экспертного сопровождения новых решений.

Промышленный интернет вещей, киберфизические системы, железнодорожная станция, оптимизация эксплуатационных затрат, управление потерями

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-2-165-183

### **Введение**

Появление микроэлектронных устройств серийного производства, способных взаимодействовать со средствами автоматизации, выполнять вычисления и обмениваться информацией по стандартным интернет-протоколам, постепенно меняет системы управления за счет тесной интеграции вычислительных и физических процессов, формируя информационно-технологическую концепцию киберфизических систем (КФС) [1–3].

Одной из реализаций КФС является промышленный интернет вещей — территориально распределенная вычислительная сеть объектов, оснащенных

измерительными, телекоммуникационными и управляющими модулями для взаимодействия между собой и внешней средой с последующим предоставлением заданных сервисов [2].

Применительно к железнодорожным станциям такие системы позволяют обеспечить реализацию технологий управляемой самоорганизации функционирования технологических процессов и могут рассматриваться как варианты интеллектуальных самоуправляемых станционных систем [4, 5].

Основные направления перехода к таким КФС состоят в замене отраслевых протоколов взаимодействия устройств на интернет-протоколы и оснащении вычислительными устройствами не только ключевых элементов технологического процесса, но и практически всех ресурсов станции.

Внедрение таких КФС связано с активным ростом количества элементов автоматики, возрастанием степени междисциплинарности, применением быстро меняющихся схем взаимодействия технических средств. В то же время оно сталкивается с неопределенностью поведения подсистем работы станции, избыточностью их взаимосвязей, разнообразием функций управления и территориальной распределенностью объектов. Это существенно ужесточает требования к четкости выражения и упорядоченности физических и вычислительных процессов, формальному определению целей, пространственно-временных, технических, технологических и финансовых ограничений [6, 7].

Для преодоления этих трудностей используется единое полимодельное логико-динамическое описание предметной области, направленное на реализацию возможности одновременного решения задачи синтеза технологии управления КФС и задачи планирования операций, потоков и ресурсов [6]. На алгоритмическом уровне такой подход предусматривает применение моделей управления операциями, параметрами операций и структурами, а также вспомогательными динамическими моделями для учета требований, связанных с прерываниями операций [8]. Технически это приводит к тому [4, 9–12], что в пределах станции количество измерительных каналов интернета вещей может составлять сотни единиц, содержащих территориально разнесенные датчики как скалярных, так и тензорных величин; измерительная информация должна передаваться на большие расстояния по проводным и беспроводным каналам. Следовательно, ее обработка может осуществляться с использованием различных вычислительных технологий, в т. ч. облачных, при этом процесс обработки должен быть близок к реальному масштабу времени. Экономическая целесообразность создания такой КФС может быть обеспечена только когда информация и знания, на которые она опирается, отличаются высокой достоверностью, а эксплуатационные затраты достаточно малы [9, 13]. В концептуальном плане это означает, что в рамках решения задачи планирования работы КФС понятия управления технологическим процессом и управления соответствующей этому процессу киберфизической системой используются как тождественные [7, 14].

Таким образом, при переходе к промышленным КФС происходит актуализация проблем рациональной организации технологических процессов, среди которых традиционно выделяются проблемы оптимизации эксплуатационных затрат и, в частности, управления потерями при осуществлении технологических операций.

### 1. Формы потерь, явные и скрытые

В работе любой железнодорожной станции имеется некоторый уровень эксплуатационных потерь, сопутствующих реализуемой технологии [15–17]. Он тем больше, чем сложнее комплекс технологических операций и значительнее объем эксплуатационной нагрузки.

Согласно устоявшемуся мнению, по своему характеру эксплуатационные потери можно разделить на две группы [15, 16]: явные и скрытые.

К явным потерям, как правило, относят потери, полученные в результате:

- нахождения вагонов в ожидании сверх нормативного времени;
- возникновения аварий, брака и отказов в работе технических устройств;
- выявления повреждений вагонов (например, при роспуске с горки и т. п.).

На практике такие потери нетрудно обнаружить и отследить в ходе выполнения эксплуатационной работы. Управление потерями ведется по заранее составленным схемам и в большинстве случаев дает эффективные результаты.

К скрытым потерям относят потери, полученные в ходе:

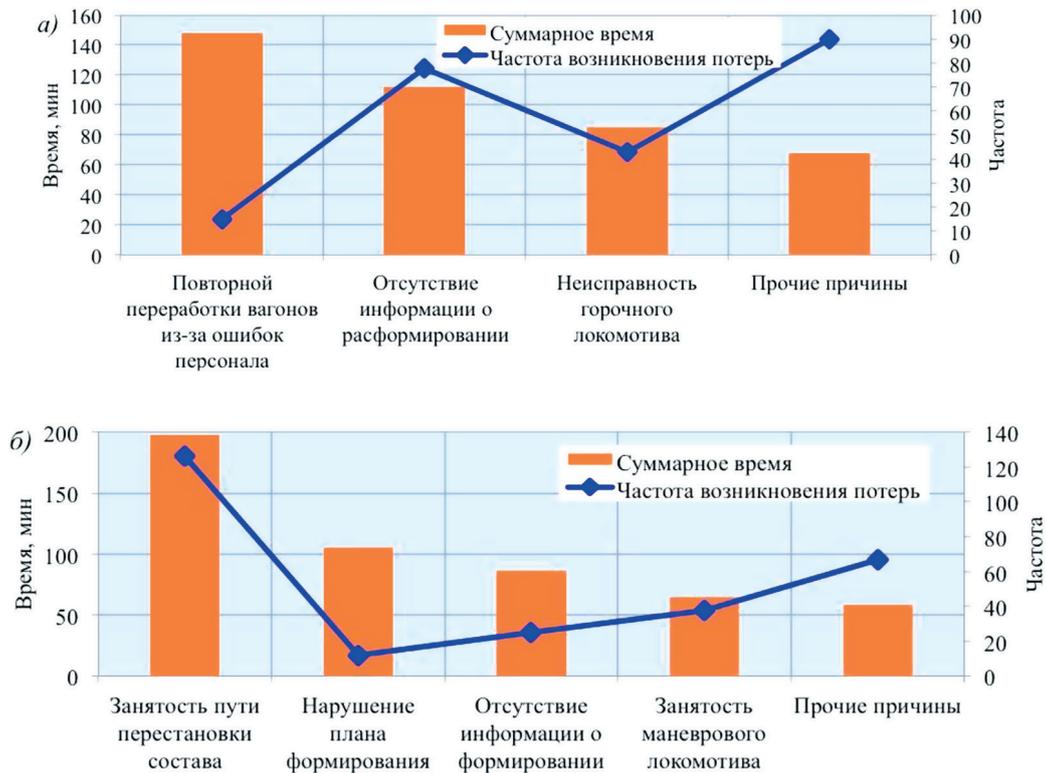
- увеличения вагонопотока до размеров, приближающихся к пределу возможностей его переработки на станции;
- нерациональности маневровых передвижений и перемещений ресурсов к месту работ (из-за занятости путей в парках, перекрытия горловин длинно-составными поездами и т. п.);
- работы маневровых средств с заниженной скоростью<sup>1</sup>;
- повторных переработок вагонов, возврата к реализованным операциям в ходе осмотров составов, повторных осмотров составов после формирования (из-за ошибок при производстве операций);
- несвоевременности поступления информации.

Величина потерь второй группы, как следует из их наименования, скрыта, а их причины в настоящее время выявляются далеко не сразу или не выявляются вовсе, что препятствует налаживанию процесса управления ими.

Методам анализа и прогнозирования эксплуатационных потерь посвящен длинный ряд работ [18, 19 и др.]. Однако все они раскрывают общие или отдельные аспекты оценки явных потерь, не предлагая решений относительно их

---

<sup>1</sup> Заниженная скорость маневров может быть обусловлена как человеческим фактором, так и техническим состоянием, что вызывает неоднозначность отнесения потерь к явному или скрытому типу.



**Рис. 1.** Величина скрытых потерь и частота их возникновения на различных стадиях переработки вагона: расформирования (а) и формирования (б) состава

скрытых аналогов. Вместе с тем наличие скрытых потерь является неизбежной (и часто значительной) составной частью суммарных потерь (рис. 1), сопутствующей реализации технологических процессов.

Очевидно, что без решения проблемы управления скрытыми потерями в станционной работе эффективная организация функционирования КФС на станции невозможна. Вместе с тем, как показывает анализ, решению проблемы препятствуют особенности классического подхода к организации эксплуатационной работы. Возможно, в классической постановке проблема управления скрытыми потерями не имеет решения. Тот же анализ показывает, что переход к полимодельному логико-динамическому описанию технологических процессов, необходимый для организации функционирования КФС, может способствовать решению проблемы.

## 2. Некоторые особенности классического и киберфизического подходов к управлению технологическими процессами

Переход от отраслевых протоколов взаимодействия объектов к протоколам общего назначения, открытость и унификация аппаратной архитектуры

приводят к структурно-функциональной избыточности промышленного интернета вещей. Такая избыточность дает возможность достигать результатов функционирования КФС с использованием множества технологий, различающихся интенсивностью, ресурсоемкостью, устойчивостью и другими характеристиками, но в то же время рациональных для конкретных условий эксплуатации.

Классические подходы к решению задач перспективного, оперативного планирования и диспетчеризации, опирающиеся на теорию расписаний и комбинаторику, в этом случае не могут быть применены прямо. Они позволяют получить допустимый план функционирования КФС, но ограничиваются штатными условиями эксплуатации, выбор которых определяется установленной технологией [6].

Применительно к штатным условиям потери описываются в терминах нормируемых межоперационных интервалов (ожиданий). Расчет их величин в соответствии с общепринятым подходом к расчету продолжительности операций по переработке вагонов на станции, установленному Типовым технологическим процессом [20], является частью расчета соответствующих норм. По итогам нормирования продолжительностей технологических операций [21 и др.] устанавливается плановое время нахождения вагона на станции (общая продолжительность переработки вагона), которое становится критерием оценки эксплуатационной эффективности станционной работы. Расчет производится на средние сутки. Фактическое время переработки может быть меньше планового, если наблюдается снижение уровня реальных потерь относительно уровня, принятого при расчете норм, а может быть больше — в случае превышения фактических потерь над «нормативными».

Отсутствие перспектив прямого применения такого подхода в планировании работы КФС можно показать на примере используемых в настоящее время технологических карт (рис. 2), где продолжительность процессов и время начала-конца (последовательность) операций единожды жестко заданы технологическими параметрами, а межоперационные интервалы (ожидания совершения операций) не показаны.

Рисунок 2 иллюстрирует и другую проблему — проблему размерности, состоящую в том, что используемые сегодня методы направлены на решение задач оперативного планирования в отдельных элементах и подсистемах станции. Согласование и анализ взаимного влияния принятых решений, учет факторов неопределенности и факторов, связанных с многокритериальной оценкой, осуществляется позднее на основе накопленных эвристик (рис. 3).

Несмотря на практическую значимость, такой подход противоречит требованиям четкости описания и упорядоченности физических и вычислительных процессов, необходимых для реализации промышленного интернета вещей, неизбежно сокращает возможное число анализируемых структурно-функциональных схем КФС и ведет к ошибкам при поиске наилучших решений.



Рис. 2. Проверка реализации логического контроля операций по отправлению поезда на соответствие параметрам технологического процесса станции

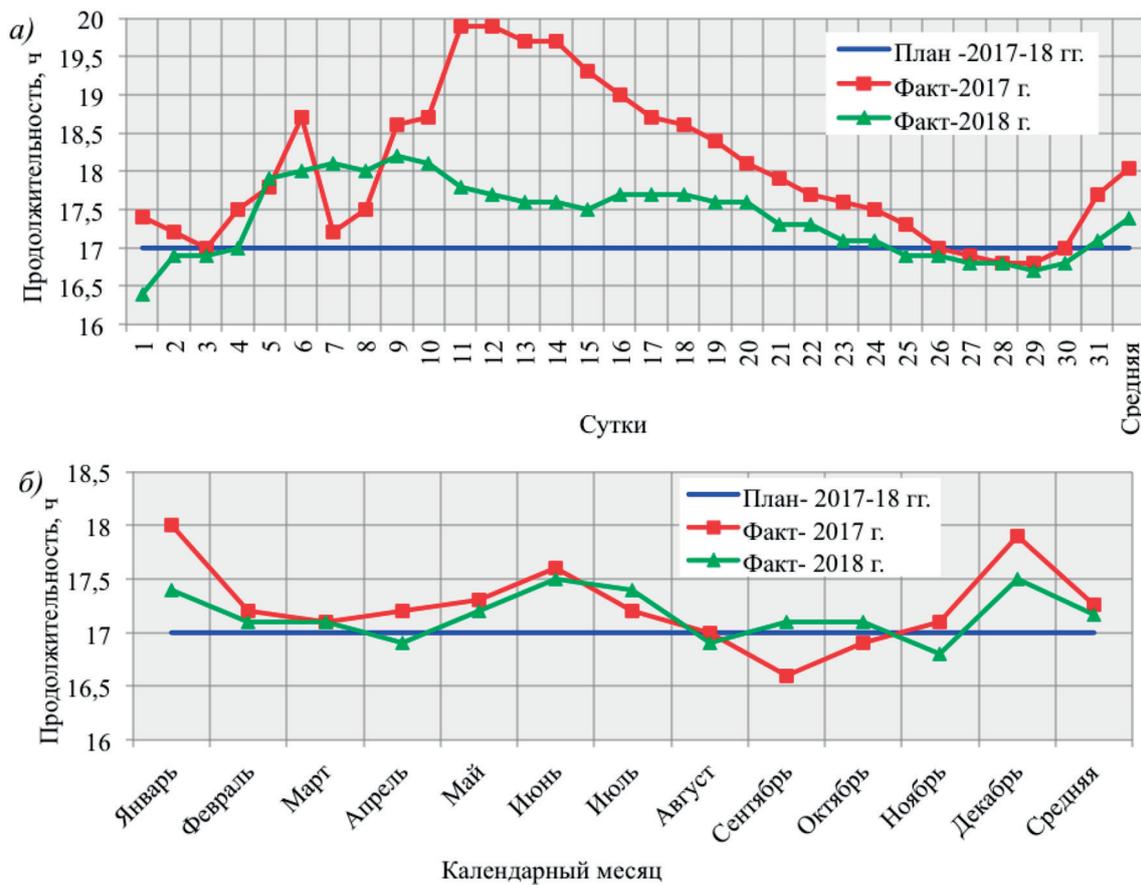


Рис. 3. Пример сглаживания суточных потерь (а) за счет использования эвристических правил планирования и диспетчеризации в последующие периоды (б)

### 3. Модель технологического процесса с позиций информационно-технологической концепции киберфизических систем

Накопленный опыт исследования практических вопросов управления сложными техническими объектами позволяет установить универсальную базовую структуру для формального описания задач синтеза технологий и планов работы КФС на теоретико-множественном уровне [22]. Как правило, в качестве модели такого описания удобно использовать динамический альтернативный системный граф с управляемой структурой [8].

Применительно к описанию функционирования станционных систем построение альтернативного графа (рис. 4) связано с анализом и утверждением различных способов (технологий) выполнения операций по переработке вагонов, подготовки составов в рейс и т. п., а также назначением и согласованием различных режимов осуществления операций в зависимости от колебания объемов работы.

Число режимов определяется ресурсными возможностями и может гибко изменяться в пределах трех основных категорий:

- экономичных режимов, предполагающих минимальное ресурсопотребление и низкую интенсивность (скорость) работы;
- режимов, характеризуемых средними значениями затрат времени и ресурсов;
- высокопроизводительных режимов с максимальным ресурсопотреблением и высокой интенсивностью работы.

Выполнение операций может осуществляться как в одном режиме, так и в нескольких (в первом случае, например, это высокопроизводительное расформирование через горку или экономичное расформирование при помощи других

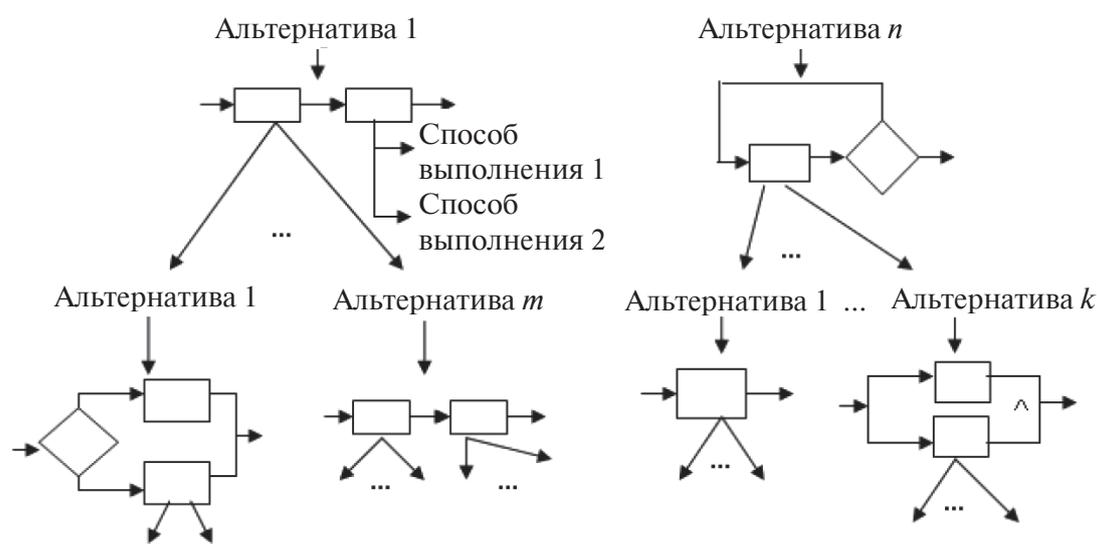


Рис. 4. Структура альтернативного графа

средств; во втором — расформирование через горку с различной интенсивностью). Но описанный в характеристиках режима способ образует отдельный элемент альтернативного графа — процессную (технологическую) линию.

Количество процессных линий  $\widetilde{PL}_i$ , расположенных в графе параллельно, устанавливается технико-эксплуатационной характеристикой станции:

$$\widetilde{PL} = \{\widetilde{PL}_i, i \in \widetilde{N}\}.$$

Каждая линия имеет свою конфигурацию ресурсов:

$$\widetilde{PS} = \{\widetilde{PS}_j, j \in \widetilde{M}\}, \quad \widetilde{M} = \{1, \dots, \widetilde{m}\}.$$

Использование линий  $\widetilde{PL}_i$  осуществляется на основе системы структурно-функциональных схем:

$$SF = \{SF_l, l, i, j \in M = \widetilde{N} \cup \widetilde{K} \cup \widetilde{M} = \{1, \dots, m\}\}.$$

Они объединяют линии между собой в соответствии с заданиями  $UI_\gamma^{(j)}$  на достижение определенных характеристик интенсивности и сформированы с учетом норм  $\gamma$  продолжительности технологических операций:

$$UI^{(j)} = \{UI_\gamma^{(j)}, \gamma \in \Phi\}.$$

Таким образом, задача синтеза технологий работы станции и планов функционирования КФС определяется как задача выбора оптимальной последовательности структурно-функциональных схем  $SF_l$  потребления ресурсов  $\widetilde{RS}_j$ , обеспечивающих выполнение заданий  $UI_\gamma^{(j)}$  на интенсивность работы с соблюдением установленных норм продолжительности  $\gamma$  технологических операций в используемых линиях  $\widetilde{RL}_i$ .

В силу адаптивных свойств описанной системы понятие штатных условий эксплуатации в этом случае перестает быть актуальным. Продолжительности операций определяются как результат моделирования объемов, интенсивности и показателей качества работы на основе решения задач многокритериальной оптимизации с учетом заданных норм. Потери устанавливаются в ходе машинных экспериментов, направленных на выявление «конфликтов» между линиями и операциями в зависимости от роста интенсивности переработки и ресурсопотребления.

Вместе с тем опыт практического применения моделей процессов, основанных на альтернативных графах, показывает, что в отличие от классического подхода в таких моделях существует необходимость жесткой формализации структуры операций и механизма управления потерями.

#### 4. Формализация структуры технологических операций и понятия потерь

Представим общую продолжительность переработки транзитного вагона на станции в соответствии с [23] как трехуровневую совокупность продолжительностей:

- а) системных технологических операций (приема — отправления, расформирования — формирования и накопления);
- б) комплексных технологических операций (обработка составов и т. п.) и межоперационных интервалов (ожидание обработки и пр.);
- в) базовых и сервисных операций (например, выдача каких-либо команд, обмен документами и т. п.), а также их ожиданий.

Продолжительность системных операций выразим как

$$L = \{l_i, i \in I\}, i = [1, \dots, I], I = 5,$$

где  $i$  — индекс системной технологической операции, например,  $i = 1$  определяет системную операцию по приему поезда в парке приема (ПП),  $i = 2$  — системную операцию по расформированию,  $i = 3$  — системную операцию по накоплению,  $i = 4$  — системную операцию по формированию,  $i = 5$  — системную операцию по отправлению поезда в парке отправления (ПО).

Учтем, что каждая продолжительность  $l_i$  системной операции включает длительности составляющих ее комплексных операций  $o_{ij}$  и длительности межоперационных ожиданий (межоперационных интервалов или пауз)  $p_{ij}$ :

$$O = \{o_{ij}, j \in J\}, j = [1, \dots, J], J = 10,$$

$$P = \{p_{ij}, j \in J\}, j = [1, \dots, J], J = 10,$$

где  $j$  — индекс комплексной технологической операции или ее ожидания (межоперационной паузы), например,  $j = 1$  — закрепление и ограждение состава в ПП (ожидание закрепления и ограждения состава в ПП),  $j = 2$  — обработка состава в ПП,  $j = 3$  — заезд,  $j = 4$  — надвиг,  $j = 5$  — роспуск,  $j = 6$  — осаживание,  $j = 7$  — формирование и перестановка,  $j = 8$  — закрепление и ограждение состава в ПО,  $j = 9$  — обработка состава в ПО,  $j = 10$  — обеспечение поезда тормозами.

А комплексные операции включают базовые и сервисные операции, выполняющиеся как последовательно ( $n = 1$ ), так и параллельно ( $n = 2$ ), и можно выделить продолжительности этих операций  $d_{ijz}^n$  и продолжительности их ожиданий или интервалов между ними  $p'_{ijz}$ :

$$D = \{d_{ijz}^n, z \in Z, n = [1, 2]\}, z = [1, \dots, Z], Z = 98,$$

$$P' = \{p'_{ijz}, z \in Z\}, z = [1, \dots, Z], Z = 98,$$

где  $z$  — индекс базовой или сервисной технологической операции и ее ожидания, например,  $z = 1$  — выдача команд на закрепление состава на путях ПП (ожидание выдачи команд на закрепление состава на путях ПП),  $z = 2$  — прием перевозочных документов от машиниста поезда,  $z = 3$  — доставка перевозочных документов в СТЦ, ...  $z = 97$  — разрешение на отправление со станции,  $z = 98$  — контроль прохода поезда по маршруту отправления.

Отметим, что базовые и сервисные операции по своему смыслу представляют собой простые технологические действия, которые совместно с сопровождающими их паузами определяют длительности и порядок осуществления



**Рис. 5.** Уровни технологических операций и межоперационных пауз в рамках процессных линий альтернативного графа

комплексных операций. При этом длительности  $d_{ijz}^n$ , как и длительности их ожиданий  $p'_{ijz}$ , в отличие от длительностей комплексных операций, не нормируются.

Подчеркнем факт нормирования только среднего уровня технологических операций (рис. 5), базирующегося на «ненормируемых» элементах (базовых и сервисных операциях и их ожиданиях), свободных от контроля реализации во времени, и сделаем вывод: наличие такой свободы способствует формированию неявного характера изменения продолжительностей  $d_{ijz}^n$  и  $p'_{ijz}$ .

Это и становится причиной появления и накопления скрытых потерь времени при осуществлении стационарной работы.

Разработка подхода к управлению скрытыми потерями времени возможна на основе привлечения понятия технологического ритма [18].

Такой ритм должен соответствовать заданиям  $UI_{\gamma}^{(j)}$  на интенсивность работы процессных линий альтернативного графа. Величина ритма отдельной линии определяется интервалом времени  $o_{ij}$ , требуемым для осуществления одной комплексной операции на линии. Каждая  $i$ -я базовая (сервисная) операция занимает долю ритма  $k_i$ .

Индикаторами сбоев технологического ритма в силу строгой определенности порядка реализации базовых (сервисных) операций с установленными длительностями  $d_{ijz}^n$  являются продолжительности их ожиданий  $p'_{ijz}$ .

Исходя из сказанного, под скрытыми потерями будем понимать отклонения суммы длительностей  $p'_{ijz}$  и  $d_{ijz}^n$  в рамках интервала  $o_{ij}$ , приводящие к нарушению ритма:

$$(p'_{ijz} + d_{ijz}^n) > (r - k_i r),$$

где  $r = o_{ij}$ .

Согласование ритма нескольких линий достигается синхронизацией комплексных, базовых и сервисных технологических операций в рамках структурно-функциональной схемы, т. е. нахождением соответствия между суммарной длительностью  $\sum_{z=1}^Z \sum_{j=1}^J p'_{ijz}$  и  $\sum_{z=1}^Z \sum_{j=1}^J d_{ijz}^n$  на отдельных линиях и величиной ритма ведущей процессной линии  $r$ .

## 5. Динамические модели управления эксплуатационной работой

Использование в качестве модели технологического процесса станции динамического альтернативного системного графа с управляемой структурой

позволяет формализовать задачу синтеза технологий работы станции и планов функционирования КФС в виде задачи программного управления динамической системой [4, 8, 22]. Решение задачи может осуществляться путем разработки частных моделей программного управления.

В качестве основных выделим два типа частных моделей: модель управления заданиями на интенсивность работы процессных линий и модель управления продолжительностями технологических операций. Изложим эти модели в терминах работы [13].

Динамическая модель управления заданиями  $UI_\gamma^{(j)}$  на интенсивность работы процессных линий  $\widetilde{PL}_i$  альтернативного графа может быть представлена в следующем виде:

$$M_I = u^{(I)}(t); \dot{x}_{i\gamma}^{(I)} = \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij}(t) u_{ij}^{(I)}; x_{i\gamma}^{(I)}(t_0) = 0;$$

$$x_{i\gamma}^{(I)}(t_f) = a_{i\gamma}^{(I)}; \sum_{i=1}^m \sum_{\gamma=1}^{s_i} u_{ij}^{(I)} \leq c_j^{(I,1)}; \sum_{i=1}^m \sum_{\gamma=1}^{s_i} u_{ij}^{(I)} \leq c_j^{(I,2)};$$

$$x_{ij}^{(I)}(t) \in \{0, 1\}; u_{ij}^{(I)} \left[ \sum_{\tilde{\alpha} \in \Gamma_{i\gamma_1}} (a_{i\tilde{\alpha}}^{(I)} - x_{i\tilde{\alpha}}^{(I)}) + \prod_{\tilde{\beta} \in \Gamma_{i\gamma_2}} (a_{i\tilde{\beta}}^{(I)} - x_{i\tilde{\beta}}^{(I)}) \right] = 0;$$

$$i, j = 1, \dots, m; i \neq j; \gamma = 1, \dots, s_i,$$

где  $x_{i\gamma}^{(I)}$  — переменная, характеризующая состояние выполнения задания  $UI_\gamma^{(j)}$ ;  $a_{i\gamma}^{(I)}$ ,  $a_{i\tilde{\alpha}}^{(I)}$ ,  $a_{i\tilde{\beta}}^{(I)}$  — заданные уровни интенсивности заданий  $UI_\gamma^{(j)}$ ,  $UI_{\tilde{\alpha}}^{(i)}$ ,  $UI_{\tilde{\beta}}^{(i)}$ ;  $u_{ij}^{(I)}(t)$  — управляющее воздействие:  $u_{ij}^{(I)}(t) = 1$ , если задание выполняется,  $u_{ij}^{(I)}(t) = 0$  — в противоположном случае;  $\Gamma_{i\gamma_1}$ ,  $\Gamma_{i\gamma_2}$  — множество номеров заданий, осуществляемых над процессными линиями  $\widetilde{PL}_i$ , непосредственно предшествующих и технологически связанных с заданием  $UI_\gamma^{(j)}$  при помощи логических операций «и», «или» (соответственно);  $c_j^{(I,1)}$ ,  $c_j^{(I,2)}$  — заданные константы, характеризующие ресурсные ограничения функционирования процессных линий  $\widetilde{PL}_i$ ;  $\varepsilon_{ij}(t)$  — матричная временная функция для задания пространственно-временных ограничений, связанных с переходами между линиями  $\widetilde{PL}_i$  и схемами  $SF_l$ , которая принимает значение «1», если переход осуществляется в заданное множество, и «0» — в противоположном случае.

Динамическая модель управления продолжительностями технологических операций  $L$ ,  $O$ ,  $D$  ( $D \subset O$ ,  $O \subset L$ ) и их ожиданиями  $P$ ,  $P'$  в рамках процессных линий может быть сформулирована как

$$M_L = u^{(L)}(t); \dot{x}_i^{(g)} = F_i(t)x_i^{(g)}; y_j^{(i)}(t) = d_j^T(t)x_i^{(g)} + \xi_j^{(L)};$$

$$\dot{Z}_i = -Z_i F_i - F_i^T Z_i - \sum_{j=1}^m \sum_{\tilde{\gamma} \in \Gamma_i} u_{i\tilde{\gamma}j}^{(L)} \frac{d_j d_j^T}{\sigma_j^2}; \quad i \neq j \quad i, j \in \tilde{M};$$

$$0 \leq u_{i\tilde{\gamma}j}^{(L)} \leq c_{i\tilde{\gamma}}^{(L)} u_{i\tilde{\gamma}j}^{(I)},$$

где  $x_i^{(g)}$  — вектор состояния линии  $\widetilde{PL}_i$ ;  $F_i(t)$  — матрица, характеризующая динамику изменения характеристик, описывающих состояние линии (например, ресурсоемкость, режим работы);  $\xi_j^{(L)}$  — некоррелированные ошибки информации об изменениях характеристик линии (предполагается, что ошибки подчиняются нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием и дисперсией  $\sigma_j^2$ );  $u_{i\tilde{\gamma}j}^{(L)}(t)$  — управляющее воздействие, которое формирует задание на получение информации о параметрах продолжительностей операций и их ожиданий  $y_j^{(i)}(t)$  на линиях;  $c_{i\tilde{\gamma}}^{(L)}$  — величины, характеризующие ресурсные ограничения при выполнении задания  $UI_\gamma^{(i)}$ ;  $Z_i$  — матрица, обратная по отношению к корреляционной матрице ошибок оценки состояния линий;  $\Gamma_i$  — множество операций, выполняемых КФС по формированию структурно-функциональных схем  $SF_i$ ;  $d_j(t)$  — вектор, определяющий систему оценки характеристик, описывающих состояние линии.

Для оценки качества работы изложенных моделей можно использовать целевые функции:

$$W_1^{(I)} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{\gamma=1}^{s_i} \left\{ \left[ a_{i\gamma}^{(I)} - x_{i\gamma}^{(I)}(t_f) \right]^2 + \sum_{j=1}^m \int_{t_0}^{t_f} \eta_{i\gamma}(\tau) u_{i\tilde{\gamma}j}^{(I)}(\tau) d\tau \right\}, \quad i \neq j;$$

$$W_2^{(L)} = b_\gamma^T K_i(t_f) b_\gamma;$$

$$W_3^{(L)} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{s_i} \sum_{\tilde{\gamma} \in UI^{(i)}} \int_{t_0}^{t_f} u_{i\tilde{\gamma}j}^{(I)}(\tau) d\tau, \quad i \neq j,$$

где  $\eta_{i\gamma}(\tau)$  — функции времени, определенные с учетом заданных сроков выполнения технологических операций.

Обобщая параметры частных динамических моделей программного управления, легко построить обобщенную динамическую модель управления эксплуатационной работой станции, которая будет изменяться при добавлении или трансформации частных моделей.

Отметим, что системное моделирование и логико-динамическая интерпретация технологических процессов, направленные на решение задач синтеза технологий, построения рациональных оперативных планов работы и разработки оптимальных структурно-функциональных схем КФС, призваны существенно повысить практическую ценность технологических операций.



Предполагается, что структурно-функциональная избыточность технологических систем, отраженная при помощи микроэлектронных серийных устройств в промышленном интернете вещей, позволит генерировать множество технологических, измерительных, вычислительных и управляющих схем и будет способствовать выработке оптимальных управлений в реальном режиме времени.

Однако на практике информационно-технологическая концепция сталкивается с проблемой хаотичности избыточности технологических систем, актуализируя вопросы рациональной организации технологических процессов, упорядочивания механизмов управления затратами и ресурсами.

Это хорошо иллюстрируется результатами анализа станционной работы, где наличие скрытых потерь, присутствие неполного нормирования операций и разобщенность планирования работы подсистем делает внедрение промышленного интернета вещей экономически неэффективным.

Информационно-технологическая концепция предлагает реализацию возможностей анализа взаимного влияния принятых решений, учет факторов неопределенности и факторов, связанных с многокритериальной оценкой, объединение ресурсов в рамках общих целей и, следовательно, новые условия оптимизации процессов, но требует в рамках подходов к решению задач синтеза технологий и планов работы систем использование строго формализованных графовых структур. Это заставляет задуматься над вопросами дополнительной формализации теоретического описания технологических процессов.

В настоящей работе проведено исследование возможной перспективной формы теоретического представления технологического процесса работы станции, предложено решение вопросов структуризации технологических операций и формализации механизмов управления потерями, сформулированы динамические модели программного управления технологическими операциями, их параметрами и структурами и управления заданиями на изменение режимов интенсивности работы станционных ресурсов в зависимости от изменяющихся объемов работы.

Решение этих вопросов позволяет сделать шаг к использованию информационно-технологической концепции промышленных киберфизических систем в станционной работе.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18–07–01272.*

### **Библиографический список**

1. *Jeschke S.* Industrial Internet of Things and Cyber Manufacturing Systems / S. Jeschke, C. Brecher, T. Meisen, D. Özdemir, T. Eschert; ed. by S. Jeschke, C. Brecher, H. Song, D. Rawat // Industrial Internet of Things. — New York: Springer International Publishing, 2017. — P. 3–19.
2. *Черняк Л.* Платформа Интернета вещей / Л. Черняк // Открытые системы. СУБД. — 2012. — № 7.

3. *Цветков В. Я.* Киберфизические системы / В. Я. Цветков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2017. — № 6–1. — С. 64–65.
4. *Куприяновский В. П.* Киберфизические системы как основа цифровой экономики / В. П. Куприяновский, Д. Е. Намиот, С. А. Синягов // Intern. Journal of Open Information Technologies. — 2016. — Vol. 4, N 2. — P. 18–24.
5. *Oks S.* An Application Map for Industrial Cyber-Physical Systems / S. Oks, A. Fritzche, K. Möslin; ed. by S. Jeschke, C. Brecher, H. Song, D. Rawat // Industrial Internet of Things. — New York: Springer International Publishing, 2017. — P. 21–46.
6. *Потрясаев С. А.* Математическое и программное обеспечение синтеза технологий и планов работы киберфизических систем / С. А. Потрясаев // Известия вузов. Приборостроение. — 2018. — Т. 61, № 11. — С. 939–946.
7. *Gilchrist A.* Industry 4.0: The Industrial Internet of Things / A. Gilchrist. — New York: Springer International Publishing, 2016. — 250 p.
8. *Охтилев М. Ю.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов / М. Ю. Охтилев, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов. — М.: Наука, 2006. — 410 с.
9. *Wolf W.* Cyber-physical systems / W. Wolf // Computer. — 2009. — № 3. — P. 88–89.
10. *Schuh A.* Cyber Physical Production Control / A. Schuh, V. Stich, C. Reuter, M. Blum, F. Brambring, T. Hempel, J. Reschke, D. Schiemann; ed. by S. Jeschke, C. Brecher, H. Song, D. Rawat // Industrial Internet of Things. — New York: Springer International Publishing, 2017. — P. 519–539.
11. *Reniers M.* Model-Based Engineering of Supervisory Controllers for Cyber-Physical Systems / M. Reniers, J. van de Mortel-Fronczak, K. Roelofs.; ed. by S. Jeschke, C. Brecher, H. Song, D. Rawat // Industrial Internet of Things. — New York: Springer International Publishing, 2017. — P. 111–136.
12. *Elattar M.* Communications for Cyber-Physical Systems / M. Elattar, V. Wendt, J. Jasperneite; ed. by S. Jeschke, C. Brecher, H. Song, D. Rawat // Industrial Internet of Things. — New York: Springer International Publishing, 2017. — P. 347–372.
13. *Назаров Д. И.* Модели и программный комплекс решения задач планирования измерительно-вычислительных операций в киберфизических системах / Д. И. Назаров // Известия ВУЗов. Приборостроение. — 2018. — Т. 61, № 11. — С. 947–955.
14. *Feeney A.* Cyber-Physical Systems Engineering for Manufacturing / A. Feeney, S. Freechette, V. Srinivasan; ed. by S. Jeschke, C. Brecher, H. Song, D. Rawat // Industrial Internet of Things. — New York: Springer International Publishing, 2017. — P. 81–110.
15. Методическое руководство по применению бережливого производства на станциях. — Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 25.06.2012 г. № 1254р М ЦД 2.10.009. — М.: ОАО «РЖД», 2012. — 44 с.
16. Методические рекомендации по оптимизации трудозатрат работников железнодорожных станций при внедрении бережливого производства. — Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 23.04.2012 г. № 805р. — М.: ОАО «РЖД», 2012. — 76 с.
17. *Бутунов Д. Б.* Оценка непроизводительных потерь в работе сортировочной станции / Д. Б. Бутунов, А. Г. Котенко // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб: ПГУПС, 2018. — Т. 15, вып. 4. — С. 498–512.

18. Уварова О. В. Предложения по внедрению элементов «бережливого производства» на железнодорожной станции Московка / О. В. Уварова, Ю. А. Колосова // Экономика железных дорог. — 2015. — Вып. 1. — С. 87–94.
19. Гришкова Д. Ю. Применение концепции бережливого производства на станции / Д. Ю. Гришкова // Инфраструктурные отрасли экономики: проблемы и перспективы развития. — 2016. — № 15. — С. 128–134.
20. Типовой технологической процесс работы сортировочной станции. — М.: Транспорт, 2003. — 192 с.
21. Инструктивные указания по организации вагонопотоков на железных дорогах ОАО «РЖД». — М.: Техинформ, 2007. — 527 с.
22. Соколов Б. В. Комплексное моделирование функционирования автоматизированной системы управления навигационными космическими аппаратами / Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов // Проблемы управления и информатики. — 2002. — № 5. — С. 103–117.
23. Гаврилов Д. А. Управление производством на базе стандарта MRP II / Д. А. Гаврилов. — СПб: Издательский дом «Питер», 2002. — 340 с.
24. Ротер М. Учитесь видеть бизнес-процессы: Практика построения карт потоков создания ценности / М. Ротер, Д. Шук. — М.: Альпина Бизнес Букс: CBSD, Центр развития деловых навыков, 2005. — 144 с.

**A. G. Kotenko**

**O. V. Kotenko**

*Chair of "Management of Maintenance Works",*

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

## **DYNAMIC MODELS OF YARD OPERATION MANAGEMENT WITHIN THE CONCEPT OF CYBER-PHYSICAL SYSTEMS**

Information-technology concept of cyber-physical systems based on the industrial Internet of things was stated in the study. It was shown that such systems are able to provide implementation of technologies for managed self-organization of engineering processes operation as applied to railway stations and can be considered as versions of intelligent self-controlled station systems. Problems of cyber-physical systems operation management were singled out in reference to conditions of yard operation, namely: uncertainty in the behavior of subsystems of yard operation, random nature of redundancy of their interconnections, management diversity and spatial distribution of objects. Requirements for expression accuracy and order of physical and computational processes, formal definition of aims, as well as spatiotemporal, technical, engineering and financial restrictions are severely toughened in these conditions. A conclusion was made on actualization of problems of rational organization of yard operation engineering processes in case of transition to the industrial Internet of things.

Special attention is given to issues of losses control during the implementation of engineering operations. An approach to modeling of yard operation engineering process within the concept of cyber-physical systems was specified. A dynamic alternative system graph with controlled structure underlies the approach. The structure of engineering operations and mechanism for losses control was suggested within the framework of the approach. Standard dynamic models of yard operation programmed control, aimed at intensity regulation of yard operation, as well as duration of engineer-

ing operations were considered. The importance of preservation of evaluation tools accumulated in the process of station systems control was noted for organization of competent maintenance of new solutions.

Industrial Internet of things, cyber-physical systems, railway station, optimization of operating costs, losses control

## References

1. Jeschke S., Brecher C., Meisen T., Özdemir D. & Eschert T. (2017) Industrial Internet of Things and Cyber Manufacturing Systems. Ed. by S. Jeschke, C. Brecher, H. Song, D. Rawat. *Industrial Internet of Things*. New York, Springer International Publishing, pp. 3–19.
2. Chernyak L. (2012) Platforma Interneta veshchey [Internet of Things Platform]. *Otkrytiye sistemy* [Open systems]. *SUBD* [Data base management system], no. 7. (In Russian)
3. Tsvetkov V. Y. (2017) Kiberfizicheskiye sistemy [Cyber-physical systems]. *Mezhdunarodniy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy* [International journal of applied and fundamental research], no. 6–1, pp. 64–65. (In Russian)
4. Kupriyanovskiy V. P., Namiot D. E. & Sinyagov S. A. (2016) Kiberfizicheskiye sistemy kak osnova tsifrovoy ekonomiky [Cyber-physical systems as the basis for digital economics]. *International Journal of Open Information Technologies*, vol. 4, no. 2, pp. 18–24. (In Russian)
5. Oks S., Fritzsche A. & Möslein K. (2017) An Application Map for Industrial Cyber-Physical Systems. Ed. by S. Jeschke, C. Brecher, H. Song, D. Rawat. *Industrial Internet of Things*. New York, Springer International Publishing, pp. 21–46.
6. Potryasaev S. A. (2018) Matematicheskoye i programmnoye obespecheniye sinteza tekhnologiy i planov raboty kiberfizicheskikh sistem [Mathematical and software support of process engineering synthesis and operation plan of cyber-physical systems]. *Izvestiya VUZov. Priborostroyeniye* [Proceedings of colleges and institutes of higher education. Instrument engineering], vol. 61, no. 11, pp. 939–946. (In Russian)
7. Gilchrist A. (2016) *Industry 4.0: The Industrial Internet of Things*. New York, Springer International Publishing, 250 p.
8. Okhtilev M. Y., Sokolov B. V. & Yusupov R. M. (2006) Intellekturniye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamikoy slozhnykh tekhnicheskikh obyektov [Intelligent technologies for monitoring and control for structural dynamics of complex technical objects]. Moscow, Nauka [Science] Publ., 410 p. (In Russian)
9. Wolf W. (2009) Cyber-physical systems. *Computer*, no. 3, pp. 88–89.
10. Schuh A., Stich V., Reuter C., Blum M., Brambring F., Hempel T., Reschke J. & Schiemann D. (2017) Cyber Physical Production Control. Ed. by S. Jeschke, C. Brecher, H. Song, D. Rawat. *Industrial Internet of Things*. New York, Springer International Publishing, pp. 519–539.
11. Reniers M., Mortel-Fronczak van de J. & Roelofs K. (2017) Model-Based Engineering of Supervisory Controllers for Cyber-Physical Systems. Ed. by S. Jeschke, C. Brecher, H. Song, D. Rawat. *Industrial Internet of Things*. New York, Springer International Publishing, pp. 111–136.
12. Elattar M., Wendt V. & Jasperneite J. (2017) Communications for Cyber-Physical Systems. Ed. by S. Jeschke, C. Brecher, H. Song, D. Rawat. *Industrial Internet of Things*. New York, Springer International Publishing, pp. 347–372.

13. *Nazarov D. I.* (2018) Modely i programmnyy kompleks resheniya zadach planirovaniya izmeritelno-vychislitelnykh operatsiy v kiberfizicheskikh sistemakh [Models and bundled software for the solution of scheduling problems of measuring-calculating operations in cyber-physical systems]. *Izvestiya VUZov. Priborostroyeniye [Proceedings of colleges and institutes of higher education. Instrument engineering]*, vol. 61, no. 11, pp. 947–955. (In Russian)
14. *Feeney A., Freechette S. & Srinivasan V.* (2017) Cyber-Physical Systems Engineering for Manufacturing. Ed. by S. Jeschke, C. Brecher, H. Song, D. Rawat. *Industrial Internet of Things*. New York, Springer International Publishing, pp. 81–110.
15. (2012) *Metodicheskoye rukovodstvo po primeneniyu berezhlivogo proizvodstva na stantsiyakh [Guidelines on lean management application at stations]*. Approved by OAO “Russian Railways” Order dated June 25<sup>th</sup>, 2012 № 1254r M TsD [Russian Railways Traffic Management System Board] 2.10.009. Moscow, OAO “RZhD” [Russian Railways] Publ., 44 p. (In Russian)
16. (2012) *Metodicheskiye rekomendatsii po optimizatsii trudozatrata rabotnikov zheleznodorozhnykh stantsiy pry vnedrenii berezhlivogo proizvodstva [Guidelines on optimization of railway workforce labour expenditures during the implementation of lean management]*. Approved by OAO “Russian Railways” Order dated April 23<sup>rd</sup>, 2012 № 805r. Moscow, OAO “RZhD” [Russian Railways] Publ., 76 p. (In Russian)
17. *Butunov D. B. & Kotenko A. G.* (2018) Otsenka neproizvoditelnykh poter v rabote sortirovochnoy stantsii [Assessment of inefficient losses in classification yard operation]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of St. Petersburg State Transport University]*. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University] Publ., vol. 15, iss. 4, pp. 498–512. (In Russian)
18. *Uvarova O. V. & Kolosova Yu. A.* (2015) Predlozheniya po vnedreniyu elementov “berezhlivogo proizvodstva” na zheleznodorozhnoy stantsii Moskovka [Proposals on implementation of “lean management” features at Moskovka railway station]. *Ekonomika zheleznykh dorog [Railroad economics]*, iss. 1, pp. 87–94. (In Russian)
19. *Grishkova D. Yu.* (2016) Primneneniye kontseptsii berezhlivogo proizvodstva na stantsii [Application of lean management concept at the station]. *Infrastrukturniye otrasly ekonomiki: problemy i perspektivy razvitiya [Infrastructural branches of economy: problems and prospects of development]*, no. 15, pp. 128–134. (In Russian)
20. (2003) Tipovoy tekhnologicheskiy protsess raboty sortirovochnoy stantsii [Standard technological process of classification yard operation]. Moscow, Transport Publ., 192 p. (In Russian)
21. (2007) Instruktivniye ukazaniya po organizatsii vagonopotokov na zheleznykh dorogakh OAO “RZhD” [Implementing guidance on car traffic volume organization at the railroads of OAO “Russian Railways”]. Moscow, Tekhinform Publ., 527 p. (In Russian)
22. *Sokolov B. V. & Yusupov R. M.* (2002) Kompleksnoye modelirovaniye funktsionirovaniya avtomatizirovannoy sistemy upravleniya navigatsionnymi kosmicheskimi apparatami [Complex simulation of automatic control operation for navigation space vehicles]. *Problemy upravleniya i informatiky [Problems of maintenance and information technology]*, no. 5, pp. 103–117. (In Russian)
23. *Gavrilov D. A.* (2002) Upravleniye proizvodstvom na baze standartnogo MRP II [Production control based on MRP II]. St. Petersburg, Publishing House “Peter”, 340 p. (In Russian)
24. *Rother M. & Shook J.* (2005) Uchites videt biznes-protsesty: Praktika postroeniya kart potokov sozdaniya tsennosti [Learning to see: value stream mapping to create value and eliminate muda]. Moscow, Alpina Business Books: CBSD, Tsentrazvitiya delovykh navykov [Center for Developing Business Skills] Publ., 144 p. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии проф. Кокуриным И. М.  
Поступила в редакцию 23.03.2020, принята к публикации 27.03.2020*

*КОТЕНКО Алексей Геннадьевич* — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I  
e-mail: uer@pgups.ru

*КОТЕНКО Оксана Владимировна* — кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I  
e-mail: uer@pgups.ru

© Котенко А. Г., Котенко О. В., 2020

УДК 656.25:004.021

**Д. В. Сперанский, д-р техн. наук**

**А. В. Горелик, д-р техн. наук**

**А. В. Орлов, канд. техн. наук**

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

## **ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕСУРСОВ В ОБЛАСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ**

В статье рассмотрена общая задача оптимального распределения ресурсов подразделений, занимающихся эксплуатацией систем железнодорожной автоматики и телемеханики, для минимизации ущерба, вызванного их ненадежной работой. Предложена математическая модель для ее решения, являющаяся аналогом табличной (матричной) модели, используемой для решения классической транспортной задачи. В качестве метода решения описан адаптированный к рассматриваемой задаче оптимизации метод потенциалов, который детально проиллюстрирован на конкретном примере, приведен подробный пошаговый алгоритм поиска наилучшего решения. В статье также приведены формулировки различных разновидностей задач оптимального распределения ресурсов с возможностью применения «транспортного» подхода, которые возникают в процессе организации работ по технической эксплуатации систем железнодорожной автоматики. Они представляют самостоятельный интерес с точки зрения практических приложений. Кроме того, рассмотрен перечень других методов решения классической транспортной задачи, применимых для задач небольшой размерности.

Поскольку транспортные задачи на практике имеют как раз большие размерности и являются ресурсоемкими, в статье содержится краткий анализ последних публикаций, описывающих возможные подходы к решению. Среди них упомянуты метод снижения размерности и метод последовательной сепарации, которые, по мнению авторов, позволяют сократить сложность вычислений в терминах памяти и времени. Особое внимание уделено перспективности использования эволюционных вычислений, в частности генетических алгоритмов, которые являются итерационными и выдают приближенное решение, стремящееся к оптимальному с ростом числа итераций, что позволяет прерывать расчет при достижении требуемого порядка точности. Также рассматривается возможность применения к генетическим алгоритмам технологии параллельного программирования для прикладных задач оптимального распределения ресурсов по критерию минимизации потерь поездочасов или финансовых потерь, вызванных ненадежной работой при эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры.

Распределение ресурсов, эффективное управление, техническое обслуживание, системы автоматики и телемеханики, классическая транспортная задача, методы оптимизации, задачи большой размерности

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-2-184-203

### **Введение**

Проблема оптимизации различного рода ресурсов была и остается актуальной во все времена и во всех областях производственной деятельности. Не менее

острой она остается, в частности, при организации технического обслуживания систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). Важность поиска эффективного решения для этой сферы объясняется значительными масштабами использования ЖАТ на железнодорожном транспорте. На сети российских железных дорог в эксплуатации находится более 136 тысяч стрелочных электроприводов, более 270 тысяч светофоров, более 28 тысяч автошлагбаумов, множество других систем и устройств [1]. В компании ОАО «Российские железные дороги» планированием технического обслуживания систем ЖАТ и их эксплуатацией занимаются структурные подразделения хозяйства автоматики и телемеханики разного уровня иерархии. В условиях ограниченности ресурсов (финансовых, материальных и др.) и высокой в них потребности для обеспечения требуемого уровня качества функционирования систем ЖАТ проблемы оптимизации ресурсов приобретают особую важность. Трудности в решении этой проблемы для систем ЖАТ усугубляются рядом факторов. К ним относятся недостаточное качество их технической эксплуатации из-за нехватки необходимых ресурсов (несвоевременная замена оборудования, несоблюдение сроков капитального ремонта), превышение назначенного срока службы и т. п. В конечном счете все это сказывается на существенном изменении таких важнейших свойств систем ЖАТ, как надежность и безопасность функционирования, а также сопряженных с этим рисков. Проблема повышения надежности систем ЖАТ всегда вызывала интерес; ряд результатов в данной области приведен в работах [2–11].

Из сказанного вытекает необходимость разработки методов решения задачи оптимального распределения ограниченных ресурсов для организации технического обслуживания систем ЖАТ межструктурными подразделениями и внутри них. Очевидно, что большое число структурных подразделений и систем ЖАТ в границах их производственной деятельности приводит к значительному росту размерности задачи. Это «проклятие размерности», как правило, не позволяет получить не только оптимального, но в большинстве случаев и просто «хорошего» решения, ранее получаемого эмпирическими методами или методами экспертных оценок. Отсюда следует вывод о необходимости разработки математических методов решения задачи оптимального распределения ресурсов, в т. ч. для задач большой размерности, гарантирующих получение либо точного, либо близкого к точному решения. Предлагаемая статья посвящена исследованию именно этих вопросов.

### **Постановка задачи и методы ее решения**

Начнем с описания реальной ситуации, постоянно возникающей при обслуживании систем ЖАТ. Для упрощения рассмотрим один из видов устройств ЖАТ, функционирующих на станциях, например вышеупомянутые стрелочные электроприводы (далее — системы ЖАТ). В границах производственной деятельности структурных подразделений находятся системы ЖАТ, функционирующие на

нескольких станциях. Для каждой из систем ЖАТ известен эффект от проведения различных мероприятий на единицу оборудования (систему). Пусть к каждому стрелочному электроприводу может быть применен следующий перечень мероприятий, изменяющих в разной мере эффект функционирования системы в целом: текущий ремонт на месте (М), ремонт в условиях ремонтно-технологического участка (Р), перестановка в более легкие условия эксплуатации (П).

Из-за ограниченности ресурсов в течение заданного планового периода структурное подразделение может реализовать ограниченное количество мероприятий каждого вида. Требуется так распределить мероприятия по системам ЖАТ, чтобы результирующий эффект был максимальным (минимальным).

Сформулированную задачу далее будем называть задачей распределения ресурсов (ЗРР).

В качестве эффекта для исследуемой задачи может рассматриваться изменение значения риска экономических потерь, вызванных возможными отказами систем ЖАТ, показателя надежности, остаточного ресурса, производительности и т. п. [12,13].

Сформулированная задача является оптимизационной. В зависимости от выбранного критерия эффекта функционирования решение оптимизационной задачи может сводиться к поиску либо минимума, либо максимума. Далее рассматривается пример для случая минимизации критерия суммарного эффекта. Если требуется решить задачу максимизации критерия суммарного эффекта, то возможность перехода к ней от предыдущей задачи вполне очевидна.

Для некоторой конкретной задачи может существовать несколько различных подходов, на основе которых разрабатываются разные методы решения. Покажем, что сформулированная нами задача может быть интерпретирована как один из вариантов классической транспортной задачи Монжа-Канторовича.

Исследованию транспортной задачи посвящено большое число публикаций. Хотя обзор литературы находится вне рамок нашей статьи, укажем тем не менее несколько известных монографий [14–18], либо полностью, либо в значительной мере посвященных транспортной задаче.

В действительности под общим названием «транспортная задача» объединяется широкий круг задач с единой математической моделью. Классическая транспортная задача — о наиболее экономном плане перевозок однородного продукта из пунктов хранения в пункты потребления, она встречается в практических приложениях линейного программирования.

Возвращаясь к сформулированной задаче, отметим следующее. Различные мероприятия с системами ЖАТ, функционирующими на заданном множестве станций, можно интерпретировать как поставки грузов (мероприятий) на эти станции, а сами станции (точнее, системы ЖАТ, функционирующие на них) выступают в роли потребителей. Так, если в качестве эффекта от проводимых мероприятий на конкретной станции использовать изменение риска экономических потерь, то задача сводится к получению его минимального значения.

При этом предполагается, что на общее число мероприятий каждого типа, выполняемых в плановый период, накладываются ограничения (возможности подразделений не безграничны). Нас интересует только конечный результат (минимальное значение риска), а не то, каким путем он достигнут. Понятно, что в общем случае искомый минимум риска в плановый период на каждой конкретной станции может быть достигнут несколькими способами. Один способ от другого отличается как перечнем мероприятий, так и числом реализации каждого мероприятия из перечня. Отсюда следует, что различные мероприятия с системами ЖАТ, функционирующими на рассматриваемом множестве станций, можно интерпретировать как поставки грузов (мероприятий) на эти станции, а сами станции (точнее, системы ЖАТ, функционирующие на них) выступают в роли потребителей. В силу сказанного выше все множество мероприятий можно рассматривать как однородный груз, а сформулированная задача при предложенной интерпретации свелась к классической транспортной задаче.

Заметим, что сформулированная выше ЗРР имеет явно выраженную специфику, обусловленную особенностями распределяемого «груза» (ремонтных мероприятий) и потребностями в нем станций, эксплуатирующих системы ЖАТ.

Ниже будет показана перспективность не только идеи предложенного «транспортного» подхода к решению ЗРР, но и возможности разработки методов решения соответствующих задач большой размерности.

Обратимся теперь к классической транспортной задаче (ТЗ), для решения которой применялись различные подходы и на их основе разработаны различные методы. Так, ТЗ может быть решена симплексным методом [15,17,19], но матрица ограничений задачи очень специфична. Используя эту специфику, удалось разработать специальные методы решения ТЗ, оказавшиеся по трудоемкости эффективнее симплекс-метода.

Известно, что условия ТЗ могут быть представлены в разной форме. Так, возможно представление условий в виде сети или графа, а также в матричной (табличной) форме. Очевидно, что в зависимости от выбранной формы представления условий ТЗ возможны и разные методы решения.

Кратко остановимся на различных методах решения ТЗ. Если условия задачи представлены в виде сети или графа, то для этой формы представления разработаны метод критических путей, а также метод сетевого графика. С детальным описанием этих методов можно ознакомиться в [20].

Для той же формы представления условий ТЗ разработан так называемый венгерский алгоритм [15] ее решения. Он базируется на использовании теории потоков в транспортных сетях (создатели Л. Форд и Д. Фалкерсон) [21]. К «сетевому» также относится так называемый метод вычеркивания циклов.

Разработано много методов решения ТЗ, условия которой представлены в матричной (табличной) форме. Эти методы можно разделить на два класса: приближенные и точные. К приближенным относятся, например, метод северо-западного угла, метод минимального элемента (минимальной стоимости), метод

двойного предпочтения, метод аппроксимации Фогеля [14–18]. К классу точных методов относятся метод потенциалов [14–18], метод дифференциальных рент и дельта-метод.

Из перечисленных выше матричных приближенных методов решения ТЗ самым быстрым и простым является метод северо-западного угла. Однако он не учитывает стоимости перевозки грузов и потому полученные с его помощью решения, как правило, далеки от оптимальных. Остальные приближенные методы обеспечивают решения более высокого качества. Что касается точных матричных методов решения ТЗ, то, к сожалению, все они довольно трудоемки. Отметим, что наиболее часто используемым и популярным среди них является метод потенциалов. В следующем разделе опишем применение этого метода к решению рассматриваемой нами ЗРР.

### Метод потенциалов для решения задачи распределения ресурсов

Обратимся к формулировке ЗРР, приведенной в начале предыдущего раздела. Метод потенциалов для ее решения будет проиллюстрирован на конкретном примере. Дальнейшее изложение предполагает знакомство читателя с методом потенциалов применительно к ТЗ. В нем «потребителями» будут пять станций А, Б, В, Г, Д, а «поставщики» предоставляют возможность проведения трех видов мероприятий, описанных выше и обозначенных как М, Р, П. Исходные данные для рассматриваемого примера представлены в виде таблицы 1.

Таблица 1

Виды мероприятий	Станционные системы					План мероприятий
	А	Б	В	Г	Д	
Ремонт на месте (М)	3	1	3	3	1	2
Ремонт в РТУ (Р)	2	1	0	3	2	3
Перестановка (П)	1	0	0	2	1	2
Потребность	4	2	1	2	3	

Возможности структурного подразделения на плановый период

Количество устройств, для которых по результатам обследования требуется реализация мероприятий

Эффект от мероприятия с единицей оборудования

Прокомментируем данные, приведенные в таблице 1 за рассматриваемый плановый период. За этот период, как указано в последнем столбце таблицы 1, структурные подразделения, выполняющие мероприятия разных типов (М, Р, П), могут провести два ремонта на месте (М), три устройства отправить для ремонта в РТУ (Р) и еще два могут переставить в более легкие условия эксплуатации (П). Эффект от конкретного мероприятия для одного устройства, указанный в правом верхнем углу клетки таблицы, должен быть положительным целым числом. Если эффект выражен дробным числом, то требуется произвести масштабирование данных за счет умножения на коэффициент, равный степени 10, таким образом, чтобы дробь стала целым числом.

Решение ЗРР состоит из трех этапов: первоначальные преобразования таблицы планов-потребностей, первоначальная загрузка клеток, поиск оптимального решения.

#### 1) Первоначальные преобразования таблицы

Выполним проверку соответствия плана мероприятий таблицы 1 потребностям, вычислив следующие величины:

- количество мероприятий по плану  $N = 2 + 3 + 2 = 7$ ;
- потребность в количестве мероприятий  $M = 4 + 2 + 1 + 2 + 3 = 12$ .

Так как  $N \neq M$ , то план является открытым и все потребности не удовлетворяются. Поэтому введем дополнительную строку в таблицу 1 (необеспеченность), в которой указывается разность  $R$  между количеством запланированных мероприятий и требуемым количеством ( $R = 12 - 7 = 5$ ).

В новой строке эффекты для всех станций (А, Б, В, Г, Д) задаются в виде одинакового числа 0. Тогда на основе таблицы 1 строится таблица 2.

#### 2) Первоначальная загрузка клеток

Первоначальная загрузка клеток таблицы позволяет составить опорный план мероприятий, представляющий собой начальное приближенное решение задачи оптимизации, на основе которого в дальнейшем будут генерироваться более близкие к оптимуму решения.

**Таблица 2**

Виды мероприятий	Станционные системы					План мероприятий
	А	Б	В	Г	Д	
Ремонт на месте (М)	3	1	2	3	1	2
Ремонт в РТУ (Р)	2	1	0	3	2	3
Перестановка (П)	1	0	0	2	1	2
Необеспеченность (Н)	0	0	0	0	0	5
Потребность	4	2	1	2	3	

Первоначальная загрузка клеток может выполняться различными приближенными методами. Результат оптимизации от выбора метода первоначальной загрузки клеток не зависит, но влияет на число выполняемых итераций для получения оптимального решения.

Вне зависимости от применяемого способа первоначальная загрузка клеток выполняется по следующей схеме: сначала весь запас из плана полностью заносится в некоторую клетку. Если запас превышает потребность объекта ЖАТ (соответствующего столбца), то разность между потребностью и запасом переносится в любую другую клетку строки.

Например, в строке «Р» таблицы 2 указанный в последнем столбце запас равен трем единицам. Допустим, что загрузка клеток выполняется по методу минимального ненулевого эффекта в углах клеток. Тогда минимум эффекта в строке «Р» находится в клетке (Б, Р) столбца «Б», и он равен 1. Потребность в столбце «Б» равна 2, а запас в строке «Р» равен 3. Следовательно, в клетку (Б, Р) следует поместить 2 единицы, а остаток запаса, равный 1, — в любую другую клетку строки с минимальным эффектом, то есть либо в (А, Р), либо в (Д, Р). Если запаса в соответствующей строке недостаточно для покрытия потребности, то недостаток пополняется в следующей строке.

Следует отметить, что в некоторых случаях метод минимального элемента позволяет еще на этапе первоначальной загрузки получить решение, близкое к оптимальному, поэтому далее воспользуемся им. Загрузку клеток выполним последовательно, начиная с верхней строки. Результат первоначальной загрузки представлен в таблице 3.

Первой загрузим клетку (Д, М). Недостаток потребности столбца «Д» компенсируем в клетке (Д, П) строки «П». Остаток запаса строки «П» занесем в клетку (А, П). В строке (Р) минимальный эффект находится в клетке (Б, Р).

Таблица 3

Виды мероприятий	Станционные системы					План мероприятий (запас)			
	А	Б	В	Г	Д				
Ремонт на месте (М)		3	1	2	3	2	1	2-2 → 0	
Ремонт в РТУ (Р)	1	2	2	1	0	3		2	3-2 → 1 1-1 → 0
Перестановка (П)	1	1	0	0	0	2	1	1	2-1 → 1 1-1 → 0
Необеспеченность (Н)	2	0	0	1	0	2	0	0	5
Потребность	4-1 → 3 3-1 → 2 2-2 → 0	2-2 → 0	1-1 → 0	2-2 → 0	3-2 → 1 1-1 → 0				

Внесем в нее запас в размере потребности столбца «Б», равной 2 единицам. Остаток запаса строки «Р» внесем в клетку (А, Р). По остаточному принципу заполняем строку «Н», которая вводится как дополнение к прежним строкам. Загруженные клетки закрасим оранжевым цветом.

Для того чтобы оптимизационная задача имела решение, в теории на каждом шаге должно быть закрашено  $N + M - 1$  клеток, то есть  $4 + 5 - 1 = 8$ . Как видно из таблицы 3, после первоначальной загрузки закрашено ровно 8 клеток, и, следовательно, дополнительных преобразований не требуется. Если количество загруженных клеток отличается от требуемого, то невозможно правильно расставить потенциалы. Так, при недостатке загруженных клеток для некоторых областей таблицы потенциалы будут не определены, а при избытке они в отдельных областях будут противоречивыми.

Для устранения указанной проблемы необходимо загрузить нулями недостающее количество клеток, не входящих в замкнутые контуры, либо освободить избыточное количество клеток с нулями. При этом загрузка нулями отображается в явном виде в соответствующей клетке.

Данных в таблице 3 достаточно для запуска процесса поиска оптимального решения. Вместе с тем для оценки результативности метода на каждом шаге будем выполнять расчет достигнутого суммарного эффекта. Его будем находить путем умножения загрузки клетки на ее эффект и сложения полученных чисел по всем загруженным клеткам.

Для первоначальной загрузки клеток, показанной в таблице 3, суммарный эффект есть:

$$\begin{aligned} \Theta &= 2 \cdot 1 + 1 \cdot 2 + 2 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 2 \cdot 0 + 1 \cdot 0 + 2 \cdot 0 = \\ &= 2 + 2 + 2 + 1 + 1 + 0 + 0 + 0 = 8 \text{ ед.} \end{aligned}$$

### 3) Поиск оптимального решения

Поиск оптимального решения выполним методом потенциалов. На основе потенциалов формируется критерий оптимального решения. Кроме того, в результате вычисления потенциалов определяются клетки, загрузку которых следует изменить в первую очередь, если решение не оптимально. Первоначально потенциалы вычисляются по загруженным клеткам, а затем на их основе вычисляются потенциалы незагруженных клеток. Признаком оптимального решения является неотрицательность потенциалов всех незагруженных клеток. В качестве клеток, для которых требуется изменить загрузку при поиске оптимального решения, выступают незагруженные клетки с наибольшим отрицательным потенциалом.

Важно, что при расстановке потенциалов величина загрузки в загруженных клетках не учитывается, а используются только эффекты (тарифы) в углах этих клеток (обозначим их как  $c_{ij}$ ). Потенциалы строк и столбцов обозначим соответственно как  $U_i$  и  $V_j$ .

Опишем правило расстановки потенциалов: у всех загруженных клеток результирующий потенциал всегда должен быть равен нулю:

$$z_{ij} = c_{ij} + U_i + V_j = 0. \quad (1)$$

При вычислении потенциалов один из них задается произвольным образом (как правило, его полагают равным 0). Все остальные потенциалы строк и столбцов вычисляются так, чтобы выполнялось равенство (1).

Далее поиск оптимального решения производится по следующему алгоритму.

1. Выполняется первоначальная расстановка потенциалов.
2. Выполняется проверка оптимальности решения.
3. Если полученное решение оптимально, следует перейти к пункту 6, иначе осуществляется поиск нового решения путем формирования контура и перераспределения загрузки клеток, а далее — переход к пункту 4.
4. Выполняется расстановка потенциалов.
5. Осуществляется переход к пункту 2.
6. Окончание поиска оптимального решения.

Для нашего примера зададим потенциал столбца  $U_1$  равным 0 и определим потенциалы остальных строк и столбцов на основе равенства (1). Результат всех этих преобразований представлен в таблице 4.

Для проверки оптимальности плана вычислим потенциалы свободных клеток по формуле (1) с учетом потенциалов строк и столбцов в таблице 3. Полученные результаты представлены в таблице 5.

В таблице 5 имеются свободные клетки с отрицательными потенциалами. Следовательно, план не оптимален и его требуется улучшить. Клеткой, имеющей максимальное значение отрицательного потенциала, является (В, Р). Ее потенциал равен 2. Нужно осуществить изменение загрузки клеток, где клетка (В, Р) будет загружена. Для этого необходимо сформировать цикл перераспределения загрузки клеток. Цикл представляет собой замкнутый контур, получаемый из вертикальных и горизонтальных отрезков прямых. Цикл строят по загруженным клеткам, к которым добавляют одну свободную, участвующую в перераспределении загрузки. На каждой входящей в цикл клетке выполняется его поворот на 90 градусов, при этом цикл может иметь самопересечения. Возможные примеры формы циклов представлены на рисунке 1.

Таблица 4

Виды мероприятий	Станционные системы					$V_j$					
	А	Б	В	Г	Д						
Ремонт на месте (М)		3		1		2	3	2	1	-1	
Ремонт в РТУ (Р)	1	2	2	1		0		3		2	-2
Перестановка (П)	1	1		0		0		2	1	1	-1
Необеспеченность (Н)	2	0		0	1	0	2	0		0	0
$U_i$	0		1		0		0		0		0

Таблица 5

Виды мероприятий	Станционные системы										$V_j$
	А		Б		В		Г		Д		
Ремонт на месте (М)	(2)	3	(1)	1	(1)	2	(2)	3	2	1	-1
Ремонт в РТУ (Р)	1	2	2	1	(-2)	0	(1)	3	(0)	2	-2
Перестановка (П)	1	1	(0)	0	(-1)	0	(1)	2	1	1	-1
Необеспеченность (Н)	2	0	(1)	0	1	0	2	0	(0)	0	0
$U_i$	0		1		0		0		0		

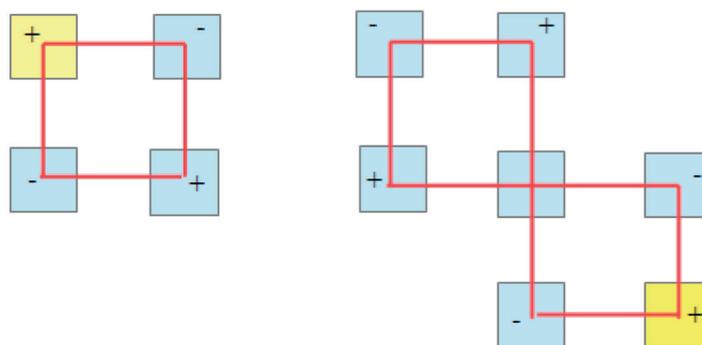


Рис. 1. Пример цикла перераспределения загрузки клеток

Свободная клетка, включенная в цикл, отмечена желтым цветом. В пределах цикла задают знаки, определяющие процесс перезагрузки ячеек. Плюс означает увеличение загрузки клетки, а минус — ее уменьшение (разгрузку). Вновь включенная (желтая) клетка всегда имеет знак (+). Далее в цикле знаки чередуют («+» изменяют на «-» и наоборот) на каждом следующем его повороте. При правильном формировании цикла не должно возникать двух одинаковых знаков у двух соседних изломов, а шаг должен оставаться постоянным.

Сформируем цикл таблицы 5 с учетом новой клетки (В, Р). Результат представлен в таблице 6.

Для выполнения перезагрузки клеток в цикле находят клетки с отрицательным знаком перезагрузки (-). Среди них находят ту, загрузка которой минимальна. Эта загрузка прибавляется к загрузке всех клеток, у которых указан положительный знак перезагрузки (+), и вычитается из клеток с отрицательным знаком перезагрузки (-).

В таблице 6 обе клетки с отрицательным знаком имеют одинаковую загрузку, равную 1. Следовательно, единицу нужно вычесть из загрузки всех клеток, обозначенных как (-), и прибавить к загрузке клеток, обозначенных как (+).

Чтобы сохранилось количество клеток в плане, равное 8, нужно будет освободить одну из ранее загруженных клеток с загрузкой 0. Результат перераспределения загрузки клеток представлен в таблице 7. Таким образом, освобождена клетка (В, Н).

Таблица 6

Виды мероприятий	Станционные системы					$V_j$				
	А	Б	В	Г	Д					
Ремонт на месте (М)		3		1		2	3	2	1	
Ремонт в РТУ (Р)	1	2	2	1		0		3		2
Перестановка (П)	1	1		0		0		2	1	1
Необеспеченность (Н)	2	0		0	1	0	2	0		0
$U_i$										

Таблица 7

Виды мероприятий	Станционные системы					$V_j$				
	А	Б	В	Г	Д					
Ремонт на месте (М)		3		1		2	3	2	1	
Ремонт в РТУ (Р)	1	2	2	1	1	0		3		2
Перестановка (П)	1	1		0		0		2	1	1
Необеспеченность (Н)	2	0		0		0	2	0		0
$U_i$										

Вычислим суммарный эффект для полученного плана распределения ресурсов:

$$\begin{aligned} \Theta &= 2 \cdot 1 + 0 \cdot 2 + 2 \cdot 1 + 1 \cdot 0 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 3 \cdot 0 + 2 \cdot 0 = \\ &= 2 + 0 + 2 + 0 + 1 + 1 + 0 + 0 = 6 \text{ ед.} \end{aligned}$$

Суммарный эффект уменьшился, значит, план, представленный в таблице 8, лучше, чем в таблице 3. Проверим условие оптимальности плана. Для этого вычислим потенциалы строк и столбцов, а затем оценим потенциалы свободных клеток. Результаты представлены в таблице 8.

Таблица 8

Виды мероприятий	Станционные системы										$V_j$
	А		Б		В		Г		Д		
Ремонт на месте (М)	(2)	3	(1)	1	(3)	2	(2)	3	2	1	-1
Ремонт в РТУ (Р)	0	2	2	1	1	0	(1)	3	(0)	2	-2
Перестановка (П)	1	1	(0)	0	(1)	0	(1)	2	1	1	-1
Необеспеченность (Н)	3	0	(1)	0	(2)	0	2	0	(0)	0	0
$U_i$	0		1		2		0		0		

Как видно из таблицы 8, потенциалы всех свободных клеток больше нуля, т. е. полученный план оптимален. Он требует реализации следующих мероприятий:

- на станции А нужно выполнить одну перестановку стрелочного электропривода в иные условия эксплуатации;
- на станции Б отправить два электропривода на ремонт в РТУ;
- на станции В один стрелочный электропривод отправить на ремонт в РТУ;
- на станции Г мероприятия не выполняются;
- на станции Д два стрелочных электропривода необходимо отремонтировать на месте и один переставить.

Суммарная необеспеченность при таком плане распределения ресурсов составит пять мероприятий.

В этом разделе был описан и проиллюстрирован «транспортный» подход к решению ЗРР, сформулированной как аналог классической ТЗ. Помимо ЗРР, интерес с точки зрения возможных приложений могут иметь и другие (модифицированные) задачи подобного типа. В качестве примера назовем аналог ЗРР с ограничениями по времени выполнения мероприятий обслуживания систем ЖАТ, аналог ТЗ с ограничениями пропускной способности, многопродуктовые ТЗ и т. п. Для решения таких модифицированных задач потребуется разработка соответствующих методов, причем «транспортный» подход также может оказаться полезным.

### О решении задач распределения ресурсов большой размерности

Известно, что классические методы и алгоритмы решения многих востребованных задач (разновидности транспортных задач, задач распределения ресурсов и т. п.) не имеют возможности распараллеливания. Вместе с тем время их выполнения характеризуется экспоненциальным ростом с возрастанием размерности задачи. Точные методы решения непригодны для задач большой размерности из-за масштабных временных затрат. Однако именно сегодня есть

острая потребность в эффективных алгоритмах для решения оптимизационных задач, связанных с обработкой больших массивов информации. Таким образом, решение задач вышеупомянутых типов становится актуальным.

Заметим, что интерес к проблеме решения оптимизационных задач большой размерности начал проявляться довольно давно, и для ее решения предлагались разные подходы. Так, в работе [22], опубликованной в 1974 году, предложен метод решения производственно-транспортной задачи многопродуктового типа путем ее декомпозиции на подзадачи транспортного типа для каждого продукта. Понятно, что при таком подходе исходная задача сводится к решению более простых ТЗ для каждого продукта в отдельности, что и приводит к сокращению общего времени решения.

Известны также публикации, например [23,24], в которых сообщается об использовании для решения задач большой размерности готовых пакетов программ *MathCAD* и *Microsoft Excel*. В качестве примеров таких задач приводятся задачи размерности  $20 \times 25$  (*MathCAD*) и  $10 \times 20$  (*MsExcel*). Представляется, что ответ на вопрос, считать ли эти размерности большими, весьма неоднозначен.

Остановимся еще на одной публикации [25], также посвященной обсуждаемой проблеме. Ее автор разработал метод последовательной сепарации (ПС-метод), на основе которого, как утверждается, удастся существенно сократить потребность в большой оперативной памяти компьютера. Автор указывает, что для ТЗ размерности  $1000 \times 1000$  вместо  $10^6$  значений требуется хранить только 2002, остальные являются нулевыми. Согласно выводам, приведенным в [25], на основе ПС-метода создана программа решения задачи о назначениях большой размерности с использованием СУБД FOX-PRO. Что касается времени вычислений по созданной программе и объема необходимой оперативной памяти, то эти сведения в публикации отсутствуют. Компьютерная программа для решения ТЗ большой размерности, как следует из текста статьи, на момент публикации отсутствовала. Попытки найти сведения о создании такой программы после публикации [25] и о результатах ее апробации не увенчались успехом. К сожалению, отсутствие убедительных реальных статистических данных об эффективности предложенного в [25] подхода к задачам с *big data* делают авторские оценки этого подхода декларативными.

Известно, что многие актуальные оптимизационные задачи, к числу которых относится и ТЗ, в случае их большой размерности требуют для решения традиционными методами очень серьезных временных затрат. В этой ситуации альтернативным подходом к решению упомянутых задач становится применение методов, базирующихся на методологии эволюционных вычислений [26]. Имеющаяся ныне практика применения такого подхода в различных областях подтверждает его высокую эффективность и перспективность.

В качестве примера укажем на публикацию [27], в которой проведена оценка эффективности стандартного генетического алгоритма (ГА). Такая оценка осуществлена на репрезентативном множестве из девяти тестовых задач, отра-

жающих главные проблемы при решении сложных задач оптимизации. В [27] отмечается, что решение таких задач требует тщательного выбора конфигурации ГА (набора операторов, настройки параметров). Из результатов тестирования следует, что для всех рассмотренных тестовых задач удается найти эффективный, т. е. надежный и быстрый вариант ГА.

В развитии современной компьютерной техники имеются две основные тенденции. Одна из них — значительное снижение в последние годы роста частоты процессоров, вторая — появление возможности хранения больших объемов информации. Снижение роста быстродействия процессоров обусловлено достижением технологического предела нанометровых технологий. Вместе с тем появилась возможность размещения на одном кристалле большого количества процессорных ядер. Очевидно, что одновременное использование этих ядер для уменьшения временных затрат на реализацию алгоритмов возможно только в том случае, если исполняемые алгоритмы являются параллельными. Сказанное позволяет сделать вывод, что один из возможных путей решения задач большой размерности связан с разработкой процедур распараллеливания известных эволюционных алгоритмов для их решения. Разработкой методов параллельных вычислений, в частности, при использовании генетических алгоритмов, относящихся к классу эволюционных, занимается раздел науки, называемый распределенными вычислениями. В области генетических алгоритмов такие исследования ведутся уже около 20 лет [28].

В качестве подтверждения успешного продвижения к решению проблемы распараллеливания ГА для решения ТЗ относятся результаты, полученные в [29]. В этой статье приводятся данные о применении разработанного автором параллельного ГА для решения ТЗ размерности  $100 \times 100$ . Принадлежность такой задачи к классу задач большой размерности сомнений не вызывает. Это дает основания говорить о перспективности направления, связанного с разработкой параллельных ГА, для решения задач распределения ресурсов.

## **Заключение**

Проблема оптимизации ресурсов в процессе эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры сегодня весьма актуальна, можно даже сказать, злободневна. Суть ее заключается в ограниченности ресурсов — финансовых, технических и трудовых, неравномерном и нерациональном их распределении, а также в критическом ухудшении производственных показателей и устаревании оборудования, что непосредственно влияет на надежность и безопасность. Причины же, как правило, носят организационный характер.

В свете быстрого развития информационных технологий использовавшиеся прежде в транспортной отрасли эвристические подходы к управлению ресурсами становятся малоэффективными. Требуются новые инновационные решения. Все больше внимания уделяется разработке строго математических

методологий и формализации процесса технического обслуживания путем оптимизационного и статистического моделирования и разработки соответствующего программного обеспечения. Применение математических методов с прогнозируемым результатом, разработка отраслевых стандартов планирования и создание информационно-управляющих систем может привести к значительным выгодам — повышению экономической эффективности технического управления и снижению затрат.

Методы оптимизации являются мощным инструментом для эффективного управления материальными и финансовыми ресурсами на железнодорожном транспорте. Однако планирование обслуживания железнодорожных транспортных систем — чрезвычайно трудная оптимизационная задача в силу комбинаторной сложности и большой размерности. Кроме того, формулировки отдельных подзадач должны быть обобщенными, универсальными и распространяться на различные транспортные системы, принадлежащие к одному подмножеству (как всевозможные подсистемы железнодорожной автоматики и телемеханики). В связи с этим требуются дополнительные исследования, в т. ч. разработка новых методов снижения размерности поставленных задач оптимизации, применение технологии параллельных вычислений при их решении. Такой подход станет хорошим примером практической реализации алгоритмов анализа больших данных (big data), использования предиктивной и прескриптивной аналитики для эффективного управления инфраструктурным комплексом железнодорожного транспорта.

### Библиографический список

1. *Минаков Д. Е.* Методы построения и технической эксплуатации электромеханических устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: дисс. ... канд. техн. наук, специальность: 05.22.08 / Д. Е. Минаков. — М.: МИИТ, 2015. — 188 с.
2. *Горелик А. В.* Модели оценки технологической эффективности систем железнодорожной автоматики и телемеханики / А. В. Горелик, П. А. Неваров, И. А. Журавлев, А. С. Веселова // Автоматика на транспорте. — 2015. — Т. 1, № 2. — С. 143–155.
3. *Горелик А. В.* Анализ показателей надежности функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики с учетом экономических критериев / А. В. Горелик, П. А. Неваров // Автоматика на транспорте. — 2015. — Т. 1, № 3. — С. 271–281.
4. *Шаманов В. И.* Обобщенная математическая модель процесса эксплуатации систем автоматики и телемеханики / В. И. Шаманов // Автоматика на транспорте. — 2016. — Т. 2, № 2. — С. 163–179.
5. *Шаманов В. И.* Методы оптимизации технического обслуживания систем автоматики / В. И. Шаманов // Автоматика на транспорте. — 2016. — Т. 2, № 4. — С. 481–496.
6. *Шаманов В. И.* Математические модели надежности систем железнодорожной автоматики и телемеханики / В. И. Шаманов // Автоматика на транспорте. — 2017. — Т. 3, № 1. — С. 7–19.

7. *Володарский В. А.* Стратегии, критерии и расчет периодичности замен аппаратуры автоматики и телемеханики / В. А. Володарский // Автоматика на транспорте. — 2017. — Т. 3, № 2. — С. 165–177.
8. *Горелик А. В.* Оценка качества технической эксплуатации систем железнодорожной автоматики и телемеханики / А. В. Горелик, Н. А. Тарадин, А. С. Веселова, Д. В. Солдатов // Автоматика на транспорте. — 2017. — Т. 3, № 3. — С. 319–334.
9. *Володарский В. А.* Исследование надежности постовых устройств микропроцессорной централизации EBI Lock 950 / В. А. Володарский // Автоматика на транспорте. — 2017. — Т. 3, № 4. — С. 477–490.
10. *Богданов А. Г.* Принципы сбора данных об отказах элементов систем управления транспортными средствами / А. Г. Богданов, Д. А. Скороходов // Автоматика на транспорте. — 2017. — Т. 3, № 4. — С. 491–505.
11. *Володарский В. А.* Надежность аппаратуры автоматики и телемеханики, прошедшей ремонт / В. А. Володарский // Автоматика на транспорте. — 2018. — Т. 4, № 1. — С. 18–29.
12. *Gorelik A. V.* Assessment of operational risks of electric interlocking systems / A. V. Gorelik, V. Y. Gorelik, D. V. Shalyagin // Russian Electrical Engineering. — 2018. — Vol. 89, N 9. — P. 550–554.
13. *Горелик А. В.* Принципы управления качеством функционирования инфраструктуры в хозяйстве автоматики и телемеханики / А. В. Горелик, В. В. Аношкин, А. В. Орлов, Н. А. Тарадин, А. С. Веселова // Железнодорожный транспорт. — 2018. — № 9. — С. 55–61.
14. *Frank H.* Communication, transmission and transportation networks / H. Frank, I. Frisch. — Massachusetts: Adison Wesley, Reading, 1971.
15. *Dantzig G. B.* Linear programming and extension / G. B. Dantzig. — Princeton, New Jersey, 1963.
16. *Нестеров Е. П.* Транспортная задача линейного программирования / Е. П. Нестеров. — М.: Транспорт, 1971. — 216 с.
17. *Романовский И. В.* Алгоритмы решения экстремальных задач / И. В. Романовский. — М.: Наука, 1977. — 352 с.
18. *Patts R. B.* Flows in Transportations Networks / R. B. Patts, R. V. Oliver. — New York: Academic Press, 1972.
19. *Vanderbei R. J.* Linear Programming: Foundations and Extensions / R. J. Vanderbei. — New York: Princeton University, 2001. — 450 p.
20. *Minieka E.* Optimization Algorithms for Networks and Graphs / E. Minieka. — New York, Basel: Marcel Dekker Inc., 1978.
21. *Ford L. R.* Flows in networks / L. R. Ford, D. R. Fulkerson. — Princeton: Princeton Press, 1962.
22. *Дубовский С. В.* О решении производственно-транспортной задачи большой размерности / С. В. Дубовский, С. С. Серов // Автоматика и телемеханика. — 1974. — № 7. — С. 121–124.
23. *Фурина К. О.* О решении задач большой размерности в пакете МATHCAD на примере транспортной задачи / К. О. Фурина // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 1–1. — С. 179–194.
24. *Шульгина-Тарашук А. С.* Решение транспортной задачи с помощью программного обеспечения / А. С. Шульгина-Тарашук // Молодой ученый. — 2016. — № 12. — С. 67–70.

25. Петрунин С. В. О решении транспортной задачи большой размерности / С. В. Петрунин // Научный вестник МГТУ ГА. — 2008. — № 131. — С. 183–185.
26. Скобцов Ю. А. Эволюционные вычисления: учебное пособие / Ю. А. Скобцов, Д. В. Сперанский. — М.: Национальный открытый университет «ИНТУИТ», 2015. — 326 с.
27. Гордиенко М. В. Об исследовании эффективности стандартного генетического алгоритма / М. В. Гордиенко // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. — 2016. — Т. 1, № 12. — С. 492–494.
28. Кныш Д. С. Параллельные генетические алгоритмы: обзор и состояние проблемы / Д. С. Кныш, В. М. Курейчик // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2010. — № 4. — С. 72–82.
29. Емельянова Т. С. Применение генетических алгоритмов для решения транспортной задачи линейного программирования / Т. С. Емельянова // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. — 2006. — № 3. — С. 15–29.

**D. V. Speranskiy**

**A. V. Gorelik**

**A. V. Orlov**

*Chair of "Transport Infrastructure Control Systems",  
Russian University of Transport, Moscow*

## **TASKS OF RESOURCE OPTIMIZATION IN THE SPHERE OF AUTOMATION AND REMOTE CONTROL SYSTEMS MAINTENANCE**

A common task of optimal distribution of resources of subdivisions, involved with automation and remote control systems maintenance, was considered in the article in order to minimize losses caused by their unreliable performance. A mathematical model for the solution of the given problem being a prototype of the table (matrix) model, used for the solution of a classical transportation model, was proposed. The method of potentials, adapted to the stated optimization task, was described as the solution technique; the former was illustrated in detail by means of a case study. An extensive step-by-step search algorithm for an optimal solution was given. Various task modifications for optimal resource distribution, occurring in the process of maintenance organization for railway automation systems, were also stated in the article, with possibility of "transportation" approach application. The former are of interest from the point of view of practical applications. Moreover, a list of other methods for the solution of classical transportation problems, applicable for low-dimensionality tasks, was considered in the article.

As transportation tasks are of high dimensionality as well as resource-demanding in actual practice the article contains an analysis of the latest publications, describing possible solution approaches. The methods of dimension reduction and consequent separation were also mentioned in the study and, according to the authors' opinion, make it possible to reduce computational complexity in terms of data store and time. Special attention was given to application availability of evolutionary computations, particularly genetic algorithms; the latter are iterative and give an approximate, tending to optimal, solution with the number of iterations on the rise, making it possible to discontinue computation if the required order of accuracy is reached. The possibility of using the concurrent programming technology for genetic algorithms was also considered for applied tasks of optimal resource distribution according to the minimizing criterion of train-hours or financial losses, caused by unreliable performance during maintenance of transportation facilities.

Resource distribution, effective management, maintenance, automation and remote control systems, classical transportation task, optimization methods, high dimensionality tasks

## References

1. *Minakov D. E.* (2015) *Metody postroeniya i tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki* [Design methods and maintenance of electro-mechanical devices for railway automation and remote control]. Dis. ... Cand. Sci. (Eng.), specialty: 05.22.08. Moscow, MIIT [Russian University of Transport] Publ., 188 p. (In Russian)
2. *Gorelik A. V., Nevarov P. A., Zhuravlev I. A. & Veselova A. S.* (2015) Modely otsenki tekhnologicheskoy effektivnosti system zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Evaluation models for technological efficiency of railway automation and remote control systems]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], vol. 1, no. 2, pp. 143–155. (In Russian)
3. *Gorelik A. V. & Nevarov P. A.* (2015) Analiz pokazateley nadezhnosti funktsionirovaniya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki s uchetom ekonomicheskikh kriteriev [Reliability performance analysis of railway automation and remote control systems based on economic criteria]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], vol. 1, no. 3, pp. 271–281. (In Russian)
4. *Shamanov V. I.* (2016) Obobshchennaya matematicheskaya model protsessa ekspluatatsii sistem avtomatiki i telemekhaniki [Generic mathematical model of railway automation and remote control systems operational process]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], vol. 2, no. 2, pp. 163–179. (In Russian)
5. *Shamanov V. I.* (2016) Metody optimizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniya sistem avtomatiki [Optimization procedures for maintenance of automation systems]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], vol. 2, no. 4, pp. 481–496. (In Russian)
6. *Shamanov V. I.* (2017) Matematicheskiye modely nadezhnosti system zheznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Mathematical models of railway automation and remote control systems reliability]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], vol. 3, no. 1, pp. 7–19. (In Russian)
7. *Volodarskiy V. A.* (2017) Strategii, kriterii i raschet periodichnosti zamen apparatury avtmatiki i telemekhaniki [Strategies, criteria and calculation of change interval for automation and remote control equipment]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], vol. 3, no. 2, pp. 165–177. (In Russian)
8. *Gorelik A. V., Taradin N. A., Veselova A. S. & Soldatov D. V.* (2017) Otsenka kachestva tekhnicheskoy ekspluatatsii sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Technical maintenance quality assessment of railway automation and remote control systems]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], vol. 3, no. 3, pp. 319–334. (In Russian)
9. *Volodarskiy V. A.* (2017) Issledovaniye nadezhnosti postovykh ustroystv mikroprotsessornoy tsentralizatsii EBILock 950 [Reliability research of tower equipment of computer-based interlocking EBILock 950]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], vol. 3, no. 4, pp. 477–490. (In Russian)
10. *Bogdanov A. G. & Skorokhodov D. A.* (2017) Printsipy sbora dannykh ob otkazakh elementov sistem upravleniya transportnymi sredstvami [Data acquisition principles of component failure in transport control systems]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], vol. 3, no. 4, pp. 491–505. (In Russian)

11. Volodarskiy V. A. (2018) Nadezhnost apparatury avtomatiki i telemekhaniki, proshedshey remont [Reliability of overhauled railway automation and remote control equipment]. *Avtomatika na transporte [Transport automation]*, vol. 4, no. 1, pp. 18–29. (In Russian)
12. Gorelik A. V., Gorelik V. Y. & Shalyagin D. V. (2018) Assessment of operational risks of electric interlocking systems. *Russian Electrical Engineering*, vol. 89, no. 9, pp. 550–554.
13. Gorelik A. V., Anoshkin V. V., Orlov A. V., Taradin N. A. & Veselova A. S. (2018) Printsipy upravleniya kachestvom funktsionirovaniya infrastruktury v khozyaistve avtomatiki i telemekhaniki [Operation quality control principles of infrastructure in the economy of automation and remote control]. *Zheleznodorozhniy transport [Railroad transport]*, no. 9, pp. 55–61. (In Russian)
14. Frank H. & Frisch I. (1971) Communication, transmission and transportation networks. Massachusetts, Adison Wesley, Reading Publ.
15. Dantzig G. B. (1963) Linear programming and extension. Princeton, New Jersey.
16. Nesterov E. P. (1971) Transportnaya zadacha lineinogo programmirovaniya [Transportation aim of linear programming]. Moscow, Transport Publ., 216 p. (In Russian)
17. Romanovskiy I. V. (1977) Algoritmy resheniya ekstremalnykh zadach [Solution algorithms for extrema problems]. Moscow, Nauka [Science] Publ., 352 p. (In Russian)
18. Patts R. B. & Oliver R. V. (1972) Flows in Transportations Networks. New York, Academic Press.
19. Vanderbei R. J. (2001) Linear Programming: Foundations and Extensions. New York, Princeton University Publ., 450 p.
20. Minioka E. (1978) Optimization Algorithms for Networks and Graphs. New York, Basel, Marcel Dekker Inc.
21. Ford L. R. & Fulkerson D. R. (1962) Flows in networks. Princeton, Princeton Press.
22. Dubovskiy S. V. & Serov S. S. (1974) O reshenii proizvodstvenno-transportnoy zadachy bolshoy razmernosti [On industrial and traffic high dimensionality problem solving]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and remote control]*, no. 7, pp. 121–124. (In Russian)
23. Furina K. O. (2015) O reshenii zadach bolshoy razmernosti v pakete MATHCAD na primere transportnoy zadachy [High dimensionality problem solving in MATHCAD software by the example of transportation task]. *Sovremenniy problem nauky i obrazovaniya [Modern issues of science and education]*, no. 1–1, pp. 179–194. (In Russian)
24. Shulgina-Tarashchuk A. S. (2016) Resheniye transportnoy zadachy s pomoshchyu [Transportation problem solving via software]. *Molodoy ucheniy [Young scientist]*, no. 12, pp. 67–70. (In Russian)
25. Petrunin S. V. (2008) O reshenii transportnoy zadachy bolshoy razmernosti [On high dimensionality transportation problem solving]. *Nauchniy vestnik MGTU GA [Bulletin of Moscow State Technical University of Civil Aviation]*, no. 131, pp. 183–185. (In Russian)
26. Scobtsov Y. A. & Speranskiy D. V. (2015) Evolyutsionniye vychisleniya [Evolutionary computation]. Uchebnoye posobiye [Teaching aid]. Moscow, National Open University “INTUIT”, 326 p. (In Russian)
27. Gordienko M. V. (2016) Ob issledovanii effektivnosti standartnogo geneticheskogo algoritma [The study of standard genetic algorithm efficiency]. *Aktualniye problem aviatsii i kosmokratiki [Relevant issues of aviation and space exploration]*, vol. 1, no. 12, pp. 492–494. (In Russian)
28. Knysh D. S. & Kureichik V. M. (2010) Parallelniye geneticheskiye algoritmy: obzor i sostoyaniye problem [Parallel genetic algorithms: review and problem state]. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya [Proceedings of Russian Academy of Sciences. Theory control systems]*, no. 4, pp. 72–82. (In Russian)

29. *Emelyanova T. S.* (2006) *Primeneniye geneticheskikh algoritmov dlya resheniya transportnoy zadachy programmirovaniya* [Application of genetic algorithms for the solution of linear programming transportation problem]. *Perspektivniye informatsionniye tekhnologii i intellektualniye sistemy* [Long-term information technologies and intelligent systems], no. 3, pp. 15–29. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии В. А. Ходаковским  
Поступила в редакцию 24.06.2019, принята к публикации 12.03.2020*

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

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

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

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

УДК 004.492

**Д. С. Марков, канд. техн. наук**  
**М. Б. Соколов, канд. техн. наук**  
**В. Б. Соколов, канд. техн. наук**

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

## **ФОРМАЛИЗОВАННАЯ СХЕМА ПРОЦЕССА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ**

На основе дискретной аппроксимации непрерывного сигнала приведена формализованная схема имитационной модели рельсовой линии как основного компонента базы знаний гибридной экспертной системы анализа работы тональной рельсовой цепи. Дана дискретная модель непрерывного входного сигнала и аналитические выражения его преобразования выделенными элементами рельсовой линии в виде массивов точечных значений аппроксимированного сигнала. Предложено деление рельсовой линии на отрезки, представленные в имитационной модели схемами замещения. Это обеспечило адекватность моделирования шунтового и контрольного режимов работы рельсовой цепи.

В формализованной схеме на аналитическом и алгоритмическом уровне учтено влияние смежных и соседних рельсовых цепей бесстыкового пути. Математическая схема позволила использовать метод процессного моделирования для синтеза имитационной модели обработки непрерывного сигнала в рельсовой линии. Чтобы обеспечить адекватность процессной имитационной модели, в формализованную схему рельсовой линии введены аналитические выражения для учета мешающих факторов. На базе приведенных в работе аналитических выражений предложено множество операторов и логических условий алфавита логических схем алгоритмов. С использованием предлагаемого алфавита разработано формализованное описание функционирования рельсовой линии в различных режимах работы (нормальном, шунтовом, контрольном, автоматической локомотивной сигнализации и короткого замыкания) на языке логических схем алгоритмов. Он обеспечивает сравнительную простоту процедур перехода к программной реализации процессной имитационной модели рельсовой линии бесстыковых тональных рельсовых цепей.

Процессное моделирование, тональная рельсовая цепь, рельсовая линия, схема замещения, формализованное описание, гибридная экспертная система

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-2-204-221

### **Введение**

Рельсовые цепи — одни из самых распространенных и сложных устройств железнодорожной автоматики. При современном проектировании систем автоблокировки и электрической централизации предпочтение отдается тональным рельсовым цепям (ТРЦ). Актуальны задачи, направленные на повышение надежности и эффективности технической эксплуатации, обучение, совершенствование методов анализа схемных решений и расчета регулировочных характеристик, развитие систем мониторинга и диагностики технического состояния тональных рельсовых цепей.

Анализу работы тональных рельсовых цепей посвящены [1–6, 25–30] и др. Вопросы автоматизации процесса их проектирования рассмотрены в [7–9]. О проблемах экспертизы и испытаний на безопасность систем железнодорожной автоматики и телемеханики см. [10–12]. При этом практически нет публикаций на тему интеллектуализации решения задач анализа и оптимизации параметров рельсовых цепей в различных режимах работы.

В связи с этим актуальной представляется разработка гибридной экспертной системы анализа работы тональной рельсовой цепи (ГЭС ТРЦ). Основа базы знаний данной ГЭС — имитационная модель ТРЦ (ИМ ТРЦ), предложенная авторами в [13]. Данная имитационная модель является процессной, непрерывной, детерминированной и структурно-функциональной. Авторы предложили для нее название — «Процессная модель тональной рельсовой цепи» (ПМТРЦ).

В ее основе воспроизведение процесса преобразования непрерывного сигнала функциональными блоками [14] рельсовой цепи как электрической схемы: блоки рельсовой линии, путевого генератора, путевого фильтра, кабельной линии на питающем и релейном концах, аппаратуры согласования и защиты, элементов подключения схемы кодирования.

С точки зрения обеспечения адекватности ПМТРЦ самым сложным представляется функциональный блок рельсовой линии. Она обладает следующими особенностями:

- зависимостью от параметров соседних и смежных линий;
- зависимостью от параметров рельсовой линии параллельного пути;
- неравномерно распределенными параметрами;
- влиянием мешающих факторов воздействия внешней среды (климатических, мощных электромагнитных воздействий и т. д.).

В ранее разработанной процессной модели рельсовой линии (ПМРЛ) недостаточно внимания уделялось моделированию влияния соседних рельсовых цепей и неисправностей рельсовой линии. Данная работа направлена на устранение указанных недостатков и совершенствование ПМРЛ. В соответствии с этим предлагается формализованная схема процессной имитационной модели рельсовой линии, включающей аналитические модели ее элементов в различных режимах функционирования, объединенных в единую имитационную модель моделирующим алгоритмом, формализованным на языке логических схем алгоритмов (ЛСА). Такая форма представления алгоритмов обеспечивает сравнительную простоту последующей программной реализации.

## 1. Основные положения

Основу процессной модели рельсовой линии составляют методология и алгоритмы дискретного представления и преобразований непрерывного сигнала в рельсовой линии [13]. Она представляет собой длинную линию с распределенными параметрами [3], для которой наиболее характерны процессы затухания

и фазового сдвига сигнала. Тогда рельсовая линия представляется в виде классической схемы замещения (рис. 1), где выделены блоки, отображающие процессы затухания (рис. 1,  $RL$ -контур) и фазового сдвига (рис. 1,  $RC$ -контур) сигнала [15, 16].

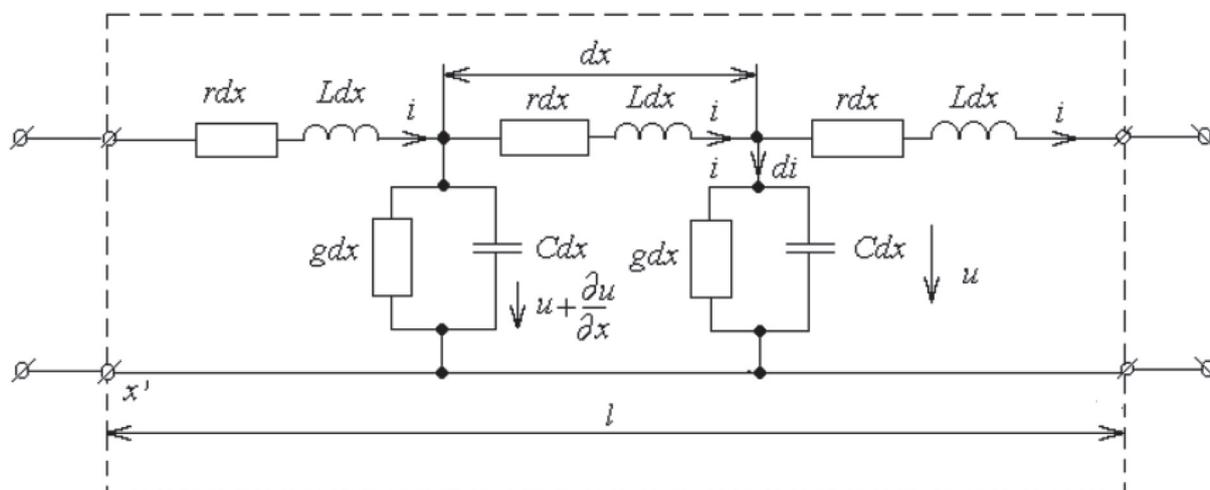
Для обеспечения адекватности процессной модели рельсовой линии по отношению к натурным измерениям в контрольном, шунтовом режимах, а также режиме автоматической локомотивной сигнализации (АЛС), целесообразно разделить линию на элементы  $dx$ , каждый из которых изображается схемой замещения и в ПМРЛ представляется как функциональный блок. Необходимое количество элементов  $dx$  определяется требуемой точностью отображения непрерывного сигнала в процессной модели рельсовой линии.

Модель непрерывного сигнала рельсовой линии представляется в виде множества значений уровней напряжений, рассчитываемых по аналитическим выражениям. Формирование модели непрерывного сигнала производится на основе первичных (сопротивление рельсов  $r$ , Ом/км, проводимость изоляции  $g$ , См/км, удельная индуктивность рельсов  $L$ , Гн/км, емкость рельсовой петли  $C$ , Ф/км), вторичных (волновое или характеристическое сопротивление цепи  $Z_в$ , Ом, коэффициент распространения волны  $\gamma = \alpha + j\beta$ , фазовая скорость  $v$ , длина волны  $\lambda$ ) параметров рельсовой линии.

Весь интервал моделирования разбивается на точки (отсчеты времени), для которых рассчитываются значения уровней напряжений. Согласно теореме Котельникова, любой непрерывный сигнал может быть восстановлен без потерь по своим дискретам, взятым с частотой не менее удвоенной максимальной частоты спектра этого сигнала. На примере ТРЦЗ максимальная частота равняется 780 Гц, поэтому период дискретизации составляет:

$$T_{\text{ДИСКР}} \leq \frac{5}{2 \cdot F_{\text{МАХ}}} = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ [с]},$$

где  $F_{\text{МАХ}}$  — верхняя частота в спектре сигналов.



**Рис. 1.** Схема замещения рельсовой линии

## 2. Алгоритм моделирования рельсовой линии в нормальном режиме

Алгоритм моделирования непрерывного сигнала рельсовой линии предполагает наличие следующих условий.

1. Непрерывный сигнал на входе каждого элемента  $dx$  представляется в виде массива значений уровней напряжений.

2. Использование для расчета всех возможных режимов рельсовой цепи общих исходных данных:

- длины рельсовой линии;
- удельного сопротивления рельсов;
- удельного сопротивления изоляции рельсовой линии;
- несущей и манипулирующей частот;
- напряжения и тока срабатывания реле;
- сопротивления путевого приемника;
- длины кабеля;
- удельного сопротивления кабеля;
- длины элементарного участка  $dx$ .

3. Построение модели элемента  $dx$ :

– элемент  $dx$  (рис. 1) представлен схемой замещения как функциональный блок, преобразование в котором определяется аналитическими выражениями, описывающими изменение сигнала в схеме элемента  $dx$  [17].

4. Построение модели рельсовой линии:

- модель рельсовой линии строится как цепочечное соединение элементов  $dx$ , при этом выходной массив значений уровней напряжения предыдущего элемента  $dx$  является входным массивом последующего элемента  $dx$ ;
- количество элементов  $dx$  определяется длиной линии.

5. Учет влияющей рельсовой линии:

- влияющий сигнал распространяется в зоне дополнительного шунтирования на границе двух рельсовых линий;
- исходя из условий максимального значения длины зоны дополнительного шунтирования рельсовой цепи на минимальной частоте несущего сигнала, зона влияния принимается длиной 40 м;
- значения из массива сигнала влияющей рельсовой линии суммируются со значениями из массива сигнала моделируемой рельсовой линии в зоне дополнительного шунтирования, искажая и меняя его форму и сдвигая фазу.

6. Преобразование непрерывного сигнала рельсовой линии в различных режимах работы рельсовой цепи.

В шунтовом режиме работы рельсовой цепи:

- значения элементов массива непрерывного сигнала рельсовой цепи (уровень сигнала) на расстоянии  $(n \cdot dx)$  наложения шунта изменяются под влиянием сопротивления 0,06 Ом; с учетом полученного массива значений определяется уровень непрерывного сигнала рельсовой цепи на приемном конце.

В контрольном режиме работы рельсовой цепи:

— значения элементов массива непрерывного сигнала рельсовой цепи на расстоянии  $(n \cdot dx)$  обрыва или излома рельса изменяются под влиянием критического сопротивления изоляции в контрольном режиме; с учетом полученного массива значений определяется уровень непрерывного сигнала рельсовой цепи на приемном конце.

В режиме автоматической локомотивной сигнализации (АЛС):

— использование аналитических выражений для моделирования нормативного шунта и частотного сигнала АЛСН;

— значения элементов массива непрерывного сигнала рельсовой цепи на расстоянии ее длины изменяются под влиянием сопротивления 0,06 Ом; с учетом полученного массива значений определяется уровень сигнала автоматической локомотивной сигнализации на приемном конце.

В режиме короткого замыкания:

— значения элементов массива непрерывного сигнала рельсовой цепи на питающем конце изменяются под влиянием сопротивления 0,06 Ом; с учетом полученного массива значений определяется уровень непрерывного сигнала рельсовой цепи на приемном конце.

Исходя из вышеперечисленных условий, рассмотрим описание алгоритма моделирования рельсовой линии в нормальном режиме с использованием языка ЛСА [18].

Алгоритм моделирования непрерывного сигнала рельсовой линии предполагает наличие следующих операторов (А) и логических условий ( $\acute{\alpha}$ ):

A1 — оператор «начало моделирования»;

$\acute{\alpha}2$  — условие выбора ветви алгоритма для рассчитываемой либо влияющей рельсовой цепи;

A3–A6 — операторы ввода исходных данных модели: уровень входного сигнала РЛ ( $U_{ВХ}$ ), характеристическое сопротивление рельсовой линии ( $Z_{РЛ}$ ), сопротивление изоляции РЛ ( $r_{И}$ ), длина РЛ ( $l_{РЛ}$ ), несущая частота входного сигнала РЛ ( $f$ ), элементарный интервал времени ( $\Delta t$ ), временной интервал работы модели ( $T_M$ ), единичный отсчет значения входного сигнала ( $j$ ), единичный элементарный участок  $dx$  ( $k$ ), количество участков  $dx$  ( $K$ ), длина участка  $dx$ ;

A7 — оператор задания начальных значений  $j$  и  $k$ ;

$\acute{\alpha}8$  — условие, определяющее цикл;

A9, A10,  $\acute{\alpha}11$ , A12, A13 A14 — операторы и условия, составляющие тело цикла. Выполняют расчет значений входного сигнала моделированной либо влияющей рельсовой линии ( $U(j) = U_{ВХ} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot j)$ ), формирование массива значений входного сигнала ( $U_{ВХj} = U(j \cdot \Delta t)$ ), хранение массива значений ( $U_{ВХj} \in U_j$ ).

Сигнал на входе рельсовой линии будет ослаблен на величину падения напряжения в соединительных  $R_{СП}$  проводах и на защитном резисторе  $R_3$ . Кроме того, сигнал на выходе питающего конца распространяется в обе стороны бесстыковой рельсовой цепи, и появляется необходимость учета потерь тока на входе рельсовой

линии. Значение потерь зависит от волновых сопротивлений смежной и соседней линий,  $Z_{B\_CM}, Z_{B\_C}$ , входных сопротивлений релейного (РК) и питающего (ПК) концов соседней и смежной рельсовых цепей,  $Z_{ВХ\_РК\_С}, Z_{ВХ\_ПК\_СМ}$ , входных сопротивлений смежной и соседней рельсовых линий  $Z_{ВХ\_РЛ\_СМ}, Z_{ВХ\_РЛ\_С}$  [19–24].

Учитывая, что нагрузкой питающего конца является последовательно-параллельное соединение сопротивлений ответвлений А и В (см. рис. 2.), найдем их значения по выражениям:

$$\begin{aligned}
 A &= Z_{\text{МОД}} + \frac{z_{\text{ВХ.ПК}} \cdot z_{\text{ВХ.ПК.С}}}{z_{\text{ВХ.ПК.С}} + z_{\text{ВХ.ПК}}} \text{ [Ом]}, \\
 B &= Z_{\text{СМ}} + \frac{z_{\text{ВХ.ПК.СМ}} \cdot z_{\text{В.С}_2}}{z_{\text{В.С}_2} + z_{\text{ВХ.ПК.СМ}}} \text{ [Ом]}, \\
 C &= Z_{\text{С}} + \frac{z_{\text{ВХ.ПК.С}} \cdot z_{\text{В.С}_1}}{z_{\text{ВХ.ПК.С}} + z_{\text{В.С}_1}} \text{ [Ом]},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $Z_{\text{МОД}}, Z_{\text{СМ}}, Z_{\text{С}}$  — удельные сопротивления соответственно моделируемой, смежной и соседней рельсовых линий.

Значение эквивалентного сопротивления  $Z_{\text{ЭКВ}}$  определяется по выражению:

$$Z_{\text{ЭКВ}} = \frac{A \cdot B \cdot C}{A \cdot B + B \cdot C + C \cdot A} \text{ [Ом]}.
 \tag{2}$$

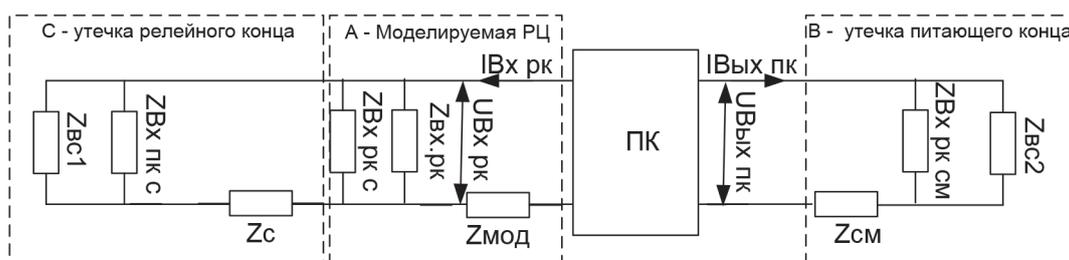
Определим форму непрерывного сигнала на входе рельсовой линии с учетом потерь тока и напряжения:

$$\begin{aligned}
 I_{\text{ВХ\_РЛ\_ПОТЕРИ}}(t) &= \frac{u_{\text{ВЫХ\_ТР}}(t) \cdot e^{\left(i \cdot \arg(U_{\text{ТР}}) - \frac{\pi}{180}\right)}}{R_{\text{СП}} + R_3 + |Z_{\text{ЭКВ}}|} \text{ [А]} \\
 U_{\text{ВХ\_РЛ\_ПОТЕРИ}}(t) &= I_{\text{ВХ\_РЛ\_ПОТЕРИ}}(t) \cdot |Z_{\text{ЭКВ}}| \text{ [В]}.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Сформируем модель непрерывного входного сигнала в виде массива отсчетов непрерывного сигнала:

$$U_i = u_{\text{ВЫХ.РЛ}}(i \cdot dt) \text{ [В]}.
 \tag{4}$$

A15 — оператор задания начальных значений  $j$ .



**Рис. 2.** Схема замещения относительно эквивалентного сопротивления нагрузки РЛ  $Z_{\text{ЭКВ}}$

α16 — условие формирования массива значений выходного сигнала одного участка  $dx$  (блок, определяющий цикл).

α17, A18, A19, A20, A21, A23, A24, A25, A26 — операторы и условия, составляющие тело цикла. Выполняют расчет значений выходного массива участка  $dx$ :

$$u_{\text{ВЫХ\_РЛ}}(t, \beta_{\text{РЛ}}, l_{\text{РЛ}}) = e^{\alpha_{\text{РЛ}} L_{\text{РЛ}}} \cdot \frac{1}{3,5 \tau_{\text{РЛ}}} \int_{t - \frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}}^{t + \frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}} U_{\text{ВХ\_РЛ\_ПОТЕРИ}}(t_{\text{РЛ}} - \tau_{\text{РЛ}}) dt_{\text{РЛ}} \text{ [В]}. \quad (5)$$

α22 — условие записи массива значений выходного сигнала РЛ.

α27 — условие, определяющий цикл.

α28, A29, A30, A31, A32, A33 — операторы и условия, составляющие тело цикла. Определяют выбор одного из массивов значений выходных сигналов участка  $dx$  и его подстановку в качестве входного массива сигнала последующего участка  $dx$  ( $U_{\text{ВЫХ}k} \leq U_{\text{ВХ}j}$ ).

A34 — оператор формирования выходного массива непрерывного сигнала рельсовой линии ( $U_{\text{ВЫХ}j}$ ).

α35 — условие, выполняющее сравнение длины оставшегося до выходного конца рельсовой линии участка с длиной зоны влияния (не более 35–40 метров). Исходя из поставленного условия, значение выходного массива участка  $dx$  формируется с учетом сформированного операторами 36–40 сигнала влияющей рельсовой линии.

A36–A40 — операторы формирования массива сигнала влияющей рельсовой линии.

A41 — оператор суммирования сигнала влияющей и рассчитываемой рельсовых линий для дальнейшей обработки.

При использовании бесстыкового пути необходим учет на границе двух соседних рельсовых линий смешанного сигнала, состоящего из суммы сигналов моделируемой и соседней рельсовых цепей:

$$U_{\text{СУМ\_ВЫХ\_РЛ}}(t, \beta_{\text{РЛ}}, L_{\text{РЛ}}) = \\ = u_{\text{ВЫХ\_РЛ}}(t, \beta_{\text{РЛ\_МОД}}, L_{\text{РЛ\_МОД}}) + u_{\text{ВЫХ\_РЛ}}(t, \beta_{\text{РЛ\_С}}, L_{\text{РЛ\_С}}) \text{ [В]}. \quad (6)$$

A42 — оператор формирования выходного массива непрерывного сигнала рельсовой линии ( $U_{\text{ВЫХ\_ВЛИЯНИЕ}}$ ) на расстоянии зоны влияния от приемного конца линии.

A43 — оператор расчета и формирования выходного сигнала рассчитываемой рельсовой линии с учетом модели сигнала влияющей рельсовой линии на приемном конце.

A44 — представление полученного в операторе A42 сигнала в виде массива точек для дальнейшего построения графика.

A45 — представление полученного в операторе A43 сигнала в виде массива точек для дальнейшего построения графика  $U_{\text{ВЫХ}}(\Delta\tau)$ . В блоке осуществляется преобразование массива значений непрерывного сигнала:

$$U(t) = U_{\text{floor}\left(\frac{t}{dt}\right)} \text{ [B]}, \quad (7)$$

где *floor* возвращает целое снизу и целое сверху от вычисляемого аргумента; U — массив отсчетов из оператора A43.

A46 — оператор «окончание моделирования».

Ниже представлено описание алгоритма моделирования рельсовой линии в нормальном режиме на языке ЛСА:

$$\begin{aligned} U = & A1 \alpha 2(1) \uparrow^1 A3 A4 \omega \uparrow^1 A5 A6 \downarrow^1 A7 \downarrow^2 \alpha 8(0) \uparrow^2 A9 A10 \alpha 11(1) \uparrow^3 A12 \\ & \omega \uparrow^3 A13 \downarrow^3 A14 \omega \uparrow^2 \uparrow^2 A15 \downarrow^4 \downarrow^7 \downarrow^9 \alpha 16(0) \uparrow^4 \alpha 17(1) \uparrow^5 A18 \omega \uparrow^5 A19 \downarrow^5 \\ & A20 A21 \alpha 22(1) \uparrow^6 A23 \omega \uparrow^6 A24 \downarrow^6 A25 A26 \omega \uparrow^4 \uparrow^4 \alpha 27(0) \uparrow^7 \alpha 28(1) \uparrow^8 A29 \quad (8) \\ & \omega \uparrow^8 A30 \downarrow^8 A31 A32 A33 \omega \uparrow^7 \uparrow^7 A34 \alpha 35(0) \omega \uparrow^9 A36 A37 A38 A39 A40 A41 \\ & A42 A43 A44 A45 A46. \end{aligned}$$

### 3. Особенности моделирования рельсовой линии в режимах шунтовом, контрольном и автоматической локомотивной сигнализации

#### 3.1. Шунтовой режим

Математическое описание работы рельсовой линии в шунтовом режиме отличается от описания нормального режима изменением в операторах и условиях 16–24 алгоритма (8) модели рельсовой линии выражениями 9–12 для описания сигнала в месте наложения нормативного шунта:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{РЛ}} &= \frac{\beta_{\text{РЛ}} \cdot L_{\text{НШ}}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{НЕС}}} \\ u_{\text{ВХ\_Ш}}(t, \beta_{\text{РЛ}}, l_{\text{НШ}}) &= \\ &= e^{\alpha_{\text{РЛ}} L_{\text{НШ}}} \cdot \frac{1}{3,5 \tau_{\text{РЛ}}} \int_{t - \frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}}^{t + \frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}} U_{\text{ВХ\_РЛ\_ПОТЕРИ}}(t_{\text{РЛ}} - \tau_{\text{РЛ}}) dt_{\text{РЛ}} \quad \text{[B]}. \quad (9) \end{aligned}$$

Значение тока при наложении шунта определяют по закону Ома для участка цепи:

$$i_{\text{Ш}} = \frac{u_{\text{ВХ\_Ш}}(t, \beta_{\text{РЛ}}, l_{\text{НШ}})}{R_{\text{Ш}} + R_{\text{Д}}} \text{ [A]}. \quad (10)$$

Уровень непрерывного сигнала при наложении шунта определяют по выражению:

$$u_{\text{Ш}} = i_{\text{Ш}} \cdot R_{\text{Ш}} \text{ [B]}. \quad (11)$$

Выражения, определяющие результирующий сигнал на выходе рельсовой линии, будет иметь вид:

$$\tau_{\text{РЛ}} = \frac{\beta_{\text{РЛ}} \cdot L_{\text{НШ1}}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{НЕС}}}$$

$$u_{\text{ВХ\_Ш}}(t, \beta_{\text{РЛ}}, l_{\text{НШ1}}) = e^{\alpha_{\text{РЛ}} L_{\text{НШ1}}} \cdot \frac{1}{3,5\tau_{\text{РЛ}}} \int_{t-\frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}}^{t+\frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}} U_{\text{Ш}}(t_{\text{РЛ}} - \tau_{\text{РЛ}}) dt_{\text{РЛ}} \text{ [В]}. \quad (12)$$

### 3.2. Контрольный режим

Математическое описание контрольного режима отличается от описания нормального режима добавлением в операторах и условиях 16–24 алгоритма (8) выражений 13–16 для описания непрерывного сигнала на выходе рельсовой линии при изломе рельса.

$$\tau_{\text{РЛ}} = \frac{\beta_{\text{РЛ}} \cdot L_{\text{К}}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{НЕС}}}$$

$$u_{\text{ВХ\_К}}(t, \beta_{\text{РЛ}}, l_{\text{К}}) = e^{\alpha_{\text{РЛ}} L_{\text{К}}} \cdot \frac{1}{3,5\tau_{\text{РЛ}}} \int_{t-\frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}}^{t+\frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}} u_{\text{ВХ\_РЛ\_ПОТЕРИ}}(t_{\text{РЛ}} - \tau_{\text{РЛ}}) dt_{\text{РЛ}} \text{ [В]}. \quad (13)$$

Значение тока в рельсах при контрольном режиме рассчитывается по закону Ома для участка цепи:

$$i_{\text{К}} = \frac{u_{\text{ВХ\_К}}(t, \beta_{\text{РЛ}}, l_{\text{К}})}{|Z_{\text{Р}}| + R_{\text{Д}} + |Z_{\text{Э}}|} \text{ [А]}, \quad (14)$$

где  $Z_{\text{Э}}$  — эквивалентное сопротивление изоляции (в месте излома) [Ом], уровень непрерывного сигнала при изломе рассчитывается по выражению:

$$u_{\text{К}} = i_{\text{К}} \cdot |R_{\text{Э}}| \text{ [В]}. \quad (15)$$

Выражения, определяющие результирующий сигнал на выходе рельсовой линии, будут иметь вид:

$$\tau_{\text{РЛ}} = \frac{\beta_{\text{РЛ}} \cdot L_{\text{К1}}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{НЕС}}}$$

$$u_{\text{ВЫХ\_К}}(t, \beta_{\text{РЛ}}, l_{\text{К1}}) = e^{\alpha_{\text{РЛ}} L_{\text{К1}}} \cdot \frac{1}{3,5\tau_{\text{РЛ}}} \int_{t-\frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}}^{t+\frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}} u_{\text{К}}(t_{\text{РЛ}} - \tau_{\text{РЛ}}) dt_{\text{РЛ}} \text{ [В]}. \quad (16)$$

### 3.3. Режим автоматической локомотивной сигнализации

Формирование сигнала автоматической локомотивной сигнализации представлено выражениями 17, а математическое описание прохождения непрерывного сигнала АЛС — выражениями 18, 19.

$$u_a(t) = u_a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{\text{АЛС}} \cdot t) \text{ [В]},$$

$$U_{sr1} = \text{if}(0 < t < 0,35, 1, 0) \text{ [В]},$$

$$\begin{aligned}
 U_{sr2} &= \text{if}(0,47 < t < 0,69, 1,0) \text{ [V]}, \\
 U_{sr3} &= \text{if}(0,81 < t < 1,03, 1,0) \text{ [V]}, \\
 U_{sr4} &= \text{if}(1,84 < t < 2,19, 1,0) \text{ [V]}, \\
 U_{sr} &= U_{sr1} + U_{sr2} + U_{sr3} + U_{sr4} \text{ [V]}.
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Расчет уровня непрерывного сигнала кодового тока и напряжения на выходе кодирующей цепи выполняется по выражениям:

$$\begin{aligned}
 i(t) &= \frac{u_a}{R_u + X C_u + R_{\text{РОБС}}} \text{ [A]} \\
 u(t) &= (R_u + X C_u) \cdot i(t) \text{ [V]}.
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

Форма непрерывного сигнала в месте наложения нормативного шунта определяется выражениями:

$$\begin{aligned}
 \tau_{\text{РЛ}} &= \frac{\beta_{\text{РЛ}} \cdot L_{\text{Ш\_АЛС}}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{НЕС}}} \\
 u_{\text{ВХ\_АЛС}}(t, \beta_{\text{РЛ}}, l_{\text{Ш\_АЛС}}) &= \\
 &= e^{\alpha_{\text{РЛ}} L_{\text{Ш\_АЛС}}} \cdot \frac{1}{3,5 \tau_{\text{РЛ}}} \int_{t - \frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}}^{t + \frac{\tau_{\text{РЛ}}}{2}} u_{\text{ВХ\_РЛ\_АЛС}}(t_{\text{РЛ}} - \tau_{\text{РЛ}}) dt_{\text{РЛ}} \text{ [V]}.
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

Полученный после преобразований (18, 19) сигнал шунтируется нормативным шунтом  $R_{\text{Ш}}$ . Ток, получаемый при этом, рассчитывается по закону Ома для участка цепи:

$$i_{\text{АЛС}} = \frac{u_{\text{ВХ\_АЛС}}(t, \beta_{\text{РЛ}}, l_{\text{Ш\_АЛС}})}{R_{\text{Ш}}} \text{ [A]}.
 \tag{20}$$

Режим короткого замыкания как частный случай шунтового режима содержит расчетные выражения для сравнения мощности, потребляемой питающим трансформатором при коротком замыкании с его максимальной расчетной мощностью (шунтирование с питающего конца), следовательно, не использует элементов рельсовой линии. Описание данного режима по этой причине в статье опущено.

#### 4. Моделирование мешающих факторов рельсовой линии

Процессные модели отказов элементов рельсовой линии — это воспроизведение в модели совокупности процессов, происходящих в линии при отказах ее элементов или критических изменениях значений параметров рельсовой линии. Отказы представлены в виде функциональных схем отказов (ФСО) [13].

Цель использования таких моделей — получить форму и уровень непрерывного сигнала рельсовой линии в промежуточных точках под воздействием мешающих факторов.

Таблица 1. Мешающие факторы рельсовой линии

1	Добавление сопротивления (на входе РЛ) (блок 16–23)	$I_{ВХ\_РЛ} = \frac{u_{ВЫХ\_ТР}(t) \cdot e^{\left(i \cdot \arg(U_{ВЫХ}) \cdot \frac{\pi}{180}\right)}}{R_{СП} + R_3 + Z_{ЭКВ}}$ $R_Д$
2	Сложение с сигналом (грозовое перенапряжение) (блок 35)	$U_{СУМ\_ВЫХ\_РЛ}(t, \beta_{РЛ}, L_{РЛ}) = u_{ВЫХ\_РЛ}(t, \beta_{РЛ\_МОД}, L_{РЛ\_МОД}) +$ $+ u_{ВЫХ\_РЛ}(t, \beta_{РЛ\_С}, L_{РЛ\_С}) + u_{ГРОЗА}(t)$
3	Сложение с сигналом высокой амплитуды — гроза (блок 35)	$U_{СУМ\_ВЫХ\_РЛ}(t, \beta_{РЛ}, L_{РЛ}) = u_{ВЫХ\_РЛ}(t, \beta_{РЛ\_МОД}, L_{РЛ\_МОД}) +$ $+ u_{ВЫХ\_РЛ}(t, \beta_{РЛ\_С}, L_{РЛ\_С}) + u_{ГРОЗЫ}(t)$ $A_{ГРОЗЫ}(t) = -\sin(\sigma^{-\phi t} \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t + \phi))$ — грозовой спектр $U_{ВЛИЯНИЯ}(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n \left( \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \right) \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t + \phi)$ — влияющее напряжение
4	Потеря шунта: загрязнение поверхностей головок рельсов, следование подвижных единиц с плохим шунтовым эффектом (блок 16–23)	$i_{Ш} = \frac{u_{ВХ\_Ш}(t, \beta_{РЛ}, l_{НШ})}{R_{Ш} + R_Д}, \text{ при } R_{Ш} \rightarrow \infty$ $u_{Ш} = i_{Ш} \cdot R_{Ш},$ $\tau_{РЛ} = \frac{\left( \beta_{РЛ} \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot L_{НШ1}}{2 \cdot \pi \cdot f_{НЕС}}$ $u_{ВЫХ\_Ш}(t, \beta_{РЛ}, l_{НШ1}) =$ $= e^{\alpha_{РЛ} L_{НШ1}} \cdot \frac{1}{3,5 \tau_{РЛ}} \int_{t - \frac{\tau_{РЛ}}{2}}^{t + \frac{\tau_{РЛ}}{2}} U_{Ш}(t_{РЛ} - \tau_{РЛ}) dt_{РЛ}$

Примеры реализации функциональных схем отказов для часто встречающихся (по статистике) отказов рельсовой линии представлены в таблице 1.

## Заключение

Тональные рельсовые цепи на железных дорогах России сейчас и в перспективе являются основным средством контроля свободности (занятости) элементов путевого плана станций и перегонов и целостности рельсовых линий. Актуальность работ, направленных на повышение качества их технической эксплуатации, очевидна. Эффективным средством решения этой задачи является разработка процессной имитационной модели и на ее основе — гибридной экспертной системы тональных рельсовых цепей. Как инструментальное средство экспертная система может использоваться в качестве обучающей

системы, подсистемы систем удаленного мониторинга технического состояния аппаратуры тональных рельсовых цепей, для расчета регулировочных характеристик. Однако предложенные направления применения гибридной экспертной системы возможны только при условии обеспечения и контроля адекватности имитационной модели. Контроль адекватности выполняется процедурами верификации имитационной модели и валидации в отдельности по каждому из указанных направлений применения. Данная работа направлена на повышение адекватности модели основного элемента тональных рельсовых цепей – рельсовой линии, для чего были:

- определены свойства рельсовой линии как объекта моделирования;
- сформулированы требования к построению алгоритма процессной модели рельсовой линии;
- выполнена корректировка содержания отдельных операторов алгоритма для учета влияния смежных рельсовых цепей во всех режимах работы моделируемой тональной рельсовой цепи;
- предложена корректировка содержания отдельных операторов алгоритма с учетом мешающих факторов;
- показана целесообразность разработки процесса моделирования рельсовой линии как элемента базы знаний гибридной экспертной системы для анализа функционирования тональной рельсовой цепи;
- разработан алгоритм моделирования рельсовой линии, основанный на дискретном представлении непрерывного сигнала с учетом внесенных корректировок по п. п. 3, 4.
- реализация алгоритма моделирования рельсовой линии на языке ЛСА обеспечивает контроль его полноты и корректности.

Реализация дальнейших работ по синтезу гибридной экспертной системы с использованием доработанной по требованиям обеспечения адекватности процесса моделирования рельсовой линии предполагает:

- разработку программной реализации алгоритма процесса моделирования рельсовой линии и мешающих факторов;
- повышение адекватности процессной модели тональной рельсовой цепи в целом за счет уточнения процесса моделирования рельсовой линии;
- оценку адекватности процессной модели тональной рельсовой цепи;
- верификацию процессной модели тональной рельсовой цепи.
- валидацию процессной модели тональной рельсовой цепи для использования в качестве базы знаний гибридной экспертной системы тональных рельсовых цепей различного назначения;
- разработку функциональной и информационной структуры гибридной экспертной системы тональных рельсовых цепей;
- разработку программного обеспечения гибридной экспертной системы тональных рельсовых цепей как автоматизированного обучающего комплекса и тренажера по поиску неисправностей тональных рельсовых цепей.

**Библиографический список**

1. *Воронин В. А.* Техническое обслуживание тональных рельсовых цепей: учебное пособие / В. А. Воронин, В. А. Коляда, Б. Г. Цукерман. — М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2007. — 93 с.
2. *Шаманов В. И.* Помехи на аппаратуру рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации. Средства защиты: учеб. пособие / В. И. Шаманов. — М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2019. — 303 с.
3. *Брылеев А. М.* Теория, устройство и работа рельсовых цепей / А. М. Брылеев, Ю. А. Кравцов, А. А. Шишляков. — М.: Транспорт, 1978. — 344 с.
4. *Леушин В. Б.* Особенности структур рельсовых цепей автоблокировки: учебное пособие / В. Б. Леушин. — Самара: Изд-во СамГУПС, 2009. — 136 с.
5. *Кравцов Ю. А.* Работоспособность путевых приемников рельсовых цепей тональной частоты при воздействии сетевого тока электропоезда «Сапсан» / Ю. А. Кравцов, Е. В. Архипов, А. А. Антонов, М. Е. Бакин // Вестник транспорта Поволжья. — 2013. — № 3. — С. 14–19.
6. *Ватулин Я. С.* Диагностирование рельсовых соединений. Системы автоматизированного проектирования на транспорте / Я. С. Ватулин, А. И. Дергачев, С. Н. Чуян // Тезисы докладов V Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Федеральное агентство железнодорожного транспорта. — СПб.: ПГУПС, 2014. — С. 9–15.
7. *Денисов Б. П.* Методы контроля корректности построения схем замещения тональных рельсовых цепей в АРМ-ТРЦ / Б. П. Денисов, В. Б. Культин, С. Н. Растегаев, Н. Ю. Воробей // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2010. — Вып. 4 (25). — С. 110–119.
8. *Воробей Н. Ю.* Автоматизация построения схем замещения тональных рельсовых цепей с использованием формализованного описания / Н. Ю. Воробей // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2011. — Вып. 3 (28). — С. 47–53.
9. *Растегаев С. Н.* Автоматизация формирования схем замещения для расчета ТРЦ / С. Н. Растегаев, Н. Ю. Воробей // Автоматика, связь, информатика: научно-популярный производственно-технический журнал. — М.: ОАО «РЖД», 2011. — № 4. — С. 12–13.
10. *Сапожников В. В.* Сертификация и доказательство безопасности систем железнодорожной автоматики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, В. И. Талалаев и др.; под ред. Вл. В. Сапожникова. — М.: Транспорт, 1997. — 288 с.
11. *Булавский П. Е.* Формализация алгоритмического описания систем обеспечения жизненного цикла железнодорожной автоматики и телемеханики / П. Е. Булавский, Д. С. Марков, В. Б. Соколов, Т. Ю. Константинова // Автоматика на транспорте. — 2015. — Т. 1, № 4. — С. 418–432.
12. *Марков Д. С.* Понятийный аппарат экспертизы и испытаний железнодорожной автоматики на безопасность / Д. С. Марков, О. А. Наседкин, Д. А. Васильев, М. А. Бутузов // Автоматика на транспорте. — 2018. — Т. 4, № 1. — С. 30–45.
13. *Соколов М. Б.* Методы и алгоритмы процессного моделирования тональных рельсовых цепей в системах управления движением поездов: дис. ... канд. техн. наук, специальность: 05.22.08 / М. Б. Соколов. — Санкт-Петербург: ПГУПС, 2013. — 184 с.

14. *Боглаев Ю. П.* Вычислительная математика и программирование / Ю. П. Боглаев. — М.: Высшая школа, 1990. — 267 с.
15. *Разевиг В. Д.* Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7 / В. Д. Разевиг. — М.: Горячая линия — Телеком, 2003. — 368 с.
16. *Крылов В. В.* Основы теории цепей для системотехников / В. В. Крылов, С. Я. Корсаков. — М.: Высшая школа, 1990. — 224 с.
17. Информационная база преподавателя электротехники и электроники Electrical4U. — URL: <https://www.electrical4u.com/> (дата обращения: 09.01.2020).
18. *Лазарев В. Г.* Синтез управляющих автоматов / В. Г. Лазарев, Е. И. Пийль. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 328 с.
19. *Тарасов Е. М.* Математическое моделирование рельсовых цепей с распределенными параметрами рельсовых линий: учеб. пособие / Е. М. Тарасов. — Самара: СамГАПС, 2003. — 118 с.
20. *Василенко М. Н.* Расчет параметров и проверка работоспособности бесстыковых тональных рельсовых цепей / М. Н. Василенко, Б. П. Денисов, В. Б. Культин, С. Н. Расстегаев // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2006. — Вып. 2. — С. 104–112.
21. *Hill R. J.* Modelling of nonlinear rail impedance in ac traction power systems / R. J. Hill, D. C. Carpenter // IEEE Trans on Power Delivery. — 1991. — Vol. 6, N 4. — P. 1755–1761.
22. *Hill R. J.* Determination of rail internal impedance for electric railway traction system simulation / R. J. Hill, D. C. Carpenter // IEE Proceedings B — Electric Power Applications. — 1991. — Vol. 138, N 6. — P. 311–321.
23. *Brown J. C.* Calculation and measurement of rail impedances applicable to remote short circuit fault currents / J. C. Brown, J. Allan, B. Mellit // IEE Proceedings B — Electric Power Applications. — 1992. — Vol. 139, N 4. — P. 295–302.
24. Calculating Induced Voltages and Current in Practical Cases. — Switzerland, Geneva: CCITT Directive, 1989. — Vol. II. — 606 p.
25. *Theeg G.* Railway Signalling & Interlocking: 3ed Edition / G. Theeg, S. Vlasenko. — Germany, Leverkusen: PMC Media House GmbH, 2020. — 552 p.
26. *Hall C.* Modern Signalling: 5th Edition / C. Hall. — UK, Shepperton: Ian Allan Ltd, 2016. — 144 p.
27. *Shamanov V.* Formation of Interference from Power Circuits to Apparatus of Automation and Remote Control / V. Shamanov // Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018). — Russia, Kazan, 2018. — P. 140–146. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524676.
28. *Zasov V.* Stability Verification of Statistical Methods for Signal Separation / V. Zasov // Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018). — Russia, Kazan, 2018. — P. 803–807. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524683.
29. *Sedykh D.* Analysis of the Amplitude and Phase-Manipulated Signals of Automation Devices via Bluetooth Technology / D. Sedykh, M. Gordon, D. Zuyev, A. Skorokhodov // Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018). — Russia, Kazan, 2018. — P. 703–710. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524605.
30. *Efanov D. V.* Diagnostics of Audio-Frequency Track Circuits in Continuous Monitoring Systems for Remote Control Devices: Some Aspects / D. V. Efanov, G. V. Osadchy, V. V. Khóroshev, D. A. Shestovitskiy // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019). — Batumi, Georgia, 2019. — P. 162–170. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884416.

**D. S. Markov**  
**M. B. Sokolov**  
**V. B. Sokolov**

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

## **FORMALIZED SCHEME FOR THE RAILWAY LINE SIMULATION MODELING PROCESS**

A formalized scheme of a railway line simulation model was demonstrated on the basis of continuous signal discrete approximation; the former being the key component of the intelligent database of the hybrid expert system for audio frequency track circuit performance analysis. A discrete model of continuous input signal was presented, as well as the analytic expression of its transformation by the selected items of the railway track given in the form of array-based pointwise values of an approximated signal. It was suggested to divide the railway line into segments, presented in the simulation model by equivalent circuits. The latter provided adequacy of shunt and control operation modes of the track circuit.

The influence of adjacent and neighboring railway circuits of continuous welded rail track was taken into consideration in the formalized scheme on reflective and algorithmic levels. The mathematical scheme made it possible to use the method of process modeling for synthesis of a continuous signal processing simulation model in the railway line. Analytic expressions were introduced for accounting purposes of interfering factors in order to provide adequacy of the process simulation model, in the formalized scheme of the railway line. A multitude of operators and logical conditions of alphabet of logical algorithm schemes were introduced on the basis of analytic expressions introduced in the article. A formalized description of the railway line operation in different modes (normal, shunt, control, automatic train control and short-circuit) was developed using the introduced alphabet based on the language of logical algorithm schemes. It provides relative simplicity of transition to software implementation of the railway line process simulation model for continuous welded rails.

Process modeling, audio frequency track circuit, railway line, equivalent circuit, formalized description, hybrid expert system

### **References**

1. *Vornin V. A., Kolyada V. A. & Tsukerman B. G. (2007) Tekhnicheskoye obsluzhivaniye tonalnykh relsovykh tsepey [Technical maintenance for audio frequency track circuits]. Uchebnoye posobiye [Teaching aid]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Training and Methodology Centre for Railway Transport] Publ., 93 p. (In Russian)*
2. *Shamanov V. I. (2019) Pomekhy na apparaturu relsovykh tsepey i avtomaticheskoy lokomotivnoy signalizatsii. Sredstva zashchity [Noise disturbance in track circuit equipment and automatic cab signaling. Interference protection facilities]. Uchebnoye posobiye [Teaching aid] Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte [Training and Methodology Centre for Railway Transport] Publ., 303 p. (In Russian)*
3. *Bryleev A. M., Kravstov Yu. A. & Shishlyakov A. A. (1978) Teoriya, ustroystvo i rabota relsovykh tsepey [Theory, structure and operation of track circuits]. Moscow, Transport Publ., 344 p. (In Russian)*

4. *Leushin V. B.* (2009) *Osobennosti struktur relsovykh tsepey avtoblokirovki* [*Design specificities of track circuits of automatic block system*]. Uchebnoye posobiye [Teaching aid]. Samara, SamGUPS [Samara State Transport University] Publ., 136 p. (In Russian)
5. *Kravtsov Yu. A., Arkhipov E. V., Antonov A. A. & Bakin M. E.* (2013) Rabotosposobnost putevykh priemnikov relsovykh tsepey tonalnoy chastity pry vozdeistvii setevogo toka elektropoezda “Sapsan” [Operating capacity of audio frequency track circuit receivers during line current effect of the electric train “Sapsan”]. *Vestnik transporta Povolzhya* [*Bulletin of the Volga region transport*], no. 3, pp. 14–19. (In Russian)
6. *Vatulin Ya. S., Dergachev A. I. & Chuyan S. N.* (2014) *Diagnostirovaniye relsovykh soyedineniy. Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya na transporte* [*Diagnosis of rail bonds. Computer-aided design systems for transport*]. Tezisy dokladov V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. Federalnoye agenstvo zheleznodorozhnogo transporta [Brief outline reports of the fifth International Research and Training Conference for students, postgraduates and young scholars. Federal Railway Transport Agency]. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University] Publ., pp. 9–15. (In Russian)
7. *Denisov B. P., Kultin V. B., Rastegaev S. N. & Vorobey N. Yu.* (2010) Metody kontrolya korrektnosti postroyeniya skhem zameshcheniya tonalnykh relsovykh tsepey v ARM-TRTs [Testing methods for the design validity of equivalent circuits for audio frequency track circuits in ARM-TRTs (Automated Work Station-Audio Frequency Track Circuits)]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University] Publ., iss. 4 (25), pp. 110–119. (In Russian)
8. *Vorobey N. Yu.* (2011) Avtomatizatsiya postroyeniya skhem zameshcheniya tonalnykh relsovykh tsepey s ispolzovaniyem formalizovannogo opisaniya [Design automation of equivalent circuits for audio frequency track circuits involving formal description]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [*Proceedings of Petersburg State Transport University*]. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University] Publ., iss. 3 (28), pp. 47–53. (In Russian)
9. *Rastegaev S. N. & Vorobey N. Yu.* (2011) Avtomatizatsiya formirovaniya skhem zameshcheniya dlya rascheta TRTs [Automation of equivalent circuit formation for TRTs calculation]. *Avtomatika, svyaz, informatika: nauchno-populyarniy proizvodstvenno-tekhnicheskij zhurnal* [*Automation, communication, information technology: educational industrial and engineering journal*]. Moscow, OAO “Russian Railways” Publ., no. 4, pp. 12–13. (In Russian)
10. *Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Talalaev V. I. et al.* (1997) Sertifikatsiya i dokazatelstvo bezopasnosti system zheleznodorozhnoy avtomatiki [Security certification and validation of railway automation systems]. Ed. by Vl. V. Sapozhnikov. Moscow, Transport Publ., 288 p. (In Russian)
11. *Bulavskiy P. E., Markov D. S., Sokolov V. B. & Konstantinova T. Yu.* (2015) Formalizatsiya algoritmicheskogo opisaniya system obespecheniya zhiznennogo tsikla zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Algorithmic description characterization of the lifecycle supporting systems of railway automation and remote control]. *Avtomatika na transporte* [*Transport automation*], vol. 1, no. 4, pp. 418–432. (In Russian)
12. *Markov D. S., Nasedkin O. A., Vasiliev D. A. & Butuzov M. A.* (2018) Ponyatiyniy apparat ekspertizy i ispytaniy zheleznodorozhnoy na bezopasnost [Conceptual framework for security examination and testing of railway automation]. *Avtomatika na transporte* [*Transport automation*], vol. 4, no. 1, pp. 30–45. (In Russian)

13. Sokolov M. B. (2013) *Metody i algoritmy protsessnogo modelirovaniya tonalnykh relsovykh tsepey v sistemakh upravleniya dvizheniyem poezdov* [Methods and algorithms of process modeling of audio frequency track circuits in railway traffic management systems]. Diss. ... Cand. Sci. in Engineering, speciality: 05.22.08. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University] Publ., 184 p. (In Russian)
14. Boglaev Yu. P. (1990) *Vychislitel'naya matematika i programmirovaniye* [Computational mathematics and computer programming]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 267 p. (In Russian)
15. Razevig V. D. (2003) *Skhemotekhnicheskoye modelirovaniye s pomoshchyu Micro-Cap 7* [Circuit simulation via Micro-Cap 7]. Moscow, Goryachya liniya — Telekom Publ., 368 p. (In Russian)
16. Krylov V. V. & Korsakov S. Ya. (1990) *Osnovy teorii tsepey dlya sisemotekhnikov* [Theoretical analysis of circuit analysis for system designers]. Moscow, Vysshaya shkola [Higher school] Publ., 224 p. (In Russian)
17. *Informatsionnaya baza prepodavatelya elektrotekhniki i elektroniki Electrical4U*. [Informational background for an instructor of electrical engineering and electronics Electrical4U]. URL: <https://www.electrical4u.com/> (accessed: 09.01.2020).
18. Lazarev V. G. & Piyl E. I. (1989) *Sintez upravlyayushchikh avtomatov* [Control automata synthesis]. Moscow, Energoatomizdat, 328 p. (In Russian)
19. Tarasov E. M. (2003) *Matematicheskoye modelirovaniye relsovykh tsepey s raspredelitel'nyy parametry relsovykh liniy* [Mathematical simulation of track circuits with distributed parameters of railway lines]. Uchebnoye posobiye [Teaching aid]. Samara, SamGUPS [Samara State Transport University] Publ., 118 p. (In Russian)
20. Vasilenko M. N., Denisov B. P., Kultin V. B. & Rasstegeev S. N. (2006) *Raschet parametrov i proverka rabotosposobnosti besstykovykh tonalnykh relsovykh tsepey* [Computation of parameters and efficiency check of jointless audio frequency track circuits]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg State Transport University]. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University] Publ., iss. 2, pp. 104–112. (In Russian)
21. Hill R. J. & Carpenter D. C. (1991) Modelling of nonlinear rail impedance in ac traction power systems. *IEEE Trans on Power Delivery*, vol. 6, no. 4, pp. 1755–1761.
22. Hill R. J. & Carpenter D. C. (1991) Determination of rail internal impedance for electric railway traction system simulation. *IEE Proceedings B — Electric Power Applications*, vol. 138, no. 6, pp. 311–321.
23. Brown J. C., Allan J. & Mellit B. (1992) Calculation and measurement of rail impedances applicable to remote short circuit fault currents. *IEE Proceedings B — Electric Power Applications*, vol. 139, no. 4, pp. 295–302.
24. (1989) *Calculating Induced Voltages and Current in Practical Cases*. Switzerland, Geneva, CCITT Directive, vol. II, 606 p.
25. Theeg G. & Vlasenko S. (2020) *Railway Signalling & Interlocking*. 3ed Edition. Germany, Leverkusen, PMC Media House GmbH, 552 p.
26. Hall C. (2016) *Modern Signalling*. 5<sup>th</sup> Edition. UK, Shepperton, Ian Allan Ltd Publ., 144 p.
27. Shamanov V. (2018) *Formation of Interference from Power Circuits to Apparatus of Automation and Remote Control*. Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018). Russia, Kazan, pp. 140–146. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524676.
28. Zasov V. (2018) *Stability Verification of Statistical Methods for Signal Separation*. Proceedings of 16<sup>th</sup> IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018). Russia, Kazan, pp. 803–807. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524683.

29. *Sedykh D., Gordon M., Zuyev D. & Skorokhodov A. (2018) Analysis of the Amplitude and Phase-Manipulated Signals of Automation Devices via Bluetooth Technology. Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018). Russia, Kazan, pp. 703–710. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524605.*
30. *Efanov D. V., Osadchy G. V., Khóroshev V. V. & Shestovitskiy D. A. (2019) Diagnostics of Audio-Frequency Track Circuits in Continuous Monitoring Systems for Remote Control Devices: Some Aspects. Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019). Batumi, Georgia, pp. 162–170. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884416.*

*Статья представлена к публикации членом редколлегии В. И. Шамановым  
Поступила в редакцию 26.02.2020, принята к публикации 24.03.2020*

*МАРКОВ Дмитрий Спиридонович* — кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I  
e-mail: MDS1945@yandex.ru

*СОКОЛОВ Михаил Борисович* — кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I  
e-mail: SMB5@yandex.ru

*СОКОЛОВ Вадим Борисович* — кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I  
e-mail: SVB9@yandex.ru

© Марков Д. С., Соколов М. Б., Соколов В. Б., 2020

УДК519.86:681.3

**А. Ю. Мухопад, д-р техн. наук**

**Ю. Ф. Мухопад, д-р техн. наук**

*Кафедра «Автоматизация производственных процессов»,  
Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск*

## ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СЛОЖНЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ АВТОМАТОВ

Способы создания программных версий управляющих автоматов существенно зависят от правильности выбора структурных моделей сложных и высокосложных автоматов технических систем реального времени. Предложено использовать новую оригинальную структурную модель автомата, в которой используется логический блок в виде двухходовых элементов «И» с адресацией через подмножество  $\{\alpha\}$  логических условий  $\alpha_1 \dots \alpha_q$  от дешифратора состояний нового управляющего автомата, независимое от подмножества  $\{A\}$  операторов действия  $A_1 \dots A_k$ . Программная версия представлена в виде последовательности операторов действия и логических условий в форме граф-схемы алгоритма. Реализация граф-схемы алгоритма программной модели на микроконтроллере проста и одинакова для любой степени сложности заданного автомата. Метод создания программной версии был назван структурно-автоматным программированием; он является самым эффективным из известных методов. Программная модель составляется один раз для выбранного типа микроконтроллера, при смене исходного задания потребуется лишь изменить содержание оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), хранящего коды переходов, таблицы выбора логических условий и операторов действия.

Автомат, управление, программа, комбинационная схема, оперативное запоминающее устройство, операторные схемы алгоритмов

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-2-222-233

### Введение

При проектировании сложных технических систем разработчики ориентируются на создание программных управляющих подсистем, реализуемых на микроконтроллере. Этому способствует наличие:

- дешевых больших интегральных схем (БИС) микроконтроллеров с различным быстродействием;
- интерфейса с расширенными функциями;
- ОЗУ большого объема [1–4].

Можно выбрать характеристики микроконтроллера, наилучшим образом соответствующие специфике процесса управления. Однако программные подсистемы даже для автоматов средней сложности проигрывают по быстродействию аппаратным средствам в сотни раз [5–8].

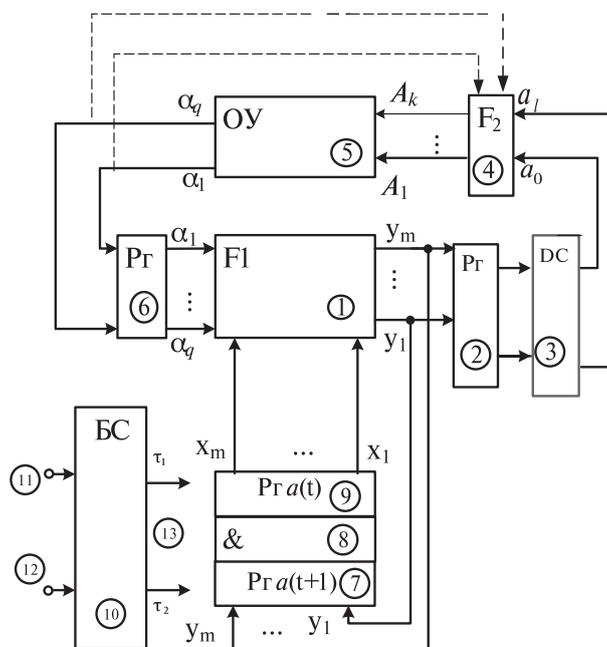
Новая методология синтеза и структурная организация управляющих автоматов дает возможность эффективно упрощать программные версии управляющей подсистемы сложных технических систем реального времени.

В работах [9–12] определена методика создания программной версии реализации управляющей граф-схемы алгоритма (ГСА), которая определяется в первую очередь правильностью выбора управляющего автомата.

Существующие программные версии основаны на использовании структурной организации управляющего автомата Мура (УАМ<sub>М</sub>) и Мили (УАМ<sub>Л</sub>) (рис. 1), [13–17]. Комбинационные схемы их сложны, т. к. при реализации на программируемых логических матрицах (ПЛИМ) системы булевых функций зависят от  $n = m + q$  переменных. Здесь  $m$  — разрядность кода  $y_1 \dots y_m$  состояния  $a(t)$ ,  $q$  — количество логических условий  $\alpha_1 \dots \alpha_q$  управляющего автомата, ОУ(5) — объект управления, F<sub>1</sub>(1) — комбинационная схема переходов, F<sub>2</sub>(4) — схема формирования исполнительных управляющих команд, DC(3) — дешифратор, P<sub>Г</sub>(2),(6),(7),(9) — регистры памяти, БС(10) — блок синхронизации, формирующий импульсы  $\tau_1$  и  $\tau_2$  длительностью  $\tau \ll T$ , причем  $\tau_1(t) \& \tau_2(t) = \emptyset$ ,  $T$  — длительность одного периода функционирования УАМ<sub>М</sub>.

### 1. Анализ методов создания программной версии

Состояния  $a(t)$  в ГСА для УАМ<sub>М</sub> размечаются через операторы действия  $A_1 \dots A_k$ , а для УАМ<sub>Л</sub> — через переходы  $a(t)$  к  $a(t+1)$ . При этом каждый переход в УАМ<sub>Л</sub> осуществляется только с одним оператором действия. Возможны также



**Рис. 1.** Структурная организация автомата Мура (УАМ<sub>М</sub>) и Мили (УАМ<sub>Л</sub>) (пунктирные связи относятся только к УАМ<sub>Л</sub>)

**Таблица 1.** Характеристики управляющих автоматов

№	Тип	m	q	m+q	m+1	V	W	K	m <sub>p</sub>	Q
1	СП	3	3	6	4	256	64	1,5	4	4
2	ПА	4	6	10	5	2кб	256	2,0	4	8
3	СА	5	9	14	6	128кб	512	2,3	8	256
4	АС	6	12	18	7	2Мб	1кб	2,6	8	2*10 <sup>3</sup>
5	ВС	7	15	22	8	32Мб	2кб	2,7	8	16*10 <sup>3</sup>
6	ОС	8	18	26	9	0,5Гб	4кб	2,9	8	12*10 <sup>4</sup>
7	УС	9	21	30	10	12Гб	12кб	3	12	1*10 <sup>6</sup>
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

безусловные переходы без проверки логических условий. При реализации схемы переходов  $F_1(1)$  на ПЗУ его объем  $V$  определяется как  $V = m_p 2^{m+q}$ , где  $m_p$  — реальная разрядность БИС ПЗУ, равная 4, 8. В работе [18] управляющие автоматы разделяются на сверхпростые (СП), простые (ПА), средней сложности (СА), сложные (АС), высокой сложности (ВС), особо сложные (ОС) и ультрасложные (УС). В таблице 1 (столбцы 1–6) приведены характеристики всех типов УАМг.

В последнее десятилетие были предложены варианты управляющих автоматов с новой оригинальной структурной организацией, в которой для каждого периода функционирования ( $T$ ) по коду состояния  $a(t)$  выбирается единственное условие  $\alpha_j \in \{\alpha\}$  [9–11, 18]. Новый объем ПЗУ определяется как  $W = m_p 2^{m+1}$ , а эффективное снижение затрат оборудования для ПЗУ( $W$ ) оценивается коэффициентом  $Q = V/W = 2^{q-1}$  (столбцы 7–10 табл. 1).

## 2. Структурная организация программной модели

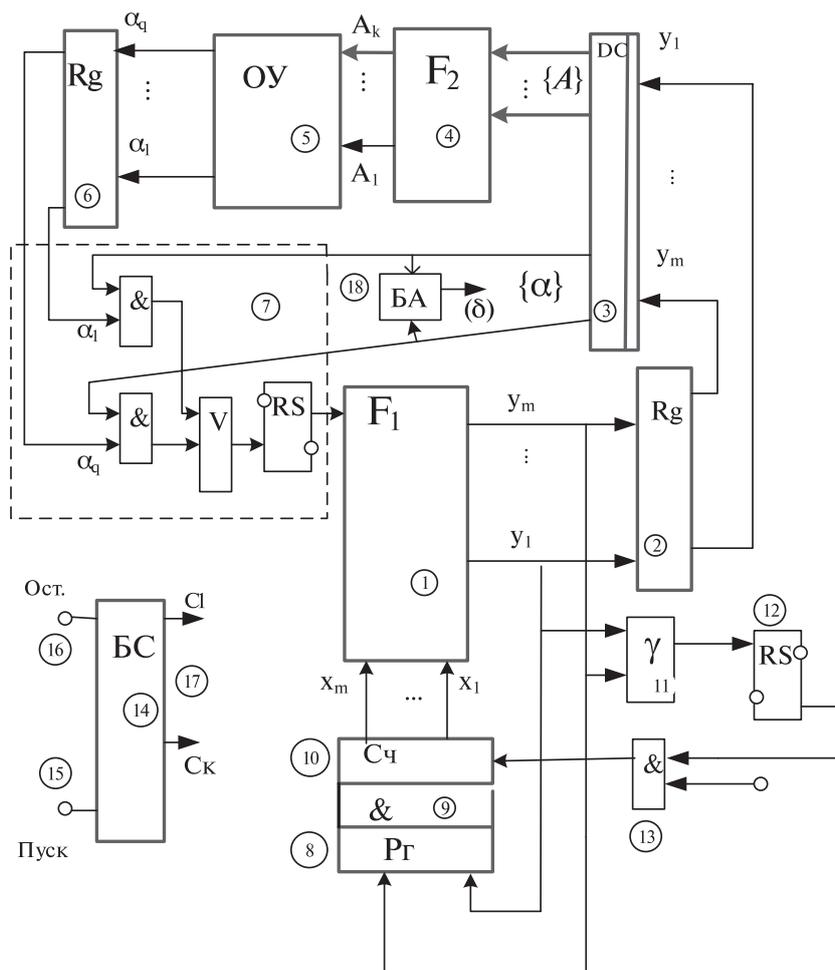
Наиболее эффективным является новый управляющий автомат Мухопода — НУАМх [10, 12], в структуру которого введен логический блок ЛБ(7) из ( $q$ ) двухходовых элементов «И» (рис. 2). Адресация элементов «И» для выбора одного  $\alpha_j \in \{\alpha\}$  логического условия производится через подмножество  $\{\alpha\}$  выходов дешифратора ДС(3), независимое от подмножества  $\{A\}$  выбора операторов действия  $A_1 \dots A_k$  УА.

На рисунке 2 блок БА(18) определяет условие  $d$  принадлежности сигнала на выходе ДС(3) к подмножеству  $\{\alpha\}$ .

НУАМх в основном режиме работает как УАМ<sub>L</sub> с одной схемой  $F_1(1)$ , а не с двумя, как УАМ<sub>L</sub>. При введении в блок синхронизации таймера в виде счетчика Сч(18) и RS-триггера(19), фиксирующего необходимость выдержки времени  $T$ , НУАМх без изменения структурной организации работает как УАМг.

Метод проектирования НУАМх по заданной ГСА (рис. 3) сводится к следующему:

— производится разметка состояний по принципиально новому способу. В ГСА отмечаются как начало (входы) операторов  $A_1 \dots A_k$ , так и входы логических операторов  $\alpha_1 \dots \alpha_q$ .



**Рис. 2.** Новый управляющий автомат Мухопода со счетчиком

Граф переходов НУАМх представлен на рисунке 4, а переходы вне счетчика заданы таблицей 2.

В таблицах 3 и 4 представлены правила выбора логических условий  $\alpha_j \in \{\alpha\}$  и операторов действия  $A_i \in \{A\}$  по кодам состояний  $a(t)$ .

Условие ( $\gamma$ ) прибавления «1» к содержимому счетчика запишется в виде  $\gamma = \alpha(a_0 + \dots + a_{15} + a_{16}) = \alpha(y_5 + y_5 y_4 y_3 y_2 y_1)$ . Здесь для реализации переходов по счетчику только при значениях  $\alpha_j = 1$  произведена замена переменных:  $\alpha_4 = \beta_4$ .

### 3. Реализация программной модели на микроконтроллере

Для аппаратной реализации НУАМх необходимо перейти к функциональному проектированию  $F_1(1)$  на ПЛМ. Для создания новой программной версии выполняются следующие действия:

- в ОЗУ размещаются таблицы 2–4 для выбора  $A_i \in \{A\}$ ,  $\alpha_j \in \{\alpha\}$  и определения кода  $y_1 y_2 \dots y_m$ ;
- разрабатывается фрагмент программы, реализующей функции дешифратора, логического блока ЛБ(7) и функции вычисления условия  $\gamma$ .



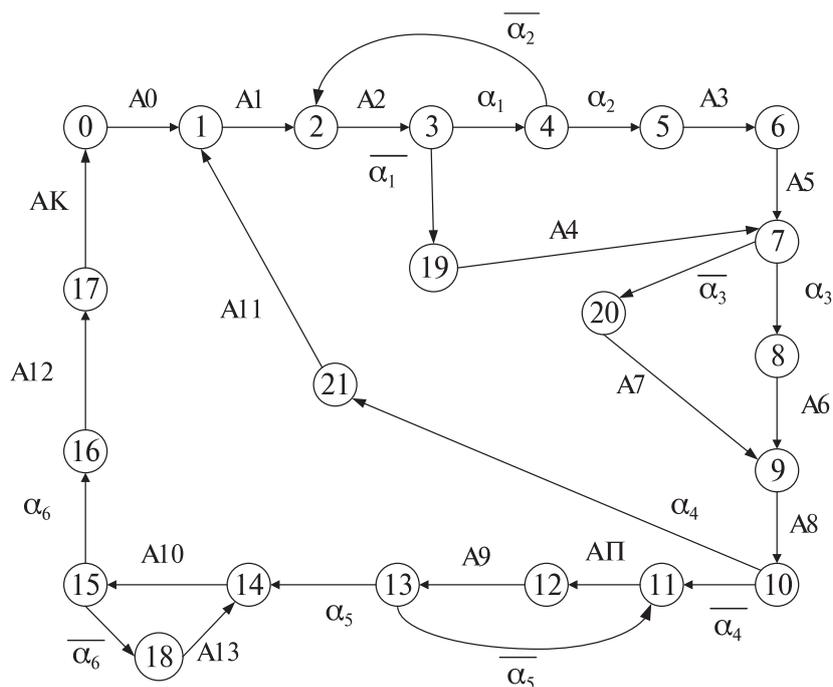


Рис. 4. Граф переходов НУАМх

Таблица 2. Переходы вне счетчика

№	a(t)	N(t)	a	a(t+1)	N(t+1)
1	4	00100	$\overline{\alpha_2}$	2	00010
2	3	00011	$\overline{\alpha_1}$	19	10011
3	19	10011	—	7	00111
4	7	00111	$\overline{\alpha_3}$	20	10100
5	20	10100	—	9	01001
6	10	01010	$\overline{\beta_4}$	21	10101
7	21	10101	—	1	00001
8	13	01101	$\overline{\alpha_5}$	11	01011
9	15	01111	$\overline{\alpha_6}$	18	10010
10	18	10010	—	14	01110
11	17	10001	—	0	00000

Таблица 3. Выбор логических условий

$\alpha$	1	2	2	4	5	6
a(t)	3	4	7	10	13	15

Таблица 4. Выбор команд управления

A(t)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	A <sub>П</sub>	A <sub>к</sub>
a(t)	0	1	2	5	19	6	8	20	9	12	14	18	16	11	17

Программной моделью с таблицами 2–4 следует управлять для того, чтобы обеспечить ее функционирование, при этом переходы должны реализовываться как в НУАМх. Для этого разработан алгоритм управления программной моделью, также представленный в виде ГСА. Расшифровка операторов  $V_k \in \{V\}$  приведена в таблице 5. Логические операторы определяются следующим образом:

$\gamma$  — необходимость прибавления «1» к счетчику Сч(10);

$\delta$  — выбор операторов  $\{A\}$ ;

T — команды длительностью T выполнены;

E — все переходы реализованы (end).

Алгоритм управления программной моделью также целесообразно реализовать с выбором логических условий по таблице 6.

Таким образом, в целом программная версия управляющего автомата по заданной ГСА представляется в виде двух взаимодействующих программ:

- самой программной модели в виде НУАМх;
- верхнего уровня управления программной моделью, реализованного также в виде программы (рис. 5) для выбранного типа микроконтроллера.

Эта программная версия для выбранного типа микроконтроллера составляется один раз. При смене исходной ГСА необходимо лишь изменить содержимое массива ОЗУ. Предложенный способ создания программной версии управляющего автомата назван структурно-автоматным программированием. Введенный ранее [19], этот метод базировался на использовании более сложной модели автоматов, в которой применялся мультиплексор и схема адресации для выбора одного логического условия. Применение структурно-автоматной модели с вариантом управляющего автомата в виде НУАМх существенно упрощает программную версию.

**Таблица 5.** Операторы программной модели УА

V	Семантика
1	$\langle 0 \rangle \rightarrow \text{Сч}(10), \text{Pг}(6), \text{RS}(12)$
2	Считывание $F_1(1)$
3	$\text{И}(13) \text{ — } +1 \text{ к Сч}(10)$
4	Опрос DC(3)
5	$\langle 1 \rangle \rightarrow \text{RS}(19)$
6	Включение таймера
7	Опрос схемы окончания T
8	+1 к Сч(T)
9	$A_i \in \{A\}$ Опрос схемы E (end)
10	$\langle \text{Pг}(8) \rangle \rightarrow \text{Сч}(10)$
11	Работа завершена

**Таблица 6.** Выбор логических условий для управления программной моделью

$\alpha$	$\gamma$	$\delta$	T	E
a(t)	2	4	5	10

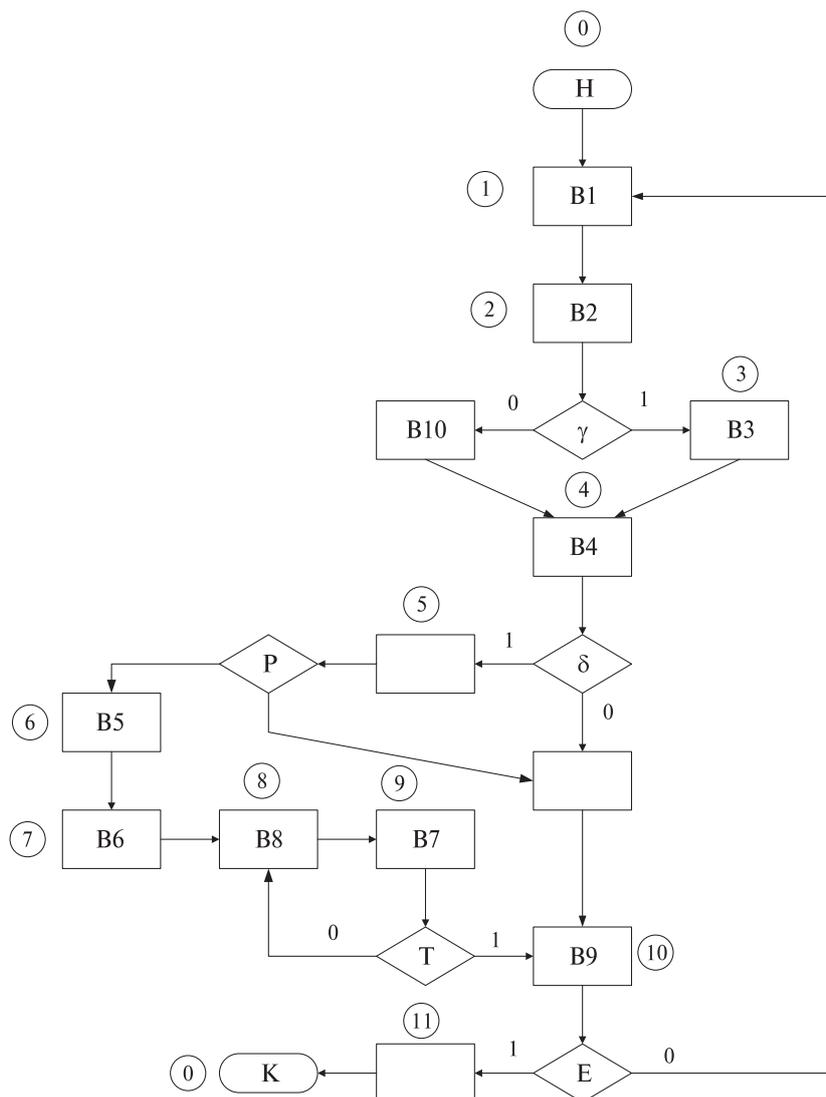


Рис. 5. Алгоритм управления программной моделью

Особо отметим: чем сложнее заданная ГСА для  $УАМ_r$  и  $УАМ_L$  тем больше команд в программе, реализующей автоматную версию. Но для структурно-автоматного программирования это не так, поскольку программная модель НУАМх не зависит от степени сложности управляющего автомата, а комплекс двух взаимодействующих программных автоматов весьма прост и не требует большого количества команд микроконтроллера. Поэтому листинг всей программы не приводится.

### Заключение

В статье развит метод структурно-автоматного программирования, основанный на создании программной версии управляющих автоматов нового типа с оригинальной структурной организацией. В их структуру введен логический блок из (q) двухвходовых элементов «И», адресация которых для выбора одного

логического условия  $\alpha_j$  из множества  $\alpha_1 \dots \alpha_q$  осуществляется подмножеством  $\{\alpha\}$  выходов дешифратора состояний, независимым от подмножества  $\{A\}$  выбора операторов действия  $A_1 \dots A_k$ . Задание для создания программной версии представлено в виде граф-схемы алгоритма, реализация которого по структуре нового управляющего автомата не зависит от степени сложности ГСА. Этот метод наиболее эффективен для программной реализации высокосложных и особо сложных автоматов.

### Библиографический список

1. Новиков Д. А. Кибернетика / Д. А. Новиков // Проблемы управления. — 2016. — № 1. — С. 73–81.
2. Swarm intelligence and bio-inspired computation: theory and applications / Ed. by X.-Sh. Yang et al. — Amsterdam, Boston: Elsevier, 2013. — 450 p.
3. Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника / Е. П. Угрюмов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2010. — 760 с.
4. Woods R. E. Digital image processing: 2nd Ed. / R. E. Woods, R. C. Gonzales. — NJ: Prentice Hall, 2002. — 813 p.
5. Поликарпова Н. Автоматное программирование / Н. Поликарпова, А. А. Шалыто. — СПб.: Питер, 2009. — 176 с.
6. Харрис Д. М. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера / М. Д. Харрис, С. Л. Харрис. — М.: ДМК Пресс, 2018. — 356 с.
7. Соловьев В. В. Логическое проектирование цифровых систем на основе ПЛИС / В. В. Соловьев, А. Климович. — М.: Телеком, 2008. — 374 с.
8. Труды по теории синтеза и диагноза конечных автоматов и релейных устройств / под ред. В. В. Сапожникова, Вл. В. Сапожникова. — СПб.: Эл-мор, 2009. — 894 с.
9. Мухопад Ю. Ф. Структура управляющих автоматов технических систем железнодорожной автоматики / Ю. Ф. Мухопад, А. Ю. Мухопад, Д. Ц. Пунсык-Намжилов // Автоматика на транспорте. — СПб.: ПГУПС, 2018. — Т. 4, № 1. — С. 88–105.
10. Мухопад Ю. Ф. Структурная организация управляющих автоматов нового типа для технических систем железнодорожной автоматики / Ю. Ф. Мухопад, А. Ю. Мухопад, Д. Ц. Пунсык-Намжилов // Автоматика на транспорте. — СПб.: ПГУПС, 2019. — Т. 5, № 2. — С. 244–255.
11. Патент на полезную модель № 183109. Российская Федерация, G06F 9/00, G05F 9/00. Управляющий автомат № 2018115113. — Заявл. 23.04.2018; опубл. 11.09.2018. — Бюл. № 26.
12. Патент на полезную модель № 191742. Российская Федерация, G06F 9/00. Управляющий автомат с мажоритарно-резервируемой комбинационной схемой: № 2019104150 / Ю. Ф. Мухопад, А. Ю. Мухопад, Д. Ц. Пунсык-Намжилов. — Заявл. 14.02.2019; опубл. 19.08.2019. — Бюл. № 23.
13. Ульман Д. Д. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений / Д. Д. Ульман, Р. Мотвани, Д. Хопкрофт. — М.: Вильямс, 2016. — 528 с.
14. Максфилд К. Проектирование на ПЛИС. Архитектура, средства и методы / К. Максфилд. — М.: ДМК Пресс, 2015. — 407 с.
15. Баркалов А. А. Прикладная теория цифровых автоматов / А. А. Баркалов, Л. А. Титаренко. — Донецк: ДонНТУ, 2013. — 320 с.

16. Горбатов В. А. Теория автоматов / В. А. Горбатов, А. В. Горбатов, М. В. Горбатова. — М.: Астрель, 2008. — 699 с.
17. Кудрявцев В. Б. Теория автоматов / В. Б. Кудрявцев, Ф. Б. Алешин, А. С. Подколзин // МГУ им. Ломоносова. — М.: Юрайт, 2018. — 320 с.
18. Мухопад А. Ю. Теория управляющих автоматов технических систем реального времени / А. Ю. Мухопад. — Новосибирск: Наука, 2015. — 176 с.
19. Мухопад А. Ю. Структурно-автоматное программирование / А. Ю. Мухопад // Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов: сб. науч. ст. VI международной научно-практической конференции. — Барнаул, 2016. — С. 43–48.

**A. Yu. Mukhopad**

**Yu. F. Mukhopad**

*Chair of "Computer-Aided Manufacturing",  
Irkutsk State Railway Transport University, Irkutsk*

## **PROGRAM IMPLEMENTATION OF COMPLICATED CONTROL AUTOMATA**

Design methods for software versions of control automata essentially depend on verification of structural models of complicated and highly complicated automata for real-time engineering systems. It is suggested to use a new original structural model of an automaton, where a logical block organized as two-input elements "1" is used addressing via subset of  $\{\alpha\}$  logical conditions  $\alpha_1 \dots \alpha_q$  from a decoder of conditions of a new control automaton independent of subset  $\{A\}$  action statements  $A_1 \dots A_k$ . The software version is presented in the form of sequence of operators as well as logical conditions in the form of a flowgraph. Implementation of the flowgraph for a software model on a microcontroller is simple and identical for any degree of complexity of the given. The design method of the software version in question was termed as structural automata-based programming; the latter being one of the most efficient methods on record. The software model is compiled once from the selected type of microcontrollers. In case of the initial operation change it is required only to alternate the meaning of the working storage (OZU), which holds jump codes, pick tables for logical conditions and action statements.

Automaton, control, program, combinational circuit, working storage, operator algorithmic schemes

### **References**

1. Novikov D. A. (2016) Kibernetika [Cybernetics]. *Problemy upravleniya [Control issues]*, no. 1, pp. 73–81. (In Russian)
2. (2013) Swarm intelligence and bio-inspired computation: theory and applications. Ed. by X.-Sh. Yang et al. Amsterdam, Boston, Elsevier, 450 p.
3. Ugryumov E. P. (2010) Tsyfrovaya skhemotekhnika [Digital circuit engineering]. Saint Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 760 p. (In Russian)
4. Woods R. E. & Gonzales R. C. (2002) Digital image processing: 2nd Ed. New Jersey, Prentice Hall Publ., 813 p.
5. Polikarpova N. & Shalyto A. A. (2009) Avtomatnoye programmirovaniye [Automata-based programming]. Saint Petersburg, Peter Publ., 176 p. (In Russian)

6. Harris D. M. & Harris S. L. (2018) Tsifrovaya skhemotekhnika i arkhitektura kompyutera [Digital Design and Computer Architecture]. Moscow, DMK Press, 356 p. (In Russian)
7. Solovyev V. V. & Klimovich A. (2008) Logicheskoye proektirovaniye tsifrovyykh system na osnove PLIS [Logical design of digital systems based on FPGA]. Moscow, Telecom Publ., 374 p. (In Russian)
8. (2009) Trudy po teorii sinteza i diagnoza konechnyykh avtomatov i releinykh ustroystv [Proceedings on the theory of synthesis and diagnostics of finite automata and relay devices]. Ed. by V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov. Saint Petersburg, El-mor Publ., 894 p. (In Russian)
9. *Mukhopad Yu. F., Mukhopad A. Yu. & Punsyk-Namzhirov D. Ts.* (2018) Struktura upravlyayushchikh avtomatov tekhnicheskikh system zheleznodorozhnoy avtomatiki [Arrangement of control automata for railway automation engineering systems]. *Avtomatika na transporte [Transport automation]*. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University] Publ., vol. 4, no. 1, pp. 88–105. (In Russian)
10. *Mukhopad Yu. F., Mukhopad A. Yu. & Punsyk-Namzhirov D. Ts.* (2019) Strukturnaya organizatsiya upravlyayushchikh avtomatov novogo tipa dlya tekhnicheskikh system zheleznodorozhnoy avtomatiki [Structural organization of the new-type control automata for railway automation engineering systems]. *Avtomatika na transporte [Transport automation]*. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University] Publ., vol. 5, no. 2, pp. 244–255. (In Russian)
11. (2018) Patent na poleznuyu model no. 183109. Rossiyskaya Federatsiya, G06F 9/00, G05F 9/00. Upravlyayushchiy avtomat no. 2018115113. [Useful model patent no. 183109. Russian Federation, G06F 9/00, G05F 9/00. Control automaton no. 2018115113]. Application April 23rd, 2018, published September 11th, 2018. Bulletin no. 26. (In Russian)
12. (2019) Patent na poleznuyu model no. 191742. Rossiyskaya Federatsiya, G06F 9/00. Upravlyayushchiy avtomat s mazhoritarno-rezerviruemyy kombinatsionnoy skhemoy: no. 2019104150 [Useful model patent no. 191742. Russian Federation, G06F 9/00. Control automaton with majority-reserved combinational circuit: no. 2019104150]. Yu. F. Mukhopad, A. Yu. Mukhopad, D. Ts. Punsyk-Namzhirov. Application February 14th, 2019, published August 19th, 2019. Bulletin no. 23. (In Russian)
13. Ullman J. D., Motwani R. & Hopcroft J. E. (2016) Vvedeniye v teoriyu avtomatov, yazykov i vychisleniy [Introduction to Automata, Languages and Computation]. Moscow, Williams Publ., 528 p. (In Russian)
14. *Maxfield C.* (2015) Proektirovaniye na PLIS. Arkhitektura, sredstva i metody [FPGA design. Architecture, facilities and methods]. Moscow, DMK Press, 407 p. (In Russian)
15. *Barkalov A. A. & Titarenko L. A.* (2013) Prikladnaya teoriya stifrovyykh avtomatov [Applied theory of digital automata]. Donetsk, DonNTU [Donetsk National Technical University] Publ., 320 p. (In Russian)
16. *Gorbatov V. A., Gorbatov A. V. & Gorbatova M. V.* (2008) Teoriya avtomatov [Theory of automata]. Moscow, Astrel Publ., 699 p. (In Russian)
17. *Kudryavtsev V. B., Aleshin F. B. & Podkolzin A. S.* (2018) Teoriya avtomatov [Theory of automata]. MGU im. Lomonosova [Lomonosov Moscow State University]. Moscow, Urait Publ., 320 p. (In Russian)
18. *Mukhopad A. Yu.* (2015) Teoriya upravlyayushchikh avtomatov tekhnicheskikh system realnogo vremeni [Theory of control automata for real-time engineering systems]. Novosibirsk, Nauka [Science] Publ., 176 p. (In Russian)

19. *Mukhopad A. Yu.* (2016) Strukturno-avtomatnoye programmirovaniye. Mnogoyaderniye protsessory, parallelnoye programmirovaniye, PLIS, sistemy obrabotky signalov [Structural automata-based programming. Multi-core processors, concurrent programming, FPGA, signal processing systems]. Collection of academic papers of the 6th International Research and Training Conference. Barnaul, pp. 43–48. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Вал. В. Сапожниковым  
Поступила в редакцию 16.02.2020, принята к публикации 10.03.2020*

*МУХОПАД Александр Юрьевич* — доктор технических наук, доцент Иркутского государственного университета путей сообщения  
e-mail: jcmg@mail.ru

*МУХОПАД Юрий Федорович* — доктор технических наук, заслуженный деятель науки РФ, заслуженный профессор Иркутского государственного университета путей сообщения  
e-mail: bts48@mail.ru

© Мухопад А. Ю., Мухопад Ю. Ф., 2020

Подписано в печать с оригинал-макета 22.06.2020.  
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 14,25 Уч.-изд. л. 7,5.  
Установочный тираж 300 экз. Заказ 000.

Отпечатано в типографии ООО «Издательство ОМ-Пресс»,  
190031, СПб., наб. реки Фонтанки, 117.