



---

*Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»*

# **АВТОМАТИКА НА ТРАНСПОРТЕ**

---

## **TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH**

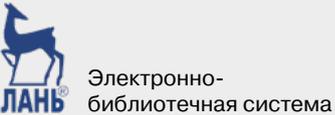
---

**Том 9 июнь 2023 № 2**



Журнал «Автоматика на транспорте» (г. Санкт-Петербург) основан в 2014 году.

Издание предназначено для полного освещения научных и практических достижений в области автоматического и автоматизированного управления на транспорте.

База данных	Ссылка	QR-код
	<a href="https://cyberleninka.ru/journal/n/avtomatika-na-transporte?i=1057282">https://cyberleninka.ru/journal/n/avtomatika-na-transporte?i=1057282</a>	
	<a href="https://www.elibrary.ru/title_about.asp?id=54938">https://www.elibrary.ru/title_about.asp?id=54938</a>	
	<a href="https://e.lanbook.com/journal/2566">https://e.lanbook.com/journal/2566</a>	
Сайт журнала	<a href="http://www.atjournal.ru/">http://www.atjournal.ru/</a>	

Подписано в печать 10.06.2023. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 12,37. Тираж 200 экз. Заказ .

Отпечатано в типографии ООО «Паблит», 127282, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1.

## МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Александр Никитин	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
Марек Мезитис	д-р наук, доцент, Рижский технический университет, Рига, Латвия
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

Наседкин Олег Андреевич	канд. техн. наук, доцент, заместитель главного редактора журнала «Автоматика на транспорте», ПГУПС, Санкт-Петербург
Кушпиль Игорь Васильевич	канд. техн. наук, научный редактор журнала «Автоматика на транспорте», ПГУПС, Санкт-Петербург
Баранов Леонид Аврамович	д-р техн. наук, профессор, РУТ (МИИТ), Москва
Безродный Борис Федорович	д-р техн. наук, профессор, НИИАС, Москва
Бубнов Владимир Петрович	д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург
Бушуев Сергей Валентинович	канд. техн. наук, доцент, УрГУПС, Екатеринбург
Грачев Владимир Васильевич	д-р техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург
Долгий Игорь Давидович	д-р техн. наук, профессор, РГУПС, Ростов-на-Дону
Ефанов Дмитрий Викторович	д-р техн. наук, профессор, СПбПУ, Санкт-Петербург
Малыгин Игорь Геннадьевич	д-р техн. наук, профессор, ИПТ РАН, Санкт-Петербург
Марков Дмитрий Спиридонович	канд. техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург
Никищенков Сергей Алексеевич	д-р техн. наук, профессор, СамГУПС, Самара
Розенберг Ефим Наумович	д-р техн. наук, профессор, НИИАС, Москва
Ходаковский Валентин Аветикович	д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург
Хомоненко Анатолий Дмитриевич	д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург

## INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL

Alexander Nikitin	D. Sc., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Editor-in-chief of «Transport automation research», St. Petersburg, Russia
Konstantin Bochkov	D. Sc., Professor, Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus
Marek Mezitis	Ph. D., Associate Professor, Riga Technical University, Riga, Latvia
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

Oleg A. Nasedkin	Ph. D., Associate Professor, deputy editor-in-chief of «Transport automation research», Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg
Igor V. Kushpil	Ph. D., science editor of «Transport automation research», Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg
Leonid A. Baranov	D. Sc., Professor, Russian University of Transport, Moscow
Boris F. Bezrodnyy	D. Sc., Professor, Scientific Research Institute of Automation and Communication, Moscow
Vladimir P. Bubnov	D. Sc., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg
Sergey V. Bushuev	Ph. D., Associate Professor, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg
Vladimir V. Grachev	D. Sc., Associate 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., Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg
Igor G. Malygin	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
Sergey A. Nikischenkov	D. Sc., Professor, Samara State Transport University, Samara
Efim N. Rozenberg	D. Sc., Professor, Scientific Research Institute of Automation and Communication, Moscow
Valentin A. Khodakovsky	D. Sc., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg
Anatoliy D. Khomonenko	D. Sc., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg

Научно-технический журнал «Автоматика на транспорте»	СОДЕРЖАНИЕ
<b>Учредитель</b> 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»	<b>ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ</b> <i>Кудрявцева Т. Ю., Схведиани А. Е., Артеева В. С., Плотников Д. Г., Баните А. В.</i> Способы совершенствования системы мониторинга и рейтингования филиалов логистической компании.....129  <i>Сухарев Н. В.</i> Система слежения за автомобильным транспортом на базе беспилотных летательных аппаратов с применением технологии радиочастотной идентификации и камер инфракрасного диапазона.....141
<b>Издатель</b> ООО «Издательский Центр «РИОР» по договору № ЭА94514 от 19.12.2022	
<b>Главный редактор</b> А. Б. Никитин, д-р техн. наук, профессор ПГУПС, заведующий кафедрой	<b>ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ</b> <i>Никитин А. Б., Наседкин О. А., Лыков А. А., Журавлева Н. А., Корниенко А. А., Копытов Д. В.</i> Построение распределенных микропроцессорных систем управления движением поездов .....153
<b>Редакция журнала</b> Научный редактор — И. В. Кушпиль, канд. техн. наук Перевод — Д. В. Дементьева Литературный редактор и корректор — Н. В. Юдина Верстка — И. Г. Иваньшина	<i>Грошев В. А.</i> Организация информационной структуры цифровой системы оперативного управления работой станции .....162  <i>Сидоренко В. Г., Логинова Л. Н., Сафронов А. И.</i> Разработка информационного обеспечения для интеллектуального управления городскими рельсовыми транспортными системами .....178
<b>Адрес учредителя</b> 190031, РФ, Санкт-Петербург, Московский пр., 9, кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Телефон: +7(812)457-85-79 E-mail: ait.automatika@yandex.ru Сайт: www.atjournal.ru	<b>ЭЛЕКТРОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ</b> <i>Константинова Т. Ю., Лыков А. А., Марков Д. С., Наседкин О. А., Соколов В. Б.</i> Технология имитационного моделирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики .....193
<b>Адрес издателя</b> 127214, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1, оф. 402	
<b>Свидетельство о регистрации средства массовой информации</b> 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 подписки Агентство «Книга-Сервис» 33316  © ФГБОУ ВО ПГУПС, 2023	<b>ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ СИСТЕМЫ</b> <i>Ефанов Д. В., Погодина Т. С.</i> Самодвойственные функциональные элементы для синтеза контролепригодных цифровых систем.....205

Scientific and technical journal "Transport automation research"	CONTENTS
<b>FOUNDER</b>  Federal Railway Transport Agency Federal State Budget Educational Institution for Higher Education «Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University» «Automation and Remote Control on Railways» department	<b>OPERATION OF TRANSPORT SYSTEMS</b>  <i>Kudryavtseva T. Yu., Skhvediani A. E., Arteeva V. S., Plotnikov D. G., Banite A. V.</i> Methods for Improving the Monitoring System and Rating Evaluation of Branches of a Logistics Company ..... 140  <i>Sukharev N. V.</i> Vehicle Tracking System Based on Unmanned Aerial Vehicles Using Radio Frequency Identification Technology and Infrared Cameras ..... 151
<b>PUBLISHER</b>  "Publishing Center "RIOR", LLC № ЭА94514, 19.12.2022	
<b>EDITOR-IN-CHIEF</b>	<b>INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS</b>
Nikitin A. B., Doctor in Engineering, Professor, Head of Department	<i>Nikitin A. B., Nasedkin O. A., Lykov A. A., Zhuravleva N. A., Korniyenko A. A., Kopytov D. V.</i> Construction of Distributed Microprocessor-Based Train Control Systems ..... 161
<b>JOURNAL STAFF</b>	
Science editor: Igor V. Kushpil, Ph. D. English translation: Daria V. Dementieva, Ph. D. Editing and proofreading: Nadezhda V. Yudina Layout: Irina G. Ivanshina	<i>Groshev V. A.</i> Organizing Information Structure for a Digital Station Control System ..... 177  <i>Sidorenko V. G., Loginova L. N., Safronov A. I.</i> Development of Information Support for Intelligent Control of Urban Rail Transport Systems ..... 190
<b>FOUNDER'S ADDRESS</b>	<b>ELECTRONIC SIMULATION</b>
190031, Russia, St. Petersburg, Moskovskiy ave., 9, «Automation and Remote control on Railways» department +7(812) 457-85-79 ait.automatika@yandex.ru www.atjournal.ru	<i>Konstantinova T. Yu., Lykov A. A., Markov D. S., Nasedkin O. A., Sokolov V. B.</i> Technology of Simulation Modeling for Railway Automation and Remote Control Systems ..... 204
<b>PUBLISHER'S ADDRESS</b>	<b>TECHNICAL DIAGNOSTICS AND CONTROLLABLE SYSTEMS</b>
127214, Russia, Moscow, Polyarnaya str., 31Bc1, of. 402	<i>Efanov D. V., Pogodina T. S.</i> Self-Dual Functional Gates for the Synthesis of Controllable Digital Systems ..... 220
<b>MASS MEDIA REGISTRATION CERTIFICATE NUMBER</b>  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  Index Direct Mail Agency "Kniga-Service" 33316  © PGUPS, 2023	

УДК 656.073.21

## СПОСОБЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И РЕЙТИНГОВАНИЯ ФИЛИАЛОВ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ КОМПАНИИ

**КУДРЯВЦЕВА Татьяна Юрьевна**, д-р экон. наук, доцент, профессор Высшей инженерно-экономической школы; email: kudryavtseva\_tyu@spbstu.ru

**СХВЕДИАНИ Анги Ерастиевич**, канд. экон. наук, доцент Высшей инженерно-экономической школы; email: shvediani\_ae@spbstu.ru

**АРТЕЕВА Валерия Семеновна**, аспирант, ассистент Высшей инженерно-экономической школы; email: arteeva\_vs@spbstu.ru

**ПЛОТНИКОВ Дмитрий Георгиевич**, канд. техн. наук, доцент Высшей школы транспорта; email: plotnikov\_dg@spbstu.ru

**БАНИТЕ Аушра Владовна**, аспирант, ассистент Высшей школы транспорта; email: banite\_av@spbstu.ru

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

Стремительное развитие электронной коммерции и, следовательно, увеличение требований и ожиданий клиентов требуют от транспортно-логистических компаний применения улучшенных методов управления их деятельностью. В данной статье рассматриваются способы совершенствования системы мониторинга и рейтинговой оценки филиалов логистической компании по показателю фактической погрузки в тоннах за отчетный период. Предлагается при расчете рейтинговых баллов установить пограничное значение по % выполнения плана на основании статистических методов — расчета доверительного интервала по историческим данным, что позволит учесть статистически обоснованное отклонение фактических результатов от плановых. Кроме того, авторы предлагают оценивать показатель погрузки как интегральный — использовать для оценки и мониторинга эффективности погрузки несколько показателей, наиболее точно и полно отражающих результаты деятельности филиалов, что позволит учесть не просто выполнение плана филиалом, но и его достижения по сравнению с аналогичным периодом прошлого года. В заключении делается вывод о необходимости разграничения причин невыполнения плана на зависящие от операционной деятельности филиалов и на зависящие от внешних факторов, которые не связаны с операционной деятельностью филиалов.

**Ключевые слова:** логистическая компания; система мониторинга; рейтинговая оценка; оценка эффективности; рейтинг; методика рейтингования.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-129-140

### ▼ Введение

Транспортная отрасль вносит значительный вклад в развитие национальной экономики, создавая рабочие места и формируя национальный доход, а также способствуя эффективному функционированию и повышению конкурентоспособности других отраслей [1, 2]. В настоящее время транспортная отрасль в России входит в топ-10 отраслей, формирующих ее ВВП. Так, деятельность, связанная с транспортировкой и хранением, занимает 7-е место и составляет 6,3 % от общего ВВП, по данным Росстата.

Быстрое развитие электронной коммерции и растущие ожидания клиентов требуют от транспортно-логистических компаний применения улучшенных методов управления деятельностью с целью обеспечения эффективного и устойчивого их развития [3].

В конкурентной среде необходимо, чтобы транспортные компании могли верно оценивать и сравнивать себя с другими с помощью правильно выстроенной системы мониторинга [4]. Кроме того, проводить такую оценку необходимо и внутри самой компании, сравнивая эффективность работы ее филиалов. Часто для оценки эффективности филиалов транспортно-логистические компании используют инструмент рейтингования, под которым понимается процесс оценки значимости или эффективности объектов [5–8]. Рейтинговая оценка (рейтинговый балл) основывается на балльной системе в зависимости от выполнения ключевых показателей эффективности [5] и представляет собой числовой показатель, характеризующий значимость или эффективность объекта, используемый для присвоения

объекту рейтинга. Обычно рейтинговая оценка является интегральной [9–11] и высчитывается по формуле:

$$R_i = \sum_{k=1}^m b_{ki} \cdot v_k, \quad (1)$$

где  $R_i$  — рейтинговая оценка  $i$ -го филиала;  
 $b_{ki}$  — значение балла  $i$ -го филиала по  $k$ -му ключевому показателю;  
 $v_k$  — вес  $k$ -го ключевого показателя.

В данной работе обсуждается совершенствование системы мониторинга в логистической компании по одному из ключевых показателей — фактическая погрузка в тоннах за отчетный период (далее по тексту — погрузка) за счет корректировки рейтинговой оценки результатов деятельности 16 ее филиалов.

По действующей методике логистическая компания оценивает показатель погрузки по максиминному методу нормирования [12] с разделением филиалов на 2 группы: 1) филиалы, превысившие план, получают дополнительные баллы; 2) филиалы, не выполнившие план, получают штрафные баллы.

Так, превысившие план филиалы получают дополнительные баллы, рассчитанные по формуле (2a) нормирования:

$$b_i = \frac{s_i - s_{\min}}{s_{\max} - s_{\min}}, \quad (2a)$$

где  $b_i$  — нормированный балл  $i$ -го филиала;  
 $s_i$  — показатель выполнения плана погрузки  $i$ -го филиала, в %;  
 $s_{\max}$  — максимальный показатель выполнения плана погрузки среди всех филиалов,  
 $s_{\min}$  — минимальный показатель выполнения плана погрузки, равен 100 %.

Не выполнившие план филиалы получают штрафные баллы, рассчитанные по формуле (2b) нормирования:

$$b_i = \left[ \frac{s_i - s_{\min}}{s_{\max} - s_{\min}} \right] - 1, \quad (2b)$$

где  $s_{\max}$  — пограничное значение — максимальный показатель выполнения плана погрузки, равен 100 %;

$s_{\min}$  — минимальный показатель выполнения плана погрузки среди всех филиалов.

Однако в действующей методике есть свои недостатки. Во-первых, отклонение от плана даже на 0,01 % приводит к штрафованию филиала, хотя данное отклонение может быть обычной погрешностью, статистически обоснованным отклонением. Во-вторых, показатель погрузки оценивается как отношение фактической погрузки к утвержденному плану, а улучшение деятельности филиала по сравнению с прошлым годом не учитывается, т. е. развитие филиала в динамике не оценивается.

Анализ способов совершенствования методики рейтингования

Первый способ совершенствования рейтинговой оценки результатов деятельности 16 филиалов логистической компании по показателю «погрузка» заключается в установлении пограничного значения для % выполнения плана. Так, пороговое значение, согласно которому филиалы будут получать дополнительные/штрафные баллы, будет равно не 100 %, как в действующей методике, а будет рассчитано как интервал 10 % отклонения от выполнения плана на основании исторических данных о выполнении плана.

Второй способ состоит в оценке эффективности погрузки через интегральный показатель, агрегирующий несколько показателей, наиболее точно и полно отражающих результаты деятельности филиалов.

Таким образом, данное исследование предлагает способ совершенствования рейтинговой оценки результатов филиалов логистической компании. Данные предложения позволят устранить «смещение» при оценке эффективности филиалов.

На рис. 1 представлен алгоритм совершенствования системы мониторинга, включающий два возможных способа трансформации методики рейтингования логистической сети по показателю погрузки. Так, дальнейшее совершенствование методики рейтингования предполагает установление пограничного значения по % выполнения плана на основании доверительного интервала и/или оценивание показателя погрузки через комплекс показателей. В данном исследовании будет рассмотрено как отдельное

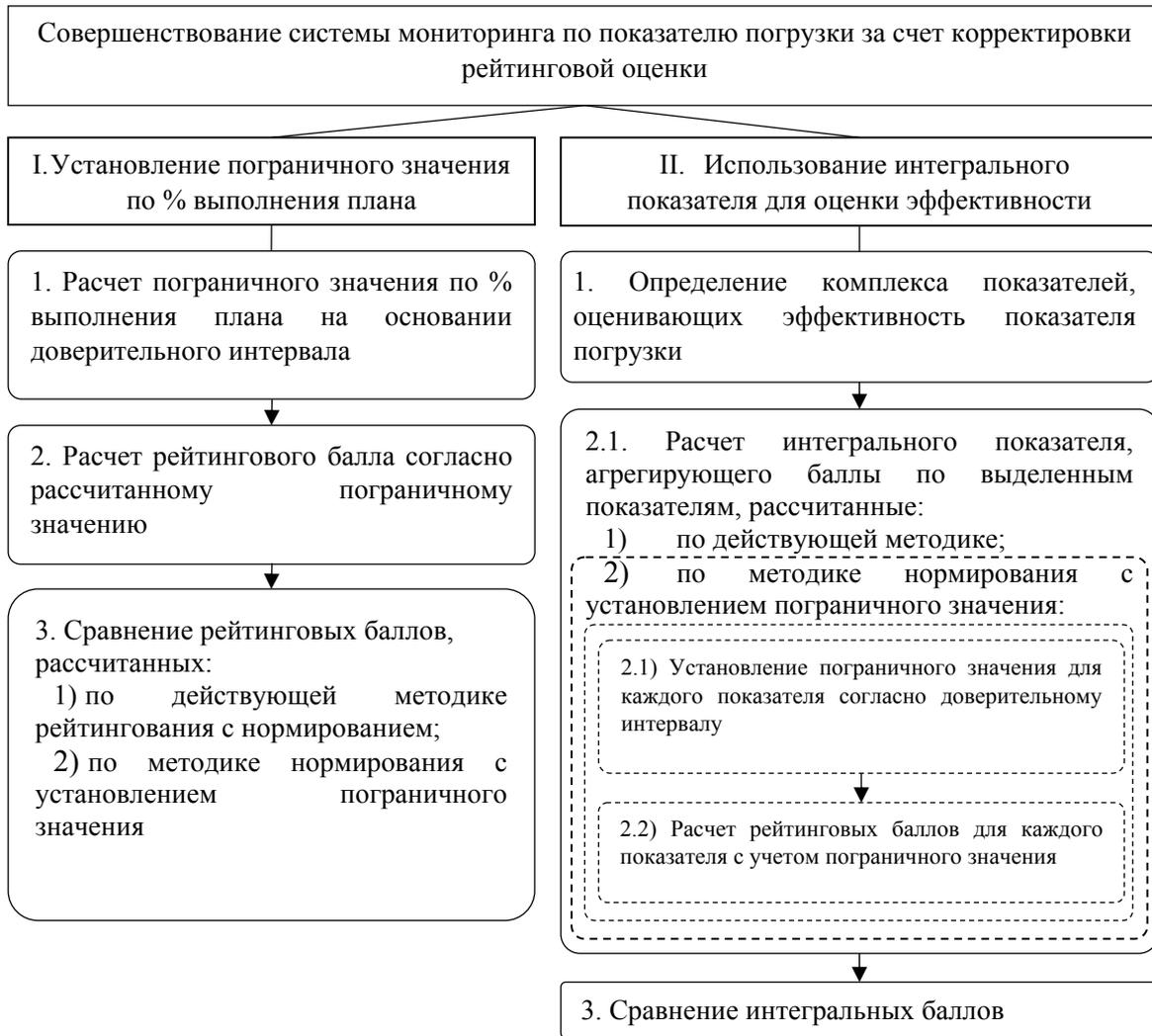


Рис. 1. Алгоритм совершенствования системы мониторинга на основании корректировки оценки рейтингования

применение данных способов, так и использование первого способа в рамках второго.

1. Первый способ заключается в расчете пограничного значения % выполнения плана на основании динамики прошлых периодов. Так, фактическое значение показателя будет сравниваться не со 100 % выполнения плана, а с нижней границей 10%-го интервала среднего значения отклонения от плана, рассчитанного согласно историческим показателям отклонения от плана. Таким образом, на основании рассчитанного пограничного значения филиалы будут разделены на две группы и в зависимости от достижения этого значения получают дополнительные баллы или штрафные.

Для исследования отклонений устанавливаемых плановых значений от выполненной статистическими методами прогнозной

оценки используется расчет доверительного интервала по показателю: процент перевыполнения/недовыполнения плана погрузки по доступным историческим данным за период с 2018 по 2021 год в целом по всем филиалам.

Для вычисления месячного отклонения фактического значения погрузки филиала от планового применяется следующая формула:

$$d_{it} = \frac{\text{Факт}_{it} - \text{План}_{it}}{\text{План}_{it}}, \quad (3)$$

где  $d_{it}$  — % перевыполнения/недовыполнение плана  $i$ -го филиала в  $t$ -м месяце;

$\text{Факт}_{it}$  — фактическое значение показателя погрузки  $i$ -го филиала в  $t$ -м месяце;

$\text{План}_{it}$  — плановое значение по показателю погрузки  $i$ -го филиала в  $t$ -м месяце.

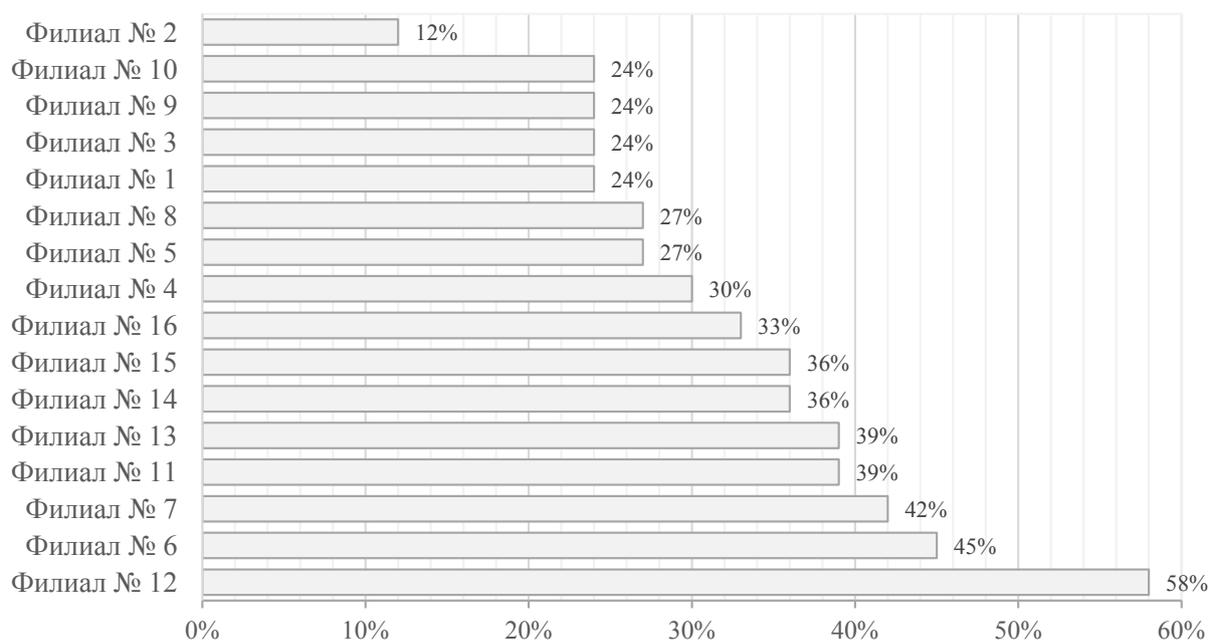


Рис. 2. Частота невыполнения плана в разрезе филиалов на основании данных выполнения плана с 2018 по 2021 год

Доверительный интервал для статистически обоснованного отклонения фактических результатов от плановых будет рассчитан как 10%-й интервал для среднего значения отклонения. Рассчитанный доверительный интервал будет указывать диапазон значений, в пределах которого может находиться среднее значение отклонения плана.

Далее будет произведен расчет и сравнение рейтинговых баллов, определенных по действующей методике логистической компании с нормированием и с нормированием с установлением пограничного значения согласно доверительному интервалу.

2. Второй способ состоит в расчете рейтинговой оценки как интегрального показателя, т. е. эффективность показателя погрузки будет определяться через несколько показателей.

Сначала будут определены показатели, участвующие в формировании рейтинговой оценки по показателю «погрузка». Далее будет произведен расчет интегрального показателя методом суммы средневзвешенных арифметических показателей, который позволяет учесть влияние отдельных показателей по формуле (1).

Показатели могут быть включены с равными весами, высчитанными как 1/количество показателей. Однако если веса имеют значение, то они оцениваются экспертным методом.

После будет произведено сравнение интегральных рейтингов, агрегирующих баллы по выделенным показателям, рассчитанные по действующей методике с нормированием и с нормированием с установлением пограничного значения согласно доверительному интервалу.

### 1. Расчет рейтинговых баллов с учетом установления пограничного значения погрузки на основании доверительного интервала

Согласно данным по выполнению плана с 2018 по 2021 год, % невыполнения плана является статистически значимым для всех филиалов. Так, частота невыполнения плана во всех случаях выше 10 % (см. рис. 2). Кроме того, для филиалов № 7, 6 и 12 частота невыполнения плана достигает более 40 % — 42, 45 и 58 % соответственно.

На основании исследования частоты невыполнения плана с 2018 по 2021 год можно сделать вывод о том, что невыполнение плана не является статистической погрешностью, а значит, может быть обосновано либо операционным характером — связан напрямую с функционированием филиала, либо с системными проблемами планирования: показатели территорий менее стабильны и подвержены более сильно внешнему воздействию.

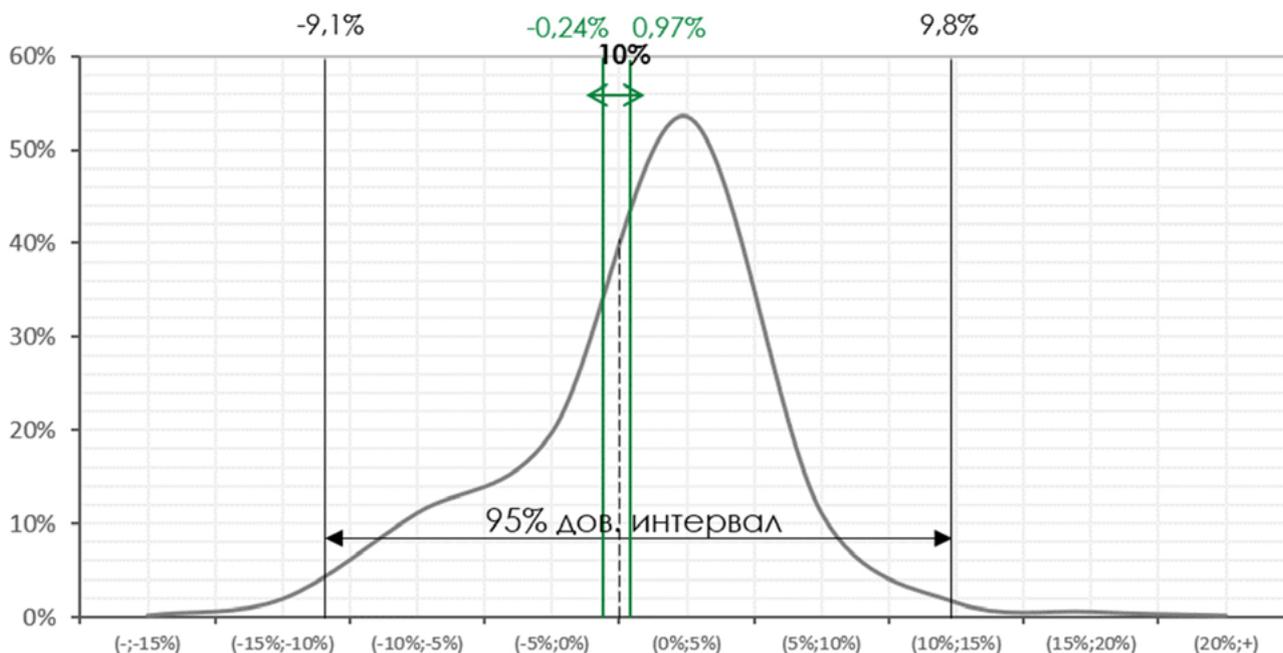


Рис. 3. График распределения показателей прироста выполнения плана с 2018 по 2021 год

Таким образом, статистически значимая частота невыполнения плана может быть связана как с проблемой планирования, так и с проблемой оценки эффективности. А значит, необходимо более гибко подходить к оценке результата: при оценке показателя процента выполнения плана погрузки можно сравнивать его не со 100 %, а со скорректированным пограничным значением, которое будет учитывать возможное статистически обоснованное отклонение фактических результатов от плановых.

Далее был рассчитан доверительный интервал для значения месячного отклонения фактического значения погрузки от планового. Расчет доверительного интервала на уровне значимости 0,05 в целом по филиалам показал, что в среднем отклонение показателя % выполнения плана варьируется от -9,1 до 9,8 % (см. рис. 3). Так, 95 % доверительный интервал для процента выполнения плана находится между 91,9 и 109,8 %.

Для того чтобы оценить статистически обоснованное отклонение фактических результатов от плановых, рассчитаем доверительный интервал при уровне значимости 0,9, что позволит оценить отклонение фактических результатов от плановых в 10%-м интервале от среднего значения отклонения.

Расчет доверительного интервала показал, что 10%-й интервал отклонений фактических значений от плановых находится от -0,24 до 0,97 % (см. рис. 3).

На основании данного доверительного интервала для среднего отклонения можно оценить, входят ли показатели будущего периода (08/2021) в разрезе филиалов в указанный интервал (см. рис. 4).

Представленное на рис. 4 сравнение показателей филиалов на 01/2022 демонстрирует, что не все филиалы входят в доверительный интервал, часть показывают отклонение от плана, выходящее за границы 10 % интервала. Так, филиалы № 7, 6 и 1 демонстрируют отклонение от среднего значения более чем на 0,24 %. В то время как филиал № 13 хоть и не выполнил план, но его отклонение, согласно доверительному интервалу, является статистически обоснованным.

Таким образом, согласно рассчитанному через доверительный интервал статистически обоснованному отклонению фактических результатов от плановых, можно скорректировать пограничное значение выполнения плана погрузки со 100 до 99,76 %.

В табл. 1 представлено сравнение рейтинговых баллов, рассчитанных по действующей

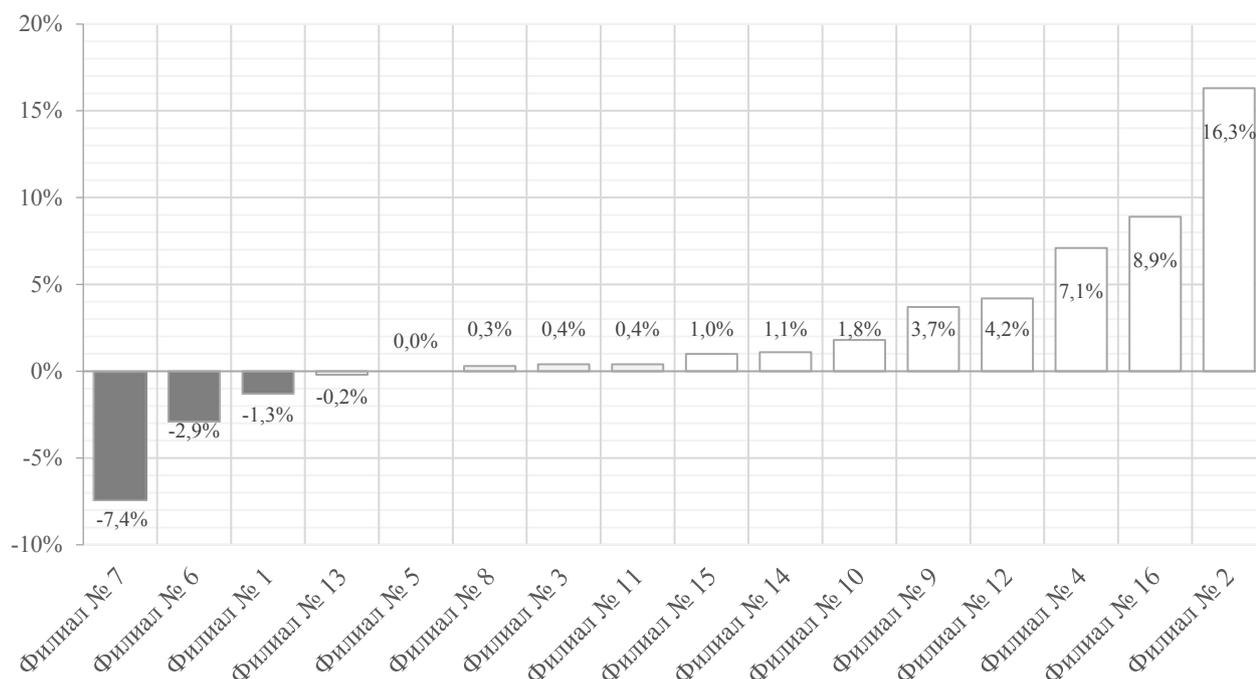


Рис. 4. Оценка отклонения фактического значения погрузки филиалов от планового на 08/2021 на основании доверительного интервала

**Таблица 1. Сравнение рейтинговых баллов, рассчитанных по действующей методике с нормированием и по методике с нормированием со скорректированным пограничным значением**

Филиал	К плану на 08/2021, %	Балл по действующей методике с нормированием	Балл по методике с нормированием с установлением пограничного значения
№ 2	116,3	12	13
№ 16	108,9	6,55	7,2
№ 4	107,1	5,23	5,8
№ 12	104,2	3,09	3,5
№ 9	103,7	2,72	3,1
№ 10	101,8	1,33	1,6
№ 14	101,1	0,81	1,1
№ 15	101,0	0,74	1,0
№ 3	100,4	0,29	0,5
№ 11	100,4	0,29	0,5
№ 8	100,3	0,22	0,4
№ 5	100,0	0,00	0,2
№ 13	99,8	-0,11	0,0
№ 1	98,7	-0,70	-0,4
№ 6	97,1	-1,57	-1,1
№ 7	92,6	-4	-3

методике с нормированием и по методике с нормированием со скорректированным пограничным значением до 99,76 %.

Сравнение рейтинговых баллов по двум методикам показывает, что методика нормирования с установлением пограничного значения на уровне 99,76 % позволяет присвоить штрафные баллы трем филиалам вместо четырех.

## 2. Расчет интегрального показателя рейтинга для оценки эффективности погрузки

По действующей методике показатель «погрузка» оценивается как частный, а не интегральный, таким образом, рейтинг по данному показателю формируется на основании одного показателя — % выполнение плана. Однако, согласно подходам по оценке эффективности, для более корректного измерения показателя «погрузки» необходимо использовать несколько показателей. Так, могут использоваться следующие показатели: % выполнения плана, % фактического значения погрузки к прошлому году и % плана к прошлому году, причем как в относительном, так и в абсолютном выражении (см. табл. 2). Возможное включение данных показателей в интегральный обосновано подходами к оценке

**Таблица 2. Описание показателей**

Показатели	Описание	Обоснование включения согласно подходу оценки эффективности
Факт/План	% выполнение плана	Целеориентированный подход
Факт-План	отклонение факта от плана	
Факт/ Факт <sub>прош</sub>	% к прошлому году	Подход совершенствования
Факт- Факт <sub>прош</sub>	отклонение текущего факта от прошлого аналогичного факта	
План/ Факт <sub>прош</sub>	% плана к прошлому году	Подход совершенствования
План- Факт <sub>прош</sub>	отклонение поставленного плана от прошлого факта	

эффективности, которые предложили Н. Акур и Л. Иглист [13].

Однако все показатели не могут участвовать в расчете рейтинга, так как они могут дублировать эффекты друг друга. Так, включение в интегральный показатель частных показателей, которые коррелируют друг с другом, может привести к переоценке одних филиалов по сравнению с другими в большем объеме. Для того чтобы избежать данной проблемы, были рассчитаны коэффициенты корреляции между показателями (см. табл. 3).

Согласно таблице с коэффициентами корреляции, показатель погрузки можно оценивать через интегральный показатель, который будет представлять одну из следующих комбинаций:

- % факта к плану и % факта к прошлому году;
- % факта к плану и факт — факт ( $t - 1$ );
- % факта к плану и % плана к прошлому году;

**Таблица 3. Корреляция показателей погрузки**

	% факта к плану	Факт — план	% факта к прошлому году	Факт — факт ( $t - 1$ )	% плана к прошлому году	План — факт ( $t - 1$ )
% факта к плану	1					
Факт — план	0,49*	1				
% факта к прошлому году	0,34	0,18	1			
Факт — факт ( $t - 1$ )	0,24	0,07	0,93*	1		
% плана к прошлому году	-0,40	-0,20	0,73*	0,73*	1	
План — факт ( $t - 1$ )	-0,14	-0,62*	0,61*	0,74*	0,71*	1

– % факта к плану и план — факт ( $t - 1$ ).

Каждая из комбинаций включает лишь два показателя, так как иначе возникает проблема мультиколлинеарности.

Подход совершенствования предполагает учет временной составляющей в оценке эффективности, поэтому рассмотрим показатель фактической погрузки во времени. Так, график фактического значения погрузки по филиалам за период с 2018 по 2021 год демонстрирует наличие связи с прошлыми значениями показателя (см. рис. 5).

А функция частной автокорреляции показывает, что за период с 01/2018 по 07/2021 связь с прошлыми значениями наблюдается с лагами 6, 12 и 13 (см. рис. 6). Наиболее сильная связь отмечается с лагом 12, причем положительная. Следовательно, фактические значения погрузки наиболее сильно коррелируют со значениями погрузки аналогичных периодов прошлого года, что должно учитываться при построении рейтинга.

Таким образом, для оценки показателя «погрузка» предлагается использовать интегральный показатель, включающий следующие частные показатели: % выполнения плана (далее % факта к плану) и % погрузки к прошлому году (далее % факта к прошлому году), а агрегировать данные показатели в интегральный с помощью метода суммы средневзвешенных арифметических показателей по формуле 3. Веса показателей будем считать равными — по 0,5 каждый.

В табл. 4, 5 представлены результаты расчета интегрального показателя и распределение филиалов на группы в зависимости от выполнения плановых заданий и динамики

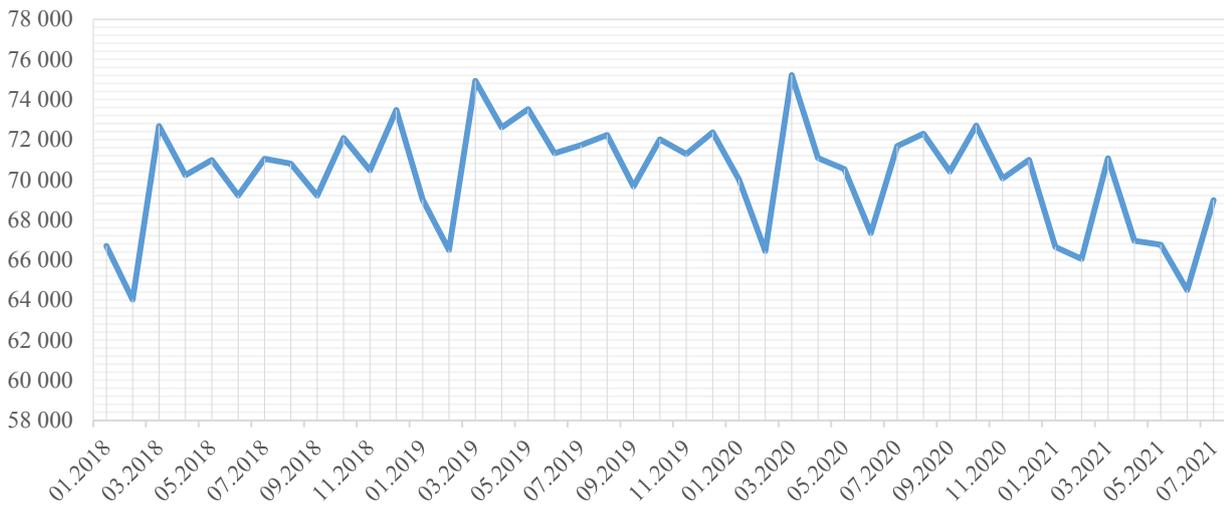


Рис. 5. Динамика фактических значений погрузки в целом по всем филиалам с 01/2018 по 07/2021

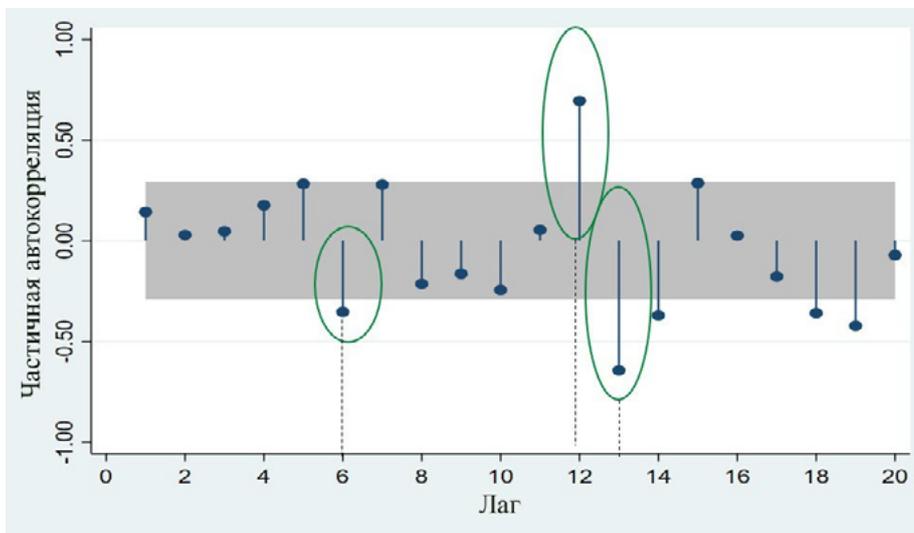


Рис. 6. График частной автокорреляционной функции — PACF

к прошлому году в соответствии с применяемыми методиками расчета рейтинговых баллов по отдельным показателям.

В табл. 4 рейтинговые баллы по показателям % факта к плану и % факта к прошлому году рассчитывались по текущей методике нормирования. В данном случае штрафование подлежат пять филиалов: № 13, 14, 3, 7 и 6.

В табл. 5 рейтинговые баллы по показателям % факта к плану и % факта к прошлому году уже рассчитывались по методике нормирования с корректировкой пограничных значений. Так, пограничное значение выполнения плана — % факта к плану — корректируется на величину, равную 0,24 %, и равно 99,76 %.

Также было рассчитано минимальное отклонение для прироста фактического значения погрузки по сравнению с аналогичным периодом прошлого года. Так, пограничное значение % факта к прошлому году корректируется на 0,68 % и равно 99,32 %.

Согласно данной методике, штрафные баллы будут присвоены четырем филиалам: № 14, 3, 7 и 6.

Применение в расчете интегрального показателя пограничных значений по частным показателям привело к более корректной оценке. Также в табл. 6 представлено распределение интегральных баллов, агрегирующих частные по методике нормирования с учетом

**Таблица 4. Расчет интегрального рейтинга филиалов по показателю «погрузка», агрегирующего баллы по показателям: % факта к плану и % факта к прошлому году, рассчитанные по действующей методике нормирования**

% факта к плану				% факта к прошлому году				Рейтинг	
Филиал	Ф/П	Нормированный показатель	балл	Филиал	Ф/Ф(t-1)	Нормированный показатель	балл	Филиал	Интегральный показатель
№ 2	1,163	1,00	12,0	№ 8	1,100	1,00	10,0	№ 2	8,17
№ 16	1,089	0,55	6,6	№ 16	1,089	0,89	8,9	№ 16	7,71
№ 4	1,071	0,44	5,2	№ 1	1,062	0,63	6,3	№ 8	5,11
№ 12	1,042	0,26	3,1	№ 2	1,043	0,43	4,3	№ 1	2,77
№ 9	1,037	0,23	2,7	№ 10	1,019	0,19	1,9	№ 9	2,15
№ 10	1,018	0,11	1,3	№ 9	1,016	0,16	1,6	№ 10	1,61
№ 14	1,011	0,07	0,8	№ 5	1,007	0,07	0,7	№ 4	1,54
№ 15	1,01	0,06	0,7	№ 11	1,004	0,04	0,4	№ 12	1,34
№ 3	1,004	0,02	0,3	№ 13	1,000	0,00	0,0	№ 15	0,38
№ 11	1,004	0,02	0,3	№ 15	1,000	0,00	0,0	№ 5	0,36
№ 8	1,003	0,02	0,2	№ 12	0,987	-0,07	-0,4	№ 11	0,34
№ 5	1,000	0,00	0,0	№ 7	0,967	-0,18	-1,1	№ 13	-0,03
№ 13	0,998	-0,03	-0,1	№ 14	0,956	-0,24	-1,5	№ 14	-0,33
№ 1	0,987	-0,18	-0,7	№ 3	0,951	-0,27	-1,6	№ 3	-0,66
№ 6	0,971	-0,39	-1,6	№ 4	0,935	-0,36	-2,1	№ 7	-2,55
№ 7	0,926	-1,00	-4,0	№ 6	0,818	-1,00	-6,0	№ 6	-3,78

**Таблица 5. Расчет интегрального рейтинга филиалов по показателю «погрузка», агрегирующего баллы по показателям: % факта к плану и % факта к прошлому году, рассчитанные по методике нормирования с установлением пограничного значения**

% факта к плану				% факта к прошл. году				Рейтинг	
Филиал	Ф/П	Нормированный показатель	балл	Филиал	Ф/Ф(t-1)	Нормированный показатель	балл	Филиал	Интегральный показатель
№ 2	1,163	1,00	13,0	№ 8	1,100	1,00	10,0	№ 2	8,85
№ 16	1,089	0,55	7,2	№ 16	1,089	0,89	8,9	№ 16	8,06
№ 4	1,071	0,44	5,8	№ 1	1,062	0,65	6,5	№ 8	5,21
№ 12	1,042	0,27	3,5	№ 2	1,043	0,47	4,7	№ 1	3,02
№ 9	1,037	0,24	3,1	№ 10	1,019	0,24	2,4	№ 9	2,60
№ 10	1,018	0,12	1,6	№ 9	1,016	0,21	2,1	№ 10	2,01
№ 14	1,011	0,08	1,1	№ 5	1,007	0,13	1,3	№ 4	1,89
№ 15	1,01	0,07	1,0	№ 11	1,004	0,10	1,0	№ 12	1,64
№ 3	1,004	0,04	0,5	№ 13	1,000	0,07	0,7	№ 15	0,82
№ 11	1,004	0,04	0,5	№ 15	1,000	0,07	0,7	№ 11	0,75
№ 8	1,003	0,03	0,4	№ 12	0,987	-0,03	-0,2	№ 5	0,75
№ 5	1,000	0,01	0,2	№ 7	0,967	-0,15	-0,9	№ 13	0,35
№ 13	0,998	0,00	0,0	№ 14	0,956	-0,21	-1,3	№ 14	-0,12
№ 1	0,987	-0,15	-0,4	№ 3	0,951	-0,24	-1,4	№ 3	-0,47
№ 6	0,971	-0,37	-1,1	№ 4	0,935	-0,33	-2,0	№ 7	-1,95
№ 7	0,926	-1,00	-3,0	№ 6	0,818	-1,00	-6,0	№ 6	-3,56

**Таблица 6. Распределение баллов в интегральном рейтинге согласно пограничным значениям в зависимости от весомости частных показателей**

Удельный вес в оценке показателя											
% выполнение плана	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
% погрузки к прошлому году	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
Интегральный балл											
Филиал № 1	6,5	5,8	5,1	4,4	3,7	3,0	2,3	1,6	0,9	0,2	-0,4
Филиал № 2	4,7	5,5	6,4	7,2	8,0	8,9	9,7	10,5	11,3	12,2	13,0
Филиал № 3	-1,4	-1,2	-1,0	-0,9	-0,7	-0,5	-0,3	-0,1	0,1	0,3	0,5
Филиал № 4	-2,0	-1,2	-0,4	0,3	1,1	1,9	2,7	3,4	4,2	5,0	5,8
Филиал № 5	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2
Филиал № 6	-6,0	-5,5	-5,0	-4,5	-4,0	-3,6	-3,1	-2,6	-2,1	-1,6	-1,1
Филиал № 7	-0,9	-1,1	-1,3	-1,5	-1,7	-2,0	-2,2	-2,4	-2,6	-2,8	-3,0
Филиал № 8	10,0	9,0	8,1	7,1	6,2	5,2	4,3	3,3	2,3	1,4	0,4
Филиал № 9	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1
Филиал № 10	2,4	2,3	2,3	2,2	2,1	2,0	1,9	1,8	1,8	1,7	1,6
Филиал № 11	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5
Филиал № 12	-0,2	0,2	0,5	0,9	1,3	1,6	2,0	2,4	2,8	3,1	3,5
Филиал № 13	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	0,0
Филиал № 14	-1,3	-1,1	-0,8	-0,6	-0,4	-0,1	0,1	0,4	0,6	0,8	1,1
Филиал № 15	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0
Филиал № 16	8,9	8,8	8,6	8,4	8,2	8,1	7,9	7,7	7,5	7,4	7,2

пограничных значений в зависимости от их значимости. Согласно данному распределению, филиалы № 7 и 6 вне зависимости от удельного веса показателей в рейтинге будут находиться в группе с присвоением штрафов.

Таким образом, использование интегрального рейтинга при оценке эффективности погрузки, а именно включение в него двух частных показателей — % выполнения плана и % погрузки к прошлому году, позволяет учесть не просто выполнение плана, но и его достижения по сравнению с аналогичным периодом прошлого года.

### Заключение

В данном исследовании были приведены возможные способы совершенствования системы мониторинга логистической сети по показателю погрузки за счет корректировки

рейтинговой оценки филиалов: 1) через установление пограничного значения по % выполнения плана и 2) оценку эффективности погрузки через интегральный показатель.

Для внедрения подхода совершенствования в оценку деятельности филиалов было предложено расширение перечня показателей, считааемых на данных по погрузке. На основании проанализированных критериев оценки эффективности, графиков функций автокорреляций были выделены следующие показатели для оценки показателя погрузки: учет выполнения плана — % выполнение плана и учет отношения показателя к прошлому году — % к прошлому году. Согласно рассчитанному через доверительный интервал отклонению фактических результатов от плановых, было представлено скорректированное критическое

значение выполнения плана погрузки: 99,76 % выполнение плана и 99,32 % для % к прошлому году. Был произведен расчет интегрального показателя по усовершенствованной методике оценки показателя погрузки и сравнение его с действующей методикой, а также представлено распределение баллов в интегральном рейтинге в зависимости от весомости частных показателей.

Таким образом, было показано, что оценивание деятельности филиалов логистической сети по показателю «погрузка» должно носить комплексный характер и не ограничиваться только измерением процента выполнения плана. Также необходимо отметить, что выполнение или невыполнение плана зависит в первую очередь от качества планирования, экономического состояния региона. То есть дальнейшее совершенствование методики оценки эффективности деятельности филиалов может заключаться в разграничении причин невыполнения плана на зависящие от операционной деятельности конкретного филиала и на зависящие от внешних факторов, которые не связаны с операционной деятельностью филиалов.

### Благодарности

Работы выполнены в рамках реализации проекта "Разработка методологии формирования инструментальной базы анализа и моделирования пространственного социально-экономического развития систем в условиях цифровизации с опорой на внутренние резервы" (FSEG-2023-0008) ▲

### Библиографический список

1. Sezer S. The impact of logistics industry on economic growth: An application in OECD countries / S. Sezer et al. // *Eurasian Journal of Social Sciences*. — 2017. — Vol. 5. — Iss. 1. — Pp. 11–23.
2. Носов А. Л. Логистика в системе экономической безопасности России / А. Л. Носов // *Инновационное развитие экономики*. — 2019. — № 5-2(53). — С. 228–232.
3. Абидов М. Х. Перспективы развития логистики в условиях цифровизации / М. Х. Абидов, Ф. Н. Исмаилова // УЭПС: управление, экономика, политика, социология. — 2021. — № 1. — С. 20–26.
4. Panayides P. M. The relative efficiency of shipping companies / P. M. Panayides, N. Lambertides, C. S. Savva // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. — 2011. — Vol. 47. — Iss. 5. — Pp. 681–694.
5. Рыженков А. В. Формирование рейтинговой оценки филиальной сети логистической компании на основе системы ключевых показателей эффективности / А. В. Рыженков, А. А. Хлуднев, В. В. Сотов // *Логистика и управление цепями поставок*. — 2018. — № 2. — С. 46–51.
6. Шурина Л. В. Совершенствование методов формирования рейтинговой оценки структурных подразделений железнодорожного транспорта / Л. В. Шурина, Е. Н. Евдокимова, С. С. Минеева и др. // *Экономические отношения*. — 2019. — Т. 9. — № 3. — С. 2117–2128. — DOI: 10.18334/eo.9.3.40907.
7. Беляева Т. В. Показатели экономической деятельности региональных филиалов транспортной компании / Т. В. Беляева, Ю. М. Буинцева // *Экономика железных дорог*. — 2021. — № 2. — С. 24–33.
8. Swindiaro V. T. P. Integration of fuzzy C-means clustering and TOPSIS (FCM-TOPSIS) with silhouette analysis for multi criteria parameter data / V. T. P. Swindiaro, R. Sarno, D. C. R. Novitasari // *2018 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication*. — IEEE, 2018. — С. 463–468.
9. Ключникова Е. В. Методические подходы к расчету интегрального показателя, методы ранжирования / Е. В. Ключникова, Е. М. Шитова // *ИнноЦентр*. — 2016. — № 1. — С. 4–18.
10. Pokrovskaya O. Methods of rating assessment for terminal and logistics complexes / O. Pokrovskaya, R. Fedorenko // *VIII International Scientific Siberian Transport Forum: TransSiberia 2019*. — Springer International Publishing, 2020. — Vol. 2. — Pp. 950–959.
11. Efimova O. V. Tools of Analysis in Performance Management in a Large Transport Company / O. V. Efimova, E. B. Baboshin, N. D. Avilova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — IOP Publishing, 2021. — Vol. 666. — Iss. 6. — P. 062102.
12. Курносова О. А. Модель выбора потенциальных аутсорсеров логистических услуг промышленных предприятий / О. А. Курносова // *Вести Автомобильно-дорожного института*. — 2020. — № 3(34). — С. 204–214.
13. Acur N. Assessment of strategy formulation: how to ensure quality in process and outcome / N. Acur, L. Englyst // *International journal of operations & production management*. — 2006. — Vol. 26. — Iss. 1. — Pp. 69–91.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 2, pp. 129–140  
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-129-140

### Methods for Improving the Monitoring System and Rating Evaluation of Branches of a Logistics Company

#### Information about authors

**Kudryavtseva T. Yu.**, Doctor in Economics, Associate Professor, Professor, Graduate School of Industrial Economics. E-mail: kudryavtseva\_tyu@spbstu.ru

**Skhvediani A. E.**, PhD in Economics, Associate Professor, Graduate School of Industrial Economics. E-mail: shvediani\_ae@spbstu.ru

**Arteeva V. S.**, Postgraduate Student, Assistant, Graduate School of Industrial Economics. E-mail: arteeva\_vs@spbstu.ru

**Plotnikov D. G.**, PhD in Engineering, Associate Professor, Higher School of Transport. E-mail: plotnikov\_dg@spbstu.ru

**Banite A. V.**, Postgraduate Student, Assistant, Higher School of Transport. E-mail: banite\_av@spbstu.ru

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg

**Abstract:** The rapid development of e-commerce and, consequently, the increasing demands and expectations of customers require transport and logistics companies to apply improved methods of managing their activities. The article discusses methods to improve the monitoring system and rating evaluation of the logistics company's branches on the actual tonnage of loading during the reporting period. The authors propose to establish a boundary value for % of plan fulfillment when calculating rating scores on the basis of statistical methods — the calculation of the confidence interval based on historical data, which will allow to take into account statistically justified deviation of actual results from the planned ones. In addition, the authors propose to evaluate the loading indicator as an integral — to use several indicators for assessing the effectiveness of loading that most accurately and fully reflect the performance of branches. This will allow to take into account not just the implementation of the plan by the branch, but also its achievements in comparison with the same period last year. The conclusion is made about the need to distinguish the reasons for the failure to implement the plan depending on the operating activities of branches and those depending on external factors, which are not related to the operating activities of branches.

**Keywords:** logistics company; monitoring system; rating evaluation; performance assessment; rating; method of rating evaluation.

#### References

1. Sezer S. et al. The impact of logistics industry on economic growth: An application in OECD countries. *Eurasian Journal of Social Sciences*. 2017, vol. 5, Iss. 1, pp. 11–23.
2. Nosov A. L. *Logistika v sisteme ekonomicheskoy bezopasnosti Rossii* [Logistics in the system of economic security of Russia]. *Innovatsionnoye razvitiye ekonomiki*

[Innovative development of the economy]. 2019, Iss. 1.5-2(53), pp. 228–232. (In Russian)

3. Abidov M. Kh., Ismailova F. N. Perspektivy razvitiya logistiki v usloviyakh tsifrovizatsii [Prospects for the development of logistics in the context of digitalization]. *UEPS: upravleniye, ekonomika, politika, sotsiologiya* [EPS: management, economics, politics, sociology]. 2021, Iss. 1, pp. 20–26. (In Russian)
4. Panayides P. M., Lambertides N., Savva C. S. The relative efficiency of shipping companies. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2011, vol. 47, Iss. 5, pp. 681–694.
5. Ryzhenkov A. V., Khludnev A. A., Sotov V. V. Formirovaniye reytingovoy otsenki filial'noy seti logisticheskoy kompanii na osnove sistemy klyuchevykh pokazateley effektivnosti [Formation of a rating assessment of the branch network of a logistics company based on a system of key performance indicators]. *Logistika i upravleniye tsepyami postavok* [Logistics and supply chain management]. 2018, Iss. 2, pp. 46–51. (In Russian)
6. Shkurina L. V. et al. Sovershenstvovaniye metodov formirovaniya reytingovoy otsenki strukturnykh podrazdeleniy zheleznodorozhnogo transporta [Improving the methods of forming a rating assessment of the structural divisions of railway transport]. *Ekonomicheskiye otnosheniya* [Economic relations]. 2019, vol. 9, Iss. 3, pp. 2117–2128. DOI: 10.18334/eo.9.3.40907. (In Russian)
7. Belyayeva T. V., Buintseva Yu. M. Pokazateli ekonomicheskoy deyatel'nosti regional'nykh filialov transportnoy kompanii [Indicators of economic activity of regional branches of the transport company]. *Ekonomika zheleznnykh dorog* [Economics of Railways]. 2021, Iss. 2, pp. 24–33. (In Russian)
8. Swindiaro V. T. P., Sarno R., Novitasari D. C. R. Integration of fuzzy C-means clustering and TOPSIS (FCM-TOPSIS) with silhouette analysis for multi criteria parameter data. *International Seminar on Application for Technology of Information and Communication, IEEE*. 2018, pp. 463–468.
9. Klyushnikova Ye. V., Shitova Ye. M. Metodicheskiye podkhody k raschetu integral'nogo pokazatelya, metody ranzhirovaniya [Methodological approaches to the calculation of the integral indicator, ranking methods]. *InnoSentr* [InnoCentre]. 2016, Iss. 1, pp. 4–18. (In Russian)
10. Pokrovskaya O., Fedorenko R. Methods of rating assessment for terminal and logistics complexes. VIII International Scientific Siberian Transport Forum: TransSiberia 2019. Springer International Publishing. 2020, vol. 2, pp. 950–959.
11. Efimova O. V., Baboshin E. B., Avilova N. D. Tools of Analysis in Performance Management in a Large Transport Company. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing*. 2021, vol. 666, Iss. 6, 5 p.
12. Kurnosova, O. A. Model' vybora potentsial'nykh autorsorserov logisticheskikh uslug promyshlennykh predpriyatiy [Model for the selection of potential outsourcers of logistics services for industrial enterprises]. *Vesti Avtomobil'no-dorozhnogo instituta* [Vesti of the Automobile and Road Institute]. 2020, Iss. 3(34), pp. 204–214. (In Russian)
13. Acur N., Englyst L. Assessment of strategy formulation: how to ensure quality in process and outcome. *International journal of operations & production management*. 2006, vol. 26, I. 1, pp. 69–91.

# СИСТЕМА СЛЕЖЕНИЯ ЗА АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ НА БАЗЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ И КАМЕР ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

**СУХАРЕВ Никита Владиславович**, аспирант<sup>1</sup>, ведущий инженер, технический руководитель проектов<sup>2</sup>;  
e-mail: n.suhareff@gmail.com

<sup>1</sup>Российский университет транспорта (МИИТ), кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте», Москва

<sup>2</sup>АО «НПП «Мера», Москва

В статье рассматриваются основные принципы работы и преимущества использования беспилотных летательных аппаратов в качестве дополнительного средства контроля за движением автомобильного транспорта, средства анализа и прогнозирования автомобильных пробок в реальном времени, а также в роли системы мониторинга и оценки состояния дорожного полотна и инфраструктуры автомобильных дорог. Особое внимание уделено в части применения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов в качестве активного комплекса обеспечения транспортной безопасности. Рассматриваются возможности трехканальной системы слежения (видимого, инфракрасного и радиотехнического диапазонов) для определения координат, характеристик, скоростей и действующей регистрации транспортного средства, а также описываются преимущества предлагаемого метода в виде повышения точности и скорости обработки информации, возможности снижения затрат на транспортный контроль, в частности описаны методы использования меток радиочастотной идентификации для повышения эффективности управления транспортными потоками, предотвращения простоев, оптимизации маршрутов, снижения рисков возникновения опасных дорожных ситуаций. Представлено перспективное применение камер инфракрасного диапазона в части детектирования и предотвращения аварий, анализа плотности потока и поведения водителей. Проведено исследование по возможности параллельного использования вышеописанных методов в совокупности с беспилотным летательным аппаратом с целью предложения разработки полной автоматизированной системы мониторинга и контроля за автомобильным транспортом. Приведена актуальность использования малогабаритного летательного аппарата для повышения качества контроля за движением автомобильного транспорта и безопасности движения на дорогах.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат; методы распознавания транспорта; радиочастотная идентификация объектов; навигационные параметры; макет измерительного комплекса; маршрут облета; распознавание объектов; безопасная дорога.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-141-152

## ▼ Введение

В связи с ростом нагрузки на автомобильные дороги пропорционально возрастает количество сценариев, не поддающихся контролю со стороны соответствующих инспекций. Причиной этому служит отсутствие средств контроля на участках малонагруженных дорог, традиционные методы контроля транспортных средств на основе камер видимого диапазона, а также особенности существующих средств мониторинга, в том числе их статичность.

Системы мониторинга и управления автомобильным транспортом находятся в центре внимания в современных технологических разработках. Можно наблюдать неоднократные попытки внедрения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для контроля за автомобилями на трассах согласно статистике. Например, ГИБДД Краснодарского края в числе первых отчиталась об эффективности применения БПЛА в качестве фиксации фактического нарушения правил дорожного

движения (ПДД) водителем, однако еще в 14 регионах Российской Федерации применяется возможность видеофиксации нарушений ПДД с помощью полезной нагрузки дрона. Большая часть потенциала БПЛА не раскрыта в связи с тем, что основной функцией БПЛА является лишь видеофиксация нарушений, при этом остается открытым вопрос распознавания иностранных регистрационных знаков и контроля за действующей регистрацией на внутренних регистрационных знаках.

Подходы к решению задачи слежения за транспортным средством (в том числе распознавания знаков) могут быть совершенно разными и варьироваться в зависимости от поставленной задачи.

В данной статье рассматривается система мониторинга автомобильного транспорта на базе БПЛА с использованием библиотек алгоритмов машинного зрения, технологии радиочастотной идентификации и камер инфракрасного диапазона (далее — ИК-камера). Благодаря этим технологиям система обеспечивает высокую точность и скорость обработки информации, а также возможность быстрого реагирования на изменения в транспортном потоке.

## 1. Базовые средства мониторинга автомобильного транспорта

Базовыми средствами для мониторинга служат камеры видимого диапазона. Основным применением на данный момент является видеофиксация фактических нарушений ПДД, при этом иногда открывается возможность распознавания государственных регистрационных знаков. Съемка при этом производится на высотах до 50 м над уровнем дорожного полотна, обеспечивая, согласно отчетным материалам сотрудников, минимально допустимое качество для распознавания регистрационного знака. Среди огромного перечня недостатков данного метода можно выделить несколько основных проблем:

- недостаточная освещенность местности;
- плотный трафик;
- загрязнение (умышленное) регистрационных знаков;
- высокая скорость движения транспортных средств;
- откидные рамки монтажа регистрационного номера транспортных средств;
- отсутствие точной привязки данных к координатной сетке транспортного средства и синхронизация с

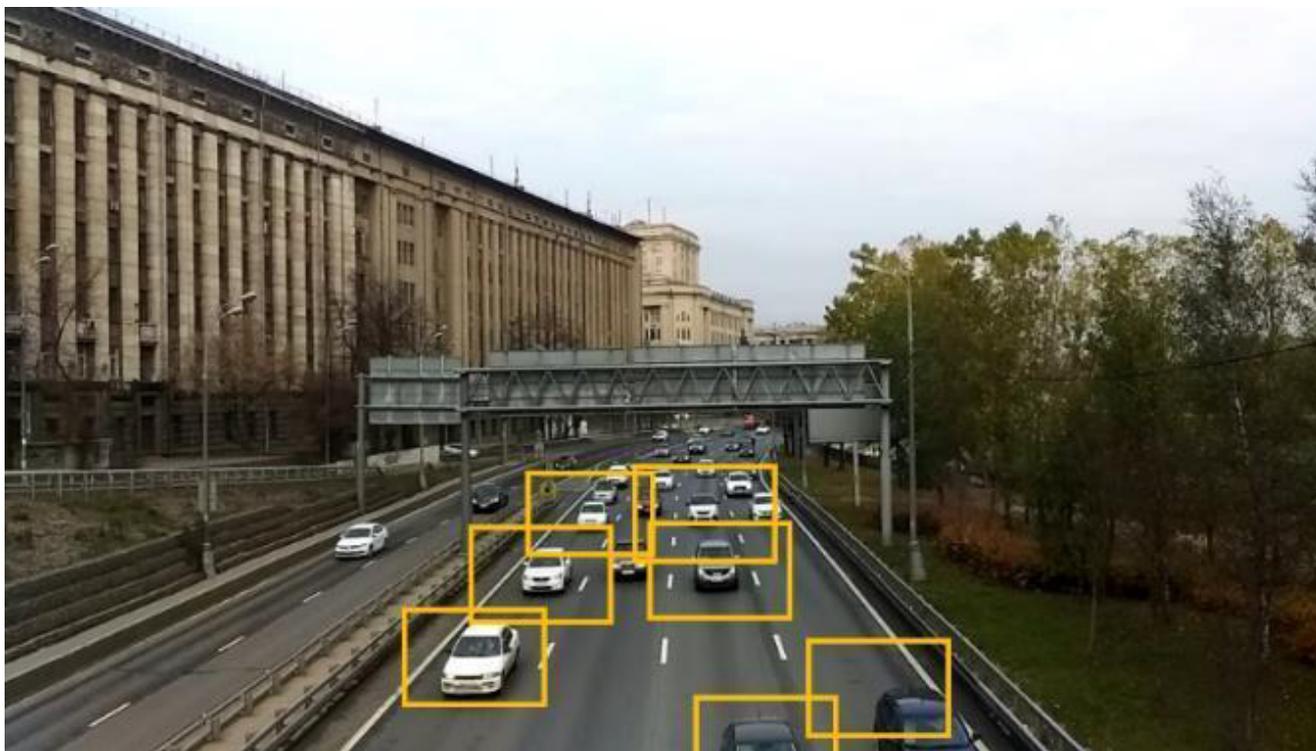


Рис. 1. Результат работы алгоритма детектирования автомобилей

позиционированием средства фиксации (ложное срабатывание);

- распознавание знаков иностранных государств;
- проверка регистрации транспортных средств по государственному знаку и его соответствия принадлежности объекту слежения.

Характер проблем требует параллельной работы нескольких каналов слежения. На рис. 1 можно заметить довольно плотный поток машин, что при детектировании одного объекта из потока порождает ошибку типа «наложения» нескольких объектов в одну рамку, что не является критичным при выполнении работ по регулировке трафика, однако является грубой ошибкой при поиске конкретного автомобиля с определенными характеристиками.

Результат, представленный на рисунке, был получен в ходе применения телевизионной камеры, установленной на штатив, а также базовых алгоритмов детектирования объектов на основе машинного зрения OpenCV<sup>1</sup>, разработанных на языке Python [1]. Как можно заметить, отрисовка квадратов на динамических объектах происходит с опозданием или же с наложением на несколько транспортных средств. Причиной этому служит математическая особенность при работе алгоритма, заключающаяся в применении алгоритма Хафа, который рассмотрен в рамках работы в качестве базового инструмента машинного зрения для распознавания объектов.

Используемый классический алгоритм Хафа представляет собой последовательность операций, направленную на выделение границ объекта, при этом происходит трансформация исходного изображения в несколько этапов [1]. При трансформации изображения происходит потеря качества, при этом процесс преобразования слишком долгий и не является пригодным для использования в реальном времени [2].

Преобразование Хафа заключается в следующих шагах:

<sup>1</sup> OpenCV — библиотеки алгоритмов компьютерного зрения, предназначенные для обработки изображений, их классификации и анализа.



Рис. 2. Работа преобразования Хафа для детектирования границ динамических объектов

- преобразование изображения из цветного в серые оттенки;
- сравнение соседних кадров;
- использование фильтра для избавления от точек шума;
- проверка результата нейронной сетью для того, чтобы получить бинарное изображение объекта;
- обработка бинарного изображения.

Применение преобразования Хафа позволяет найти любые типы кривых на кадре и отнести их к определенному семейству [2–4]. Алгоритм преобразования Хафа использует аккумуляторный массив, размерность которого соответствует количеству неизвестных параметров в уравнении семейства искомых кривых. Результатом преобразования Хафа вышерассмотренного изображения с рис. 1 является следующая картина, представленная на рис. 2.

В качестве примера и демонстрации недостатка преобразования приведен результат преобразования Хафа для плотного потока автомобилей, представленный на рис. 3.

Исходя из проведенных исследований, можно заметить ярко выраженные недостатки метода, заключающиеся в наложении каждого отдельного объекта в общий поток. Таким образом, можно сделать вывод о непригодности использования преобразования Хафа в качестве обработки кадров в реальном времени.

Решением данной проблемы может служить комплекс, состоящий из ИК-камеры, LIDAR (Light Detection and Ranging — технология измерения расстояния по излучению (лазера) светового луча) и меток радиочастотной



Рис. 3. Локализация области скопления движущихся транспортных средств (78 км МКАД, р-н Белая Дача, ТРЦ «МЕГА»)

идентификации (RFID — Radio Frequency Identification) [2, 5]. Эти методы уже получили применение в части автомобильного транспорта, однако не в комплексе.

Применение RFID-меток позволяет устранить проблему, связанную с нечитаемостью государственных знаков транспортных средств, и позволяет считывать информацию о действительности учета транспортных средств, принадлежности государственного регистрационного знака данному транспортному средству, а в совокупности с ИК-камерой обеспечивает контроль за соблюдением ПДД транспортными средствами.

Предлагается рассмотреть возможность использования приведенных методов с использованием БПЛА.

## 2. Использование БПЛА

Для реализации системы мониторинга были выработаны особые критерии. Во-первых, система должна состоять не из единичного

БПЛА, а нескольких. Это позволит получить большее перекрытие области покрытия и мониторинга, что особенно важно при проведении работ за проверкой маршрута транзита и его состояния. Во-вторых, необходимо оптимизировать маршрут каждого БПЛА в зависимости от характера задачи, а также выбрать безопасные точки аварийной посадки. И наконец, оптимизировать работу ИК-камеры и метки в совокупности с системой БПЛА.

При этом первую часть задачи необходимо конкретизировать. Предлагается рассмотреть задачу мониторинга за транзитным транспортом в местах съезда и потенциального отклонения от маршрута. В таком случае необходимо иметь несколько БПЛА, зоны мониторинга которых пересекаются, при этом алгоритм работы системы в данном случае представлен следующим образом.

**Алгоритм 1.** Алгоритм работы системы мониторинга за транзитным транспортом:

1. Определение зоны мониторинга для каждого БПЛА на основе радиуса действия и координат точек мониторинга.
2. Определение соседних зон мониторинга для каждого БПЛА на основе пересечения зон мониторинга.
3. Создание графа связей между БПЛА на основе соседних пересекающихся зон мониторинга и расстояния между БПЛА.
4. Применение алгоритма Дейкстры или  $A^*$  для поиска кратчайшего пути между БПЛА в графе связей с учетом маршрута транзита.
5. Определение оптимального маршрута для каждого БПЛА с учетом кратчайшего пути до соседних БПЛА.
6. Объединение оптимальных маршрутов для каждого БПЛА в общий маршрут для всех БПЛА.
7. Построение оптимальной траектории маршрута для каждого БПЛА на основе общего маршрута и его собственного оптимального маршрута.
8. Определение времени и места старта каждого БПЛА для выполнения оптимальной траектории маршрута.

В качестве альтернативы использования алгоритма Дейкстры или  $A^*$ , предлагается модификация алгоритма с использованием

теории муравьиной колонии [4–6]. Тогда необходимо учитывать расположение RFID-меток на протяжении маршрута. После определения количества «популяции муравьев» (количества объектов мониторинга и их маршрутов) необходимо рассчитать эвристическую функцию (1) для каждого транзита на основе количества RFID-меток, расположенных на протяжении участка пути транзита, а выглядеть эта зависимость должна следующим образом:

$$F(t) = \sum_{k=1}^n R_k \cdot V_n(t), \quad (1)$$

где  $F(t)$  — сама эвристическая функция;

$n$  — порядковое число каждой метки (в том числе установленной на самом транспортном средстве);

$R_k$  — количество меток на всем маршруте;

$V_n(t)$  — скорость транзита на определенном участке пути.

Таким образом, каждый транзит приобретает уникальный порядковый номер, соответствующий RFID-метке, при этом есть возможность отслеживания его скорости и маршрута на определенном участке пути, а там, где появляется риск схода с траектории, ожидаемо подключается система на базе БПЛА. Однако следующим важным этапом является выбор опорных точек, где значение эвристической функции в отношении к каждому БПЛА достигается максимальное. Таким образом появляется возможность определения особо нагруженных зон, требующих критического контроля. Далее необходимо обновить используемый граф маршрута между точками мониторинга для каждого объекта мониторинга. Такую операцию необходимо проводить до момента определения оптимального маршрута с наибольшим перекрытием зоны мониторинга относительно длины участка пути транзита, с последующим определением необходимого количества контролеров, то есть БПЛА, для формирования их оптимального маршрута. Существенным недостатком системы можно выделить зависимость от сравнительно низкого объема аккумуляторов и невозможности сопровождения транзита на всем участке пути, однако, как было упомянуто ранее, в рамках исследования учитывается

размещение RFID-меток, в том числе расположенных и на объектах инфраструктуры дорожного транспорта. Так как на каждом транзите используется собственная RFID-метка, предлагается использование в совокупности с самой меткой и считывателя. При условии расположения меток на объектах инфраструктуры автомобильного транспорта (мосты, опоры знаков, рамки светофоров и т. д.), в совокупности с камерами безопасности движения, становится возможным статистически определить места потенциального отклонения от маршрута, тем самым определить и базовые точки для БПЛА. В случае, когда транзит не считывает предполагаемую метку, подразумевается выдача сигнала на располагающуюся впереди базовую станцию для БПЛА, после чего БПЛА с установленным на нем считывателем RFID-метки получает информацию о маршруте транзита с учетом расположения всех RFID-меток, перемещается для контроля проезда навстречу транзиту для контроля его смещения с траектории, передавая сигнал для всех других базовых станций в зоне мониторинга [7–9]. По выдаче сигнала с общего сервера на соседние базовые станции БПЛА выполняется аналогичная операция для каждого БПЛА. Представляется возможным за счет этой процедуры расширить зону поиска сошедшего с пути транзита. В случае отключения водителем системы мониторинга каким-либо способом, на борту БПЛА имеется ИК-камера, позволяющая идентифицировать государственный номер транспортного средства с дальнейшим распознаванием транзита в базе данных таможенного контроля и принятием мер для пресечения противоправных действий. Для более детального описания работы ИК-камеры в комплексе предлагается рассмотреть следующий алгоритм работы системы.

**Алгоритм 2.** Алгоритм параллельного использования ИК-камеры:

1. Установить ИК-камеры и считыватели RFID-меток на БПЛА.
2. Разместить RFID-метки на транспортных средствах, которые будут проезжать по контролируемой территории.
3. Определить зоны контроля, где будут находиться БПЛА с ИК-камерами и считывателями RFID-меток.

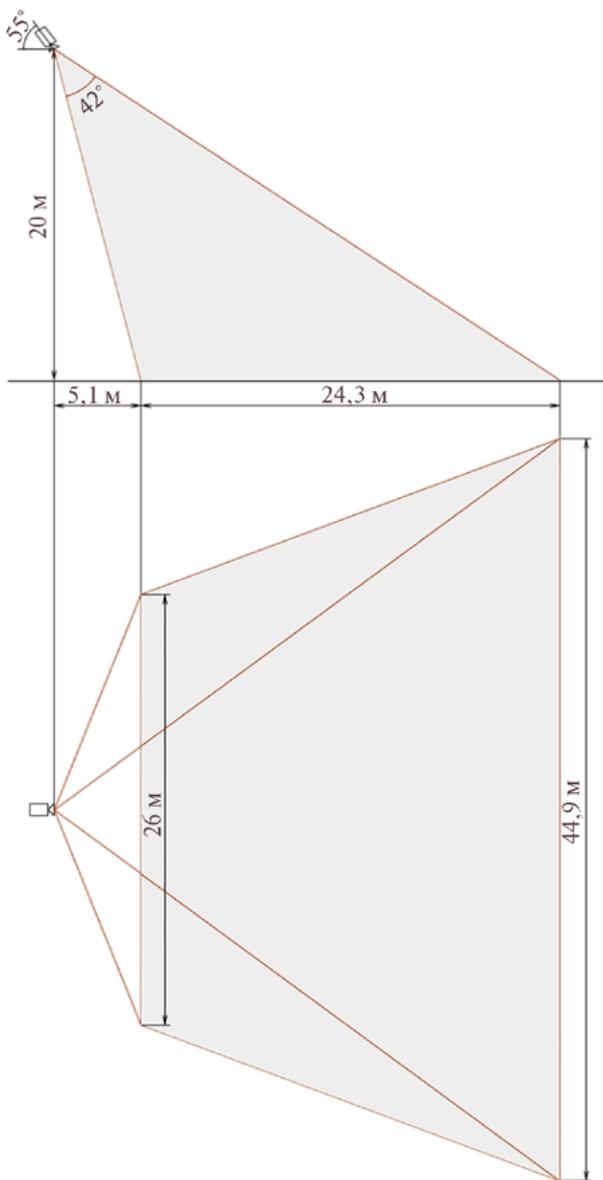


Рис. 4. Оптимальное размещение БПЛА для детектирования объекта

4. Анализировать данные, полученные с ИК-камер и считывателей, и определять возможные нарушения ПДД и состояние регистрации транспортного средства.
5. Запуск БПЛА на контролируемой территории по возникновению ситуации несчитывания транзитом дорожной метки на маршруте.
6. ИК-камера на БПЛА может фиксировать скорость, движение, наличие номерных знаков и другие параметры транспортных средств в том случае, если считыватель на борту БПЛА не может получить информацию с транзита.

7. В случае нарушения ПДД, отсутствия информации о состоянии регистрации транспортного средства или отклонения от маршрута, БПЛА может отправить сигнал на удаленный сервер, чтобы оператор мог принять меры.

Реализация метода слежения не только за транзитом, но и за нарушением ПДД заключается в применении ИК-камер в качестве средства фиксации факта пересечения транспортным средством в темное время суток на слабоосвещенных участках пути сплошных линий разметки. Согласно схеме, представленной на рис. 4, на высоте полета 20 м, установки камеры в горизонтальном положении на угол 55°, обеспечивается распознавание объекта на расстоянии около 25 м, а длина участка слепой зоны при угле обзора ИК-камеры 40° составляет 5 м.

На данном этапе следует комплексно рассмотреть решение задачи по определению легитимности вывода о нарушении разметки, т. е. определить потенциальную ошибку при рассмотрении ситуации ложного пересечения автомобиля дорожной разметки. Для этой задачи предлагается использовать алгоритмы машинного зрения, не использующие алгоритм Хафа, а основанные на методе распознавания границ Канни [10]. В процессе алгоритма распознавания границ методом Канни, после трансформации кадров в реальном времени за счет особенностей ИК-камеры отсутствует необходимость перевода изображения из цветного в черно-белое, при этом определение границы разметки становится более четким благодаря тепловому излучению материала разметки, после чего приводится количественный подсчет всех граничных пикселей, в которых обнаруживается несоответствие между полем границ разметки и корпуса автомобиля (2):

$$Dif = \sum_{i=1, j=1}^{X, Y} (\{1, B(i, j) \neq A(i, j), 0, B(i, j) = A(i, j)\}), \quad (2)$$

где  $i, j$  — начальные значения;

$X$  и  $Y$  — высота и ширина поля границ картины в пикселях (соответствуют высоте и ширине входной видеоинформации);

$A$  и  $B$  — двумерные массивы, описывающие поля распознанных границ объектов сравнения. Таким образом производится расчет количества пикселей границ объектов разметки и автомобиля по схеме, представленной на рис. 5.

Применение и реализация математического аппарата, разработанного вьетнамскими исследователями и представленного в виде 3SSIM (Three-component Structural Similarity Method) подхода, позволит повысить точность определения, при этом реализовать мониторинг при слабой освещенности, неоднократно доказанная в ходе летных испытаний авиационной техники на примере тестовых объектов для ИК-оборудования [11]. При нормальных условиях дорожное полотно нагревается, представляя собой поглощающий материал, при этом прорезиненная разметка белого цвета выступает в роли отражателя, на фоне чего создается тепловой контраст при обработке изображения.

При приведенных выше параметрах размещения камеры БПЛА, как уже было описано ранее, становится возможным одновременное применение RFID-метки для считывания информации об объекте.

В качестве примера в рамках работы рассматриваются UHF-метки с дальностью действия до 30 м, работающие на частоте от 860–950 МГц [8, 12]. Особенностью применения RFID-меток для считывания информации об объекте, помимо расположения в кабине транзита,

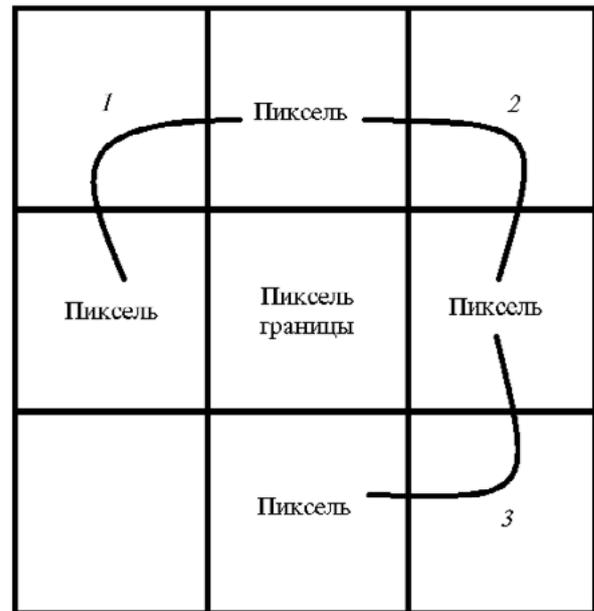


Рис. 5. Порядок расчета пикселей границ

появляется возможность размещения и на государственном регистрационном знаке для гражданских автомобилей, при этом обеспечивается фиксация информации об объекте на основе заранее заданной в базе данных. Согласно рис. 5 становится возможным распознавание объекта на дистанции от 30 м, далее происходит инициализация камеры на БПЛА.

При рассмотрении задач мониторинга статичных объектов инфраструктуры дорог предлагается следующий метод, основанный на постобработке полученной информации. При

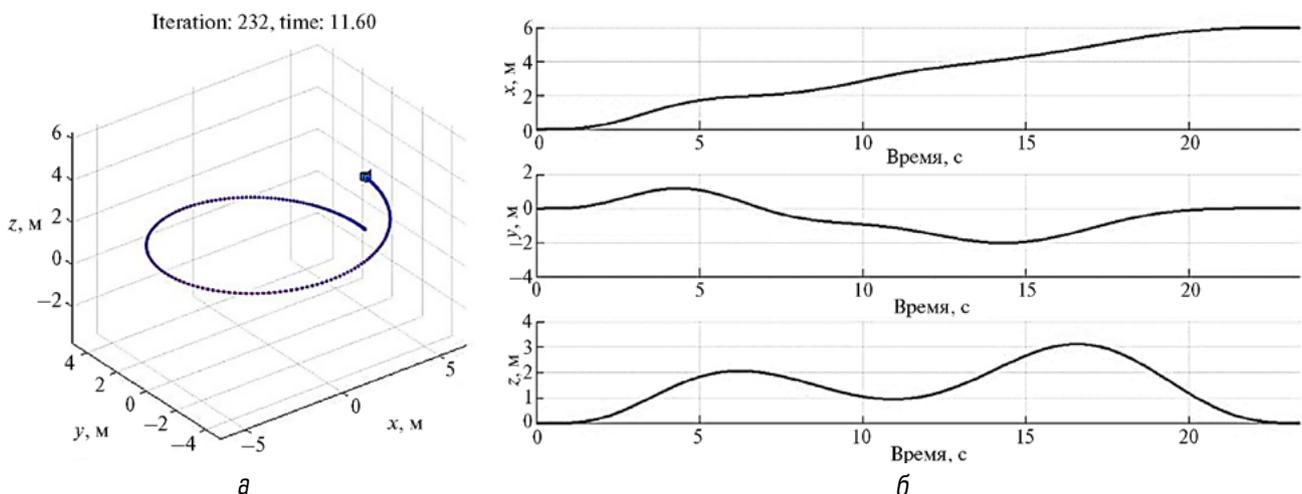


Рис. 6. Траектория полета БПЛА по спирали:  
 а — идеальная траектория движения БПЛА по спирали;  
 б — зависимость координат от времени в трехмерном пространстве через шесть точек

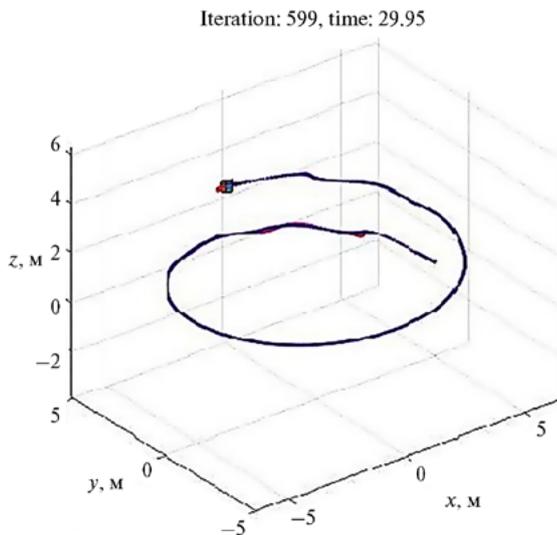


Рис. 7. Реальная траектория полета БПЛА по спирали

выборе оптимальной траектории полета в рамках этой задачи и вышеописанной также следует рассматривать и перечень параметров, основанный исходя их опыта летных испытаний БПЛА в процессе оценки характеристик камер.

В перечне параметров учитываются ветер, влажность, туман и т. д. Все эти параметры влияют на траекторию полета БПЛА, не говоря уже о недопустимости приближения к строениям инфраструктуры [13–17]. На рис. 6 приведен пример траектории полета БПЛА по спирали, взятый на основе информации с летных испытаний на полигоне летно-исследовательского института в городе Жуковском.

Но реальная траектория отличается от приведенной выше и выглядит следующим образом (рис. 7).

Для корректной работы системы необходимо задать таблицу азимутов, для построения которой необходимы следующие действия (они получены в процессе испытаний).

**Алгоритм 3.** Задание маршрута БПЛА для слежения за статичным объектом:

1. Для приоритетной цели задать уникальную кодировку. В рамках созданной модели по умолчанию была присвоена кодировка object3409.
2. Выделить особые свойства данного объекта для системы (указать объект из базы, например /car).

3. Строго ориентировать шаблон на север, что нужно для задания направления для дальнейших пролетов.
4. После выбора нескольких объектов слежения составляется их список, согласно которому БПЛА рассчитывает расстояния между ними в пикселях.

Таблица азимутов отражает описание маршрута в объектах. Это необходимо для того, чтобы сформировать конкретную задачу для БПЛА, так как абстрактные задачи типа «слежение за водоемом» влекут за собой увеличение энергопотребления и, следовательно, сокращение автономности, в связи с использованием большего ресурса платы и отсутствием конкретного маршрута.

В случае возникновения ситуации потери данных о местоположении БПЛА запускает алгоритм экстренного поиска.

**Алгоритм 4.** Алгоритм экстренного поиска маршрута для БПЛА:

1. Загружает последний объект маршрута.
2. Возвращается в точку последнего местоположения объекта маршрута.
3. Выполняет пересчет расстояния, исключая потерянный объект, до следующей точки.
4. Запускает программу оптимизации движения.

В качестве алгоритма оптимизации приводится выявление времени пролета от одного объекта маршрута к другому. После первого пролета БПЛА по маршруту устанавливаются временные интервалы перемещения между объектами и расстояние в пикселях, соответственно, в случае отсутствия объекта для ориентира для БПЛА не будет сложным вернуться назад по маршруту и пересчитать время пролета и оптимизировать новый пролет.

**Описания движения БПЛА от объекта к объекту при заданных начальных условиях действия ветра с постоянной средней скоростью и разных направлениях действия**

БПЛА перемещается с определенной постоянной скоростью и подвержен в направлении  $\theta$  действию внешних возмущений (ветра) с постоянной средней скоростью. В случае переменного ветра предположим, что изменение угла направления ветра случайное:

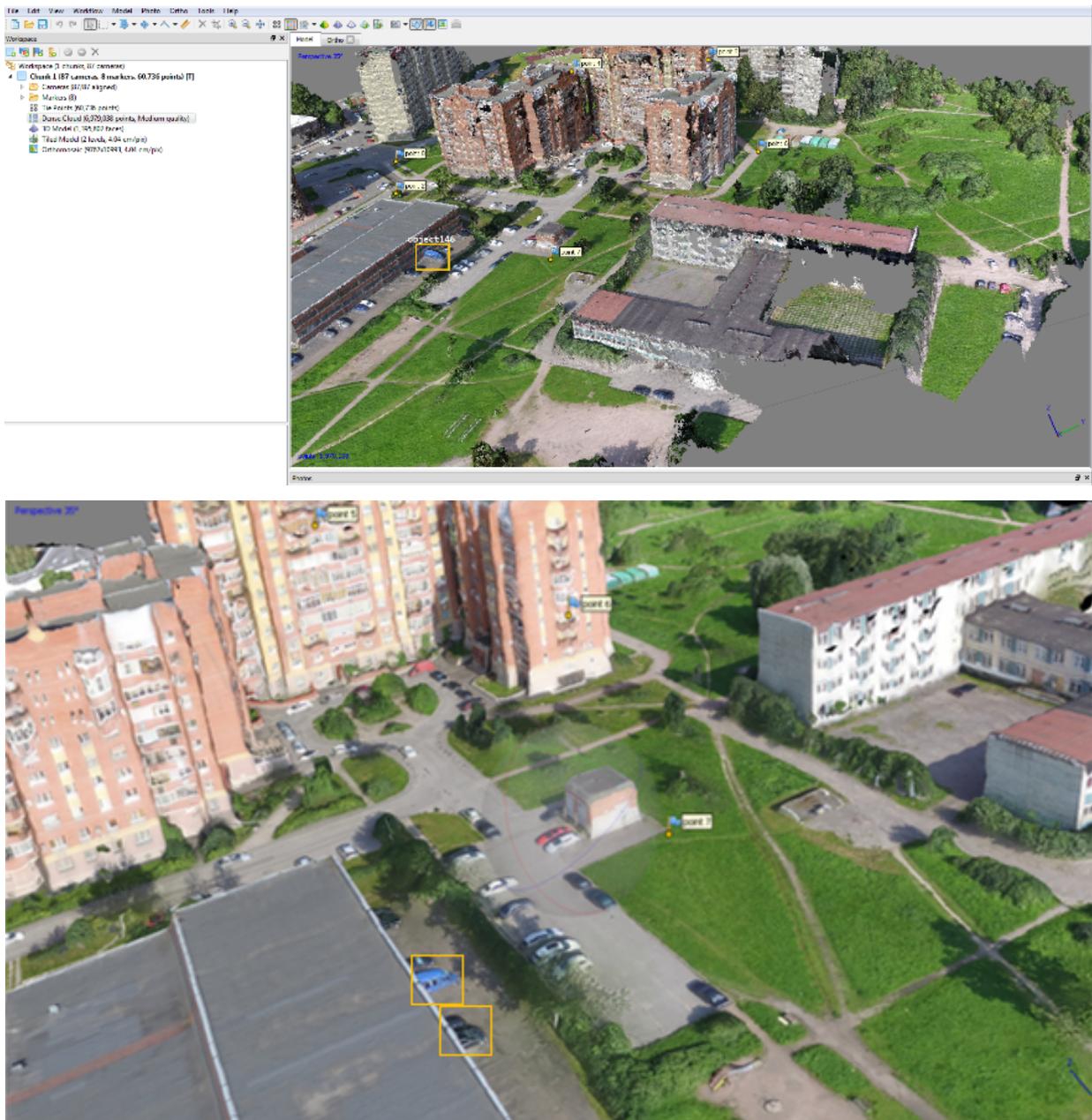


Рис. 8. Присвоение информационных RFID-меток с привязкой к 3D-модели местности

$$\theta_{t+1} = \theta_t + \omega_{t+1}, \quad (3)$$

где  $\{\omega_t\}$  — независимые, центрированные и одинаково распределенные случайные величины  $E$ :

$E\{\omega_t\} = 0$ ,  $E\{\omega_t^2\} = \sigma_\omega^2 < \infty$ ,  $E\{\omega_i, \omega_j\} = 0$ , при условии  $i \neq j$ .

Из чего следует, что при известных начальных условиях возможно сохранить курс движения, что означает перемещение начального

объекта маршрута в точку, где был утерян искомый, с последующим продолжением движения.

Дальнейшая процедура оценки состояния инфраструктуры состоит в построении 3D-модели местности и привязке информации с RFID-меток в качестве маркеров на модели местности (рис. 8) [18–20]. В качестве примера приведена 3D-модель жилого двора, на которой был выполнен поиск и распознавание объектов в виде автомобилей, на которых были установлены RFID-метки [18–23].

## Заключение

Результатом данной статьи является проработка концепции системы мониторинга на базе БПЛА с использованием ИК-камер, RFID-меток, необходимость которой вызвана ростом нагрузки на автомобильные дороги, в том числе количеством транзитов и участвовавших случаев нарушения их маршрутов, в связи с чем пропорционально возрастает количество сценариев, не поддающихся контролю со стороны соответствующих инспекций. Предлагается ликвидировать причины отсутствия соответствующих средств мобильного контроля на участках малонагруженных дорог и наиболее нагруженных транзитных маршрутов, модернизировать традиционные методы контроля транспортных средств на основе камер видимого диапазона, а также особенности существующих средств мониторинга, в том числе их статичность.

Предложены реальные функциональные применения малогабаритных летательных аппаратов под конкретные задачи с целью повышения эффективности актуальных систем мониторинга, расширения функционала, снижения вероятности возникновения опасных ситуаций. Так как большая часть потенциала БПЛА остается нераскрытой в настоящее время, а восприятием функционала БПЛА остается лишь видеофиксация нарушений, следует рассмотреть возможность разработки и применения предложенной концепции. Также предложены методы контроля таких сценариев, как распознавание иностранных регистрационных знаков и контроль действующей регистрации на внутренних регистрационных знаках. Разработаны альтернативные подходы к решению задачи слежения за транспортными средствами (в том числе распознавания знаков), которые могут быть совершенно разными и варьироваться в зависимости от поставленной задачи — от мониторинга за статичными объектами до динамической автоматизированной системы мониторинга.

В качестве направления дальнейшего развития концепции рекомендуется проработка математической части, разработка общего алгоритма поведения системы в целом, устранение недостатков в части использования

алгоритмов машинного зрения, включающие в себя поиск оптимального подхода к детектированию границ с целью уменьшения времени на обработку полученных кадров, повышения точности детектирования границ с целью уменьшения вероятности возникновения ложной фиксации нарушения. Требуется углубленная проработка методов построения оптимального маршрута по критерию максимального активного времени действия. ▲

## Библиографический список

1. Viola P. Robust real-time object detection / P. Viola, M. J. Jones // *International Journal of Computer Vision*. — 2004. — Vol. 57(2). — Pp. 137–154.
2. Lienhart R. An extended set of haar-like features for rapid object detection / R. Lienhart, J. Maydt // *In Image Processing*. — 2002. — Vol. 1. — Pp. 900–903.
3. Bovik A. C. Content-weighted video quality assessment using a three-component image model / A. C. Bovik, Ch. Li // *Journal of Electronic Imaging*. — 2010. — Vol. 19(1). — Pp. 011003-1–011003-9.
4. Сирота А. А. Двухэтапный алгоритм обнаружения и оценивания границ объектов на изображениях в условиях аддитивных помех и деформирующих искажений / А. А. Сирота, А. И. Соломатин, Е. В. Воронова // *Компьютерная оптика*. — 2009. — Т. 34. — № 1. — С. 109–117.
5. Parker J. R. *Algorithms for Image Processing and Computer Vision* / J. R. Parker. — New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997. — Pp. 23–29.
6. Bo R. On path planning for UAVs based on adaptive ant system algorithm / R. Bo, Yu Lei, H. Lixun // *Electronics Optics and Control*. — 2007. — Vol. 6. — Iss. 14. — Pp. 36–39.
7. Aguiar A. P. Trajectory-tracking and path-following of underactuated autonomous vehicles with parametric modeling uncertainty / A. P. Aguiar, J. P. Hespanha // *IEEE Transactions on Automatic Control*. — 2007. — Vol. 52. — Iss. 8. — Pp. 1362–1379.
8. Khoroshev V. Actual State Monitoring of Railway Switch Point Blades Based on RFID Technology / V. Khoroshev, G. Osadchy, D. Efanov et al. // *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29 — October 2, 2017. — Pp. 283–288. — doi: 10.1109/EWDTS.2017.8110084.
9. Тань Л. Планирование маршрута полета малогабаритных летательных аппаратов в условиях неопределенности в реальном режиме времени / Л. Тань, А. В. Фомичев // *Междунар. науч.-техн. конф. «Информационные системы и технологии» (ИСТ-2015)*. — Нижний Новгород, 2015. — С. 273–276.
10. Canny J. A. Computational Approach to Edge Detection / J. A. Canny // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. — 1986. — Iss. 6. — Pp. 679–698.
11. Wang Z. Multi-scale structural similarity for image quality assessment / Z. Wang, E. P. Simoncelli, A. C. Bovik // *Proceedings of 37th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific group*, 2003.

12. Hasan N. Roadmap for RFID Implementation in Libraries: Issues and Challenges / N. Hasan // *International Journal of Information, Library and Society*. — 2014. — Iss. 3(1). — Pp. 65–71.
13. Dunbar W. B. Model predictive control of coordinated multi-vehicle formations / W. B. Dunbar, R. M. Murray // *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*. Las Vegas. — 2002. — Vol. 4. — Pp. 4631–4636.
14. Распопов Б. Я. Автопилот мини-беспилотного летательного аппарата / Б. Я. Распопов // *Мехатроника, автоматизация, управление*. — 2008. — № 10. — С. 19.
15. Яковлев К. С. Метод автоматического планирования траектории беспилотного летательного аппарата в условиях ограничений на динамику полета / К. С. Яковлев, Д. А. Макаров, Е. С. Баскин // *Искусственный интеллект и принятие решений*. — 2014. — № 4. — С. 3.
16. Karaman S. Sampling-based algorithms for optimal motion planning / S. Karaman, E. Frazzoli // *The International Journal of Robotics Research*. — 2011. — Vol. 30. — Iss. 7. — Pp. 846–894.
17. Lee D. Robust tracking control of an underactuated quadrotor aerial-robot based on a parametric uncertain model / D. Lee, T. Burg, D. Dawson et al. // *IEEE Intern. Conf. on Systems, Man and Cybernetics (SMC 2009)*. — 2009. — Pp. 3187–3192.
18. Нехин С. С. Автоматизация фотограмметрического сбора трехмерной информации на ЦФС / С. С. Нехин, С. В. Олейник // *Известия вузов. Геодезия и аэрофото-съемка*. — 2011. — № 2. — С. 70–74.
19. Лапшенков Е. М. Возможные методы оценки потерь при сжатии изображения в системах оптической дефектоскопии / Е. М. Лапшенков // *Сборник трудов научной конференции МГУПИ «Актуальные проблемы приборостроения, информатики и социально-экономических наук»*, 2010. — С. 52–56.
20. Гэн К. К. Планирование маршрута для квадрокоптера в неизвестной среде на основе монокулярного компьютерного зрения / К. К. Гэн // *Автоматизация. Современные технологии*. — 2015. — № 12. — С. 14–19.
21. Achtelik M. Onboard IMU and monocular vision based control for MAVs in unknown in- and outdoor environments / M. Achtelik, S. Weiss, R. Siegwart // *Intl. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*. — 2011. — Pp. 3–7. — DOI: 10.1.1.456.2037.
22. Engel J. Semi-dense visual odometry for a monocular camera / J. Engel, J. Sturm, D. Cremers // *Intl. Conf. on Computer Vision (ICCV 2013)*. — Pp. 1–5.
23. Kerl C. Dense visual SLAM for RGB-D cameras / C. Kerl, J. Sturm, D. Cremers // *Intl. Conf. on Intelligent Robot Systems (IROS 2013)*. — Pp. 1–6. — DOI: 10.1.1.402.5544.

*TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 2, pp. 141–152*  
 DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-141-152

### Vehicle Tracking System Based on Unmanned Aerial Vehicles Using Radio Frequency Identification Technology and Infrared Cameras

#### Information about author

**Sukharev N. V.**, Postgraduate Student<sup>1</sup>, Leading Engineer, Technical Project Manager<sup>2</sup>.  
 E-mail: n.suhareff@gmail.com

<sup>1</sup>Russian University of Transport (MIIT), “Automation, remote control and communication on railway transport” Department, Moscow

<sup>2</sup>АО “NPP “Mera”, Moscow

**Abstract:** The article discusses the main principles of operation and advantages of using unmanned aerial vehicles as an additional means of monitoring road traffic, analyzing and predicting traffic jams in real-time, as well as serving as a system for monitoring and assessing the condition of road surfaces and infrastructure. Particular attention is paid to the use of small unmanned aerial vehicles as an active complex for ensuring transportation safety. The possibilities of a three-channel monitoring system (visible, infrared, and radio-technical ranges) for determining the coordinates, characteristics, speeds, and a valid registration of a vehicle are considered. The advantages of the proposed method are described, such as increasing the accuracy and speed of information processing, the possibility of reducing costs for transport control. In particular, the article describes the methods of using radio-frequency identification tags to improve the efficiency of traffic management, prevent traffic congestion, optimize routes, and reduce the risks of dangerous road situations. The article presents a prospective application of infrared cameras for detecting and preventing accidents, analyzing traffic density and driver behavior. A research study has been conducted to explore the possibility of using the aforementioned methods in parallel with unmanned aerial vehicles to propose the development of a fully automated system for monitoring and controlling road transport. The relevance of using a small unmanned aerial vehicle to improve the quality of monitoring road traffic and traffic safety is presented.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle; methods of transport recognition; radio frequency identification of objects; navigation parameters; measurement complex layout; flight route; object recognition; safe road.

#### References

1. Viola P., Jones M. J. Robust real-time object detection. *International Journal of Computer Vision*, 2004, vol. 57(2), pp. 137–154.
2. Lienhart R., Maydt J. An extended set of haar-like features for rapid object detection. *In Image Processing*, 2002, vol. 1, pp. 900–903.
3. Bovik A. C., Li Ch. Content-weighted video quality assessment using a three-component image model. *Journal of Electronic Imaging*, 2010, vol. 19(1), pp. 011003-1–011003-9.
4. Sirota A. A., Solomatin A. I., Voronova E. V. Dvukhetapnyy algoritm obnaruzheniya i otsenivaniya granits ob'ektov na izobrazheniyakh v usloviyakh additivnykh pomekh i deformiruyushchikh iskazheniy [Two-stage algorithm for detecting and estimating the boundaries of objects in images under conditions of additive noise and deforming distortions]. *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics]. 2009, vol. 34, Iss. 1, pp. 109–117. (In Russian)
5. Parker J. R. *Algorithms for Image Processing and Computer Vision*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997, pp. 23–29.
6. Bo R., Lei Yu, Lixun H. On path planning for UAVs based on adaptive ant system algorithm. *Electronics Optics and Control*, 2007, vol. 6, Iss. 14, pp. 36–39.
7. Aguiar A. P., Hespanha J. P. Trajectory-tracking and path-following of underactuated autonomous vehicles with parametric modeling uncertainty. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, vol. 52, Iss. 8, pp. 1362–1379.
8. Khoroshev V., Osadchy G., Efanov D. et al. Actual State Monitoring of Railway Switch Point Blades Based on RFID Technology. *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDS'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29 — October 2, 2017, pp. 283–288. DOI: 10.1109/EWDS.2017.8110084.
9. Tan' L., Fomichev A. V. Planirovanie marshruta poleta malogabaritnykh letatel'nykh apparatov v usloviyakh neopredelennosti v real'nom rezhime vremeni [Flight route planning for small-sized aircraft under conditions of uncertainty in real time]. *Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Informatsionnye sistemy i tekhnologii" (IST-2015)* [Intern. sci.-tech. conf. "Information systems and technologies" (IST-2015)]. Nizhny Novgorod, 2015, pp. 273–276. (In Russian)

10. Canny J. A. Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986, Iss. 6, pp. 679–698.
11. Wang Z., Simoncelli E. P., Bovik A. C. Multi-scale structural similarity for image quality assessment. *Proceedings of 37th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific group*, 2003.
12. Hasan N. Roadmap for RFID Implementation in Libraries: Issues and Challenges. *Journal of Information, Library and Society*, 2014, Iss. 3(1), pp. 65–71.
13. Dunbar W. B. Murray R. M. Model predictive control of coordinated multi-vehicle formations. *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*. Las Vegas. 2002, vol. 4, pp. 4631–4636.
14. Raspopov B. Ya. Avtopilot mini-bespilotnogo letatel'nogo apparata [Autopilot of a mini-unmanned aerial vehicle]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control]. 2008, Iss. 10, p. 19. (In Russian)
15. Yakovlev K. S., Makarov D. A., Baskin E. S. Metod avtomaticheskogo planirovaniya traektorii bespilotnogo letatel'nogo apparata v usloviyakh ogranicheniy na dinamiku poleta [The method of automatic planning of the trajectory of an unmanned aerial vehicle under conditions of restrictions on flight dynamics]. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial intelligence and decision making]. 2014, Iss. 4, p. 3. (In Russian)
16. Karaman S., Frazzoli E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning. *The International Journal of Robotics Research*. 2011, vol. 30, Iss. 7, pp. 846–894.
17. Lee D., Burg T., Dawson D. et al. Robust tracking control of an underactuated quadrotor aerial-robot based on a parametric uncertain model. *IEEE Intern. Conf. on Systems, Man and Cybernetics (SMC 2009)*, 2009, pp. 3187–3192.
18. Nekhin S. S., Oleynik S. V. Avtomatizatsiya fotogrammetricheskogo sbora trekhmernoy informatsii na TsFS [Automation of photogrammetric collection of three-dimensional information on CFS]. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka* [Izvestiya vuzov. Geodesy and aerial photography]. 2011, Iss. 2, pp. 70–74. (In Russian)
19. Lapshenkov E. M. Vozmozhnye metody otsenki poter' pri szhatii izobrazheniya v sistemakh opticheskoy defektoskopii [Possible methods for estimating image compression losses in optical flaw detection systems]. *Sbornik trudov nauchnoy konferentsii MGUPI "Aktual'nye problemy priborostroeniya, informatiki i sotsial'no-ekonomicheskikh nauk"* [Proceedings of the MGUPI scientific conference "Actual problems of instrumentation, informatics and socio-economic sciences"]. 2010, pp. 52–56. (In Russian)
20. Gen K. K. Planirovanie marshruta dlya kvadroptera v neizvestnoy srede na osnove monokulyarnogo komp'yuternogo zreniya [Route planning for a quadcopter in an unknown environment based on monocular computer vision]. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii* [Automation. Modern technologies]. 2015, Iss. 12, pp. 14–19. (In Russian)
21. Achtelik M., Weiss S., Siegwart R. Onboard IMU and monocular vision based control for MAVs in unknown in- and outdoor environments. *Intl. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, 2011, pp. 3–7. DOI: 10.1.1.456.2037.
22. Engel J., Sturm J., Cremers D. Semi-dense visual odometry for a monocular camera. *Intl. Conf. on Computer Vision (ICCV 2013)*, pp. 1–5.
23. Kerl C., Sturm J., Cremers D. Dense visual SLAM for RGB-D cameras. *Intl. Conf. on Intelligent Robot Systems (IROS 2013)*, pp. 1–6. DOI: 10.1.1.402.5544.

УДК 656.257+004.89

## ПОСТРОЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДОВ

**НИКИТИН Александр Борисович**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»; e-mail: nikitin@crtc.spb.ru

**НАСЕДКИН Олег Андреевич**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»; e-mail: nasedkin@crtc.spb.ru

**ЛЫКОВ Андрей Александрович**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»; e-mail: bastdrew@mail.ru

**ЖУРАВЛЕВА Наталья Александровна**, д-р экон. наук, проф., зав. кафедрой «Экономика транспорта»; e-mail: zhuravleva\_na@mail.ru

**КОРНИЕНКО Анатолий Адамович**, д-р техн. наук, проф., профессор кафедры «Информатика и информационная безопасность»; e-mail: kaa.pgups@yandex.ru

**КОПЫТОВ Дмитрий Викторович**, аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»; e-mail: dmitry9786@gmail.com

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург

Высокие показатели материалоемкости новых релейных систем не позволяют выполнить модернизацию устройств на существующих площадях и требуют строительства новых зданий постов централизации, что существенно сказывается на объемах капитальных вложений. Переход на микроэлектронную и микропроцессорную электронную базу позволяет проектировать системы более компактными, обладающими расширенными функциональными возможностями. В мировой практике отмечается тенденция массового применения микропроцессорных централизаций. Однако имеет место медленный темп обновления устройств, причиной чему стала высокая стоимость микропроцессорной централизации, которая в разы превышает аналогичные релейные централизации. Высокая производительность вычислительных средств и волоконно-оптических каналов передачи данных позволяет проектировать рациональные структуры микропроцессорных централизаций. В статье выполнен сравнительный анализ структур микропроцессорных централизаций. Применяемые децентрализованные структуры решают вопросы сокращения капитальных вложений на проектирование и строительство кабельной сети станции. Изложены преимущества применения данных систем с точки зрения управления перевозочным процессом, сделаны выводы по эффективному применению возможностей современных систем управления с интегрированными подсистемами применительно к полигонным технологиям управления движением поездов.

**Ключевые слова:** системы железнодорожной автоматики и телемеханики; микропроцессорная централизация; автоматизированное рабочее место; управляющий вычислительный комплекс; объектный контроллер; устройство сопряжения; пользовательский интерфейс; дежурный по станции; транспортабельный модуль; волоконно-оптическая линия связи; полигонная технология управления.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-153-161

### ▼ Введение

Техническое перевооружение станционных систем управления в основном происходило в конце 60-х — начале 80-х годов прошлого века. Тогда массовое распространение получила система блочной маршрутно-релейной централизации, которая благодаря унификации схемотехнических решений в виде функциональных блоков (степень типизации достигала 60 %) позволила увеличить темп строительства систем электрической централизации (ЭЦ). К концу 80-х годов СССР по техническому

оснащению системами железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) занимал ведущее место в мире. Это позволило достигнуть высокого уровня безопасности движения поездов, а также исключить персонал стрелочников, занимавшихся переводом стрелок непосредственно в опасной зоне передвижений подвижных единиц. С внедрением ЭЦ, благодаря высокой скорости приготовления маршрутов, возросли пропускная и перерабатывающая способности станций. Типизация схем ЭЦ упростила процесс проектирования,

строительства и обслуживания станционных систем.

Реализация этих задач сопровождалась значительным увеличением числа реле, приходящихся на одну централизованную стрелку [1]. Увеличение числа реле на стрелку влечет удорожание системы и при сохранении существующего темпа строительства ЭЦ требует ввода в действие дополнительных мощностей для их производства. Кроме того, высокие показатели материалоемкости новых релейных систем не позволяют выполнить модернизацию устройств на существующих площадях и требуют строительства новых зданий постов централизации. Рост показателя числа реле на стрелку отражает ситуацию, когда релейные системы практически исчерпали себя для расширения функциональных возможностей.

Также следует отметить, что начавшееся внедрение на железнодорожном транспорте цифровых технологий предъявляет повышенные требования и к системам ЭЦ прежде всего в части интеграции в составе технологических моделей перевозочного процесса. Из-за ограниченности объема данных релейные системы не удовлетворяют тому функциональному набору, который определяет эффективность работы транспорта в свете развития информационных технологий.

На смену устаревшим релейным станционным системам пришли системы нового поколения — микропроцессорные системы централизации (МПЦ). Их появление в конце 70-х годов прошлого века стало началом применения в СЖАТ микропроцессорных больших интегральных схем и персональных компьютеров. Несмотря на то, что с момента промышленной эксплуатации первых МПЦ прошло уже более полвека, их количество на железных дорогах относительно невелико. Основной причиной медленного темпа обновления устройств стала высокая стоимость МПЦ, которая в разы превышает аналогичные релейные ЭЦ [1], что обусловлено прежде всего сложностью реализации безопасных технологий на вычислительной платформе [2]. Это предопределяет актуальность поиска новых эффективных путей применения современных технических средств в станционных системах управления. В [3] такой

подход был рассмотрен в отношении расширения функциональных возможностей и интеграции функций нескольких систем в единых вычислительных средствах. Еще одним из подходов является применение рациональных схем и конфигураций для полигона железнодорожной инфраструктуры.

### 1. Виды структур МПЦ

В системе МПЦ (рис. 1) можно выделить несколько функциональных подсистем: автоматизированные рабочие места (АРМ), безопасный управляющий вычислительный комплекс (УВК) и объектные контроллеры (ОК).

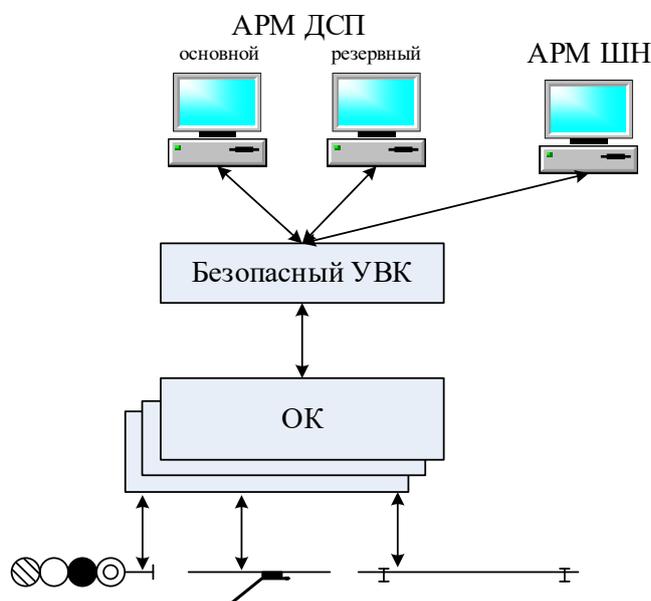


Рис. 1. Структура технических средств МПЦ

АРМ дежурных по станции (ДСП) обеспечивает интерфейс взаимодействия пользователя с техническими средствами МПЦ и позволяет контролировать состояние станционных объектов СЖАТ, передавать приказы оператора в УВК, протоколировать работу системы и ДСП, а также распечатать, при необходимости, данные на принтере. Для АРМ ДСП в системах МПЦ используются, как правило, дублированные, промышленные персональные электронно-вычислительные машины (ПЭВМ). Один комплект ПЭВМ является основным и активным (обеспечивает возможность передачи команд управления от ДСП в безопасный УВК), а второй резервный — пассивный,

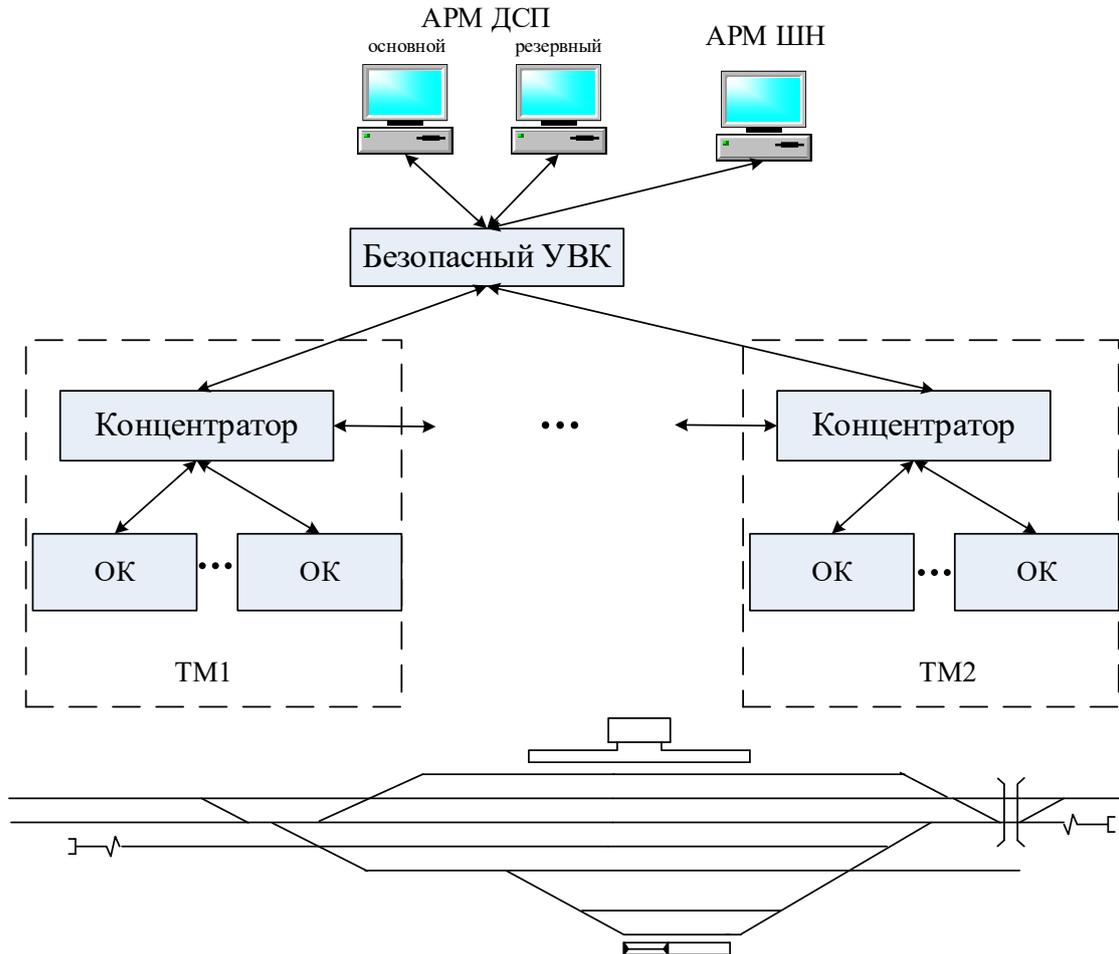


Рис. 2. Децентрализованная структура МПЦ Ebilock-950

находится в «горячем» резерве. В состав оборудования рабочего места ДСП также входят средства связи и щиток ключей жезлов и защелок полуавтоматической блокировки. Обычно для АРМ электромеханика (ШН) применяются аппаратные средства ПЭВМ той же конфигурации, что и у ДСП. Этим обеспечивается «холодное» резервирование АРМ ДСП, что позволяет в исключительных случаях, изменив настройки программного обеспечения, использовать его для управления станцией. В штатном режиме АРМ ШН используется для диагностики и контроля работы системы и напольного оборудования, просмотров архивов, ведения статистик отказов и других сервисных функций для обслуживающего персонала.

УВК представляет собой сложную структуру программно-аппаратных средств, спроектированную по правилам построения безопасных систем [4, 5]. Посредством цифровых

интерфейсов УВК связан с ОК, которые реализуют алгоритмы контроля и управления непосредственно исполнительными устройствами посредством безопасных электронных схем устройств сопряжения со стрелками, светофорами и другим технологическим оборудованием СЖАТ.

Объектные контроллеры включаются в общую систему передачи информации, которая выполняется в виде кольца, что значительно повышает показатель надежности системы [5, 6]. Последнее обстоятельство служит предпосылкой построения распределенных систем.

В отечественной практике схема размещения оборудования объектных контроллеров МПЦ по горловинам станции (рис. 2) была реализована в пилотном проекте системы Ebilock-950 (ст. Калашниково, Октябрьская ж. д., 2000 г.) [7]. Посредством включения концентраторов в петлю связи оборудование ОК

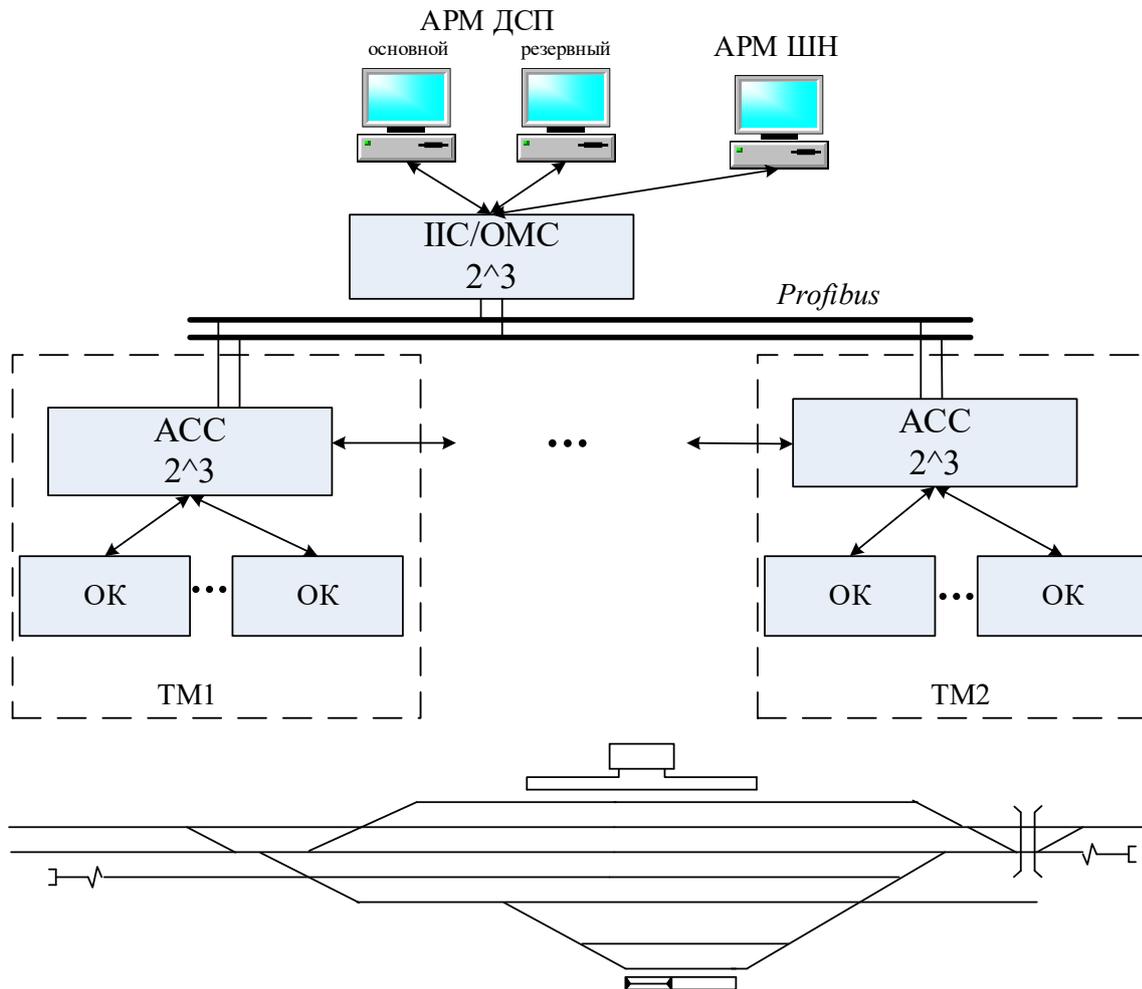


Рис. 3. Децентрализованная структура МПЦ Simis W:  
 ПЦ — модуль взаимоувязки и интерфейсов; ОМС — модуль администрирования верхнего уровня;  
 ACC — модуль управления районом

устанавливается в транспортабельных модулях (ТМ) по горловинам станции. Это исключает необходимость проектирования и строительства многопроводной кабельной сети с поста до групповых муфт, при этом требуются только локальные кабели в горловине станции для прямопроводного управления от ТМ до объектов.

Более глубокая децентрализация оборудования МПЦ также может быть выполнена в пределах одной станции путем размещения аппаратуры управления в непосредственной близости к группе объектов управления по районам управления (рис. 3). В системе Simis W районные безопасные УВК не только решают задачу сокращения кабельной сети, но и реализуют функции взаимозависимостей для своей зоны ответственности [5], то есть

распределенные вычисления, которые выполняются с учетом обмена данными между смежными УВК.

В новой разработке фирмы Siemens ОК располагаются непосредственно у объекта управления (рис. 4) [8]. Для этого на станции устраиваются две общие резервированные сети, увязывающие ОК:

- передачи данных по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС);
- электропитания устройств.

Для распределенных МПЦ разработано семейство ОК, рассчитанных на работу в расширенном диапазоне температур и крепление на стандартных монтажных рейках в путевых шкафах. Это светофорный контроллер Trackguard SCM 150, стрелочный контроллер Trackguard PCM 150 и система счета осей

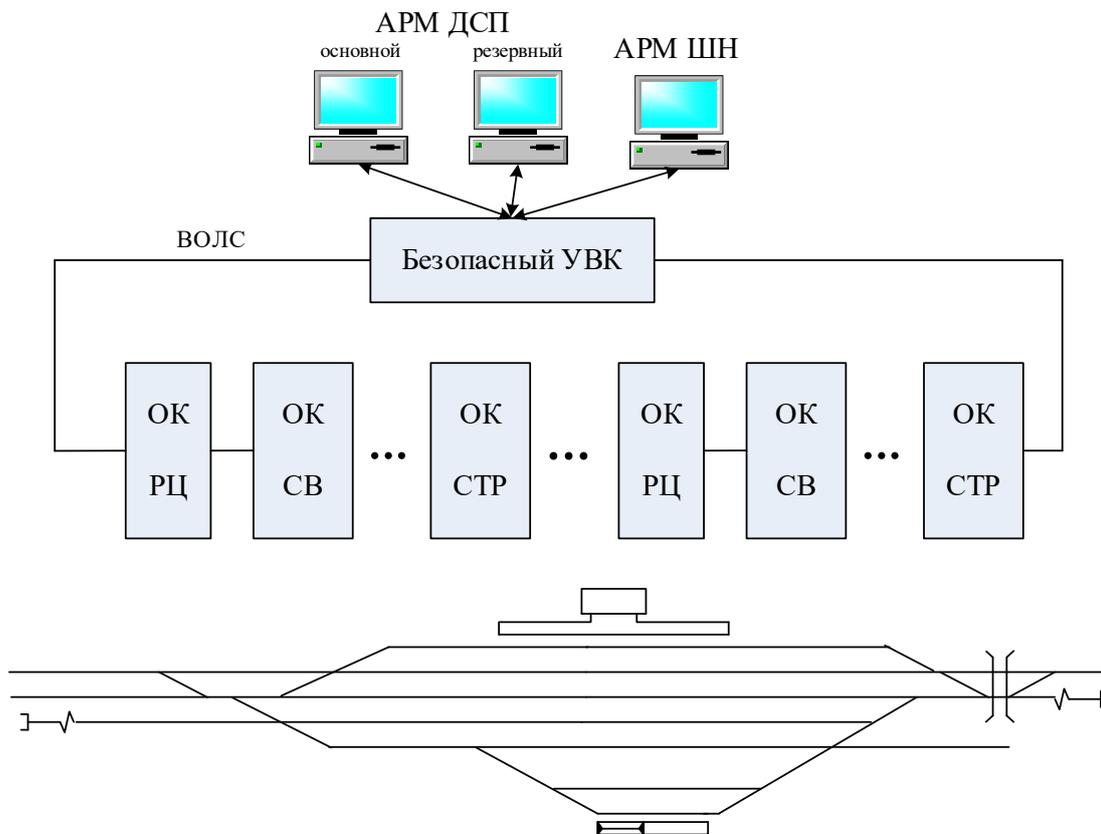


Рис. 4. Распределенная структура МПЦ Siemens с напольным размещением оборудования ОК:  
РЦ — рельсовая цепь; СВ — светофор; СТР — стрелка

Clearguard ACM 250. Кроме того, создан контроллер цифрового ввода-вывода Clearguard DCM 150, также рассчитанный на размещение в путевых шкафах.

В пилотном проекте на станции Аннаберг-Буххольц-Южный в соответствии с новой стратегией DB<sup>1</sup> ставилась задача совместного с компанией Siemens перехода к распределенной архитектуре МПЦ, которую отличают применение безопасных объектных контроллеров, отдельные подвод энергии и обмен информацией с напольными устройствами, а также стандартизация интерфейсов.

Децентрализованное управление напольными устройствами предполагает наличие точек доступа к сети (Points of Services, PoS). Первый этап проекта завершился в 2013 г. вводом в эксплуатацию МПЦ с распределенной архитектурой, основанной на сетевой технологии Sinet компании Siemens.

<sup>1</sup> Deutsche Bahn (DB) — немецкая компания, основной железнодорожный оператор Германии.

На втором этапе были реализованы интерфейсы, соответствующие стандарту NeuPro, для светофоров (SCI-LS), систем счета осей (SCI-TDS) и стрелок (SCI-P). Основой такой МПЦ является высоконадежная дублированная сеть передачи данных на основе протокола IP, в которой применены серийные промышленные коммуникационные компоненты для децентрализованных объектных контроллеров всех напольных устройств и стандартизированные интерфейсы между ядром МПЦ (центральным процессором) и ее подсистемами.

Этим достигается еще и минимизация локальной кабельной сети по сравнению с децентрализованным вариантом (см. рис. 2). Опыт использования такого подхода есть и в отечественной практике — использование активных светооптических светодиодных головок для светофоров, двигателей МСУ для стрелок [9, 10]. Однако напольное расположение ОК требует обеспечения дополнительных мер по требованиям климатологии, механики и

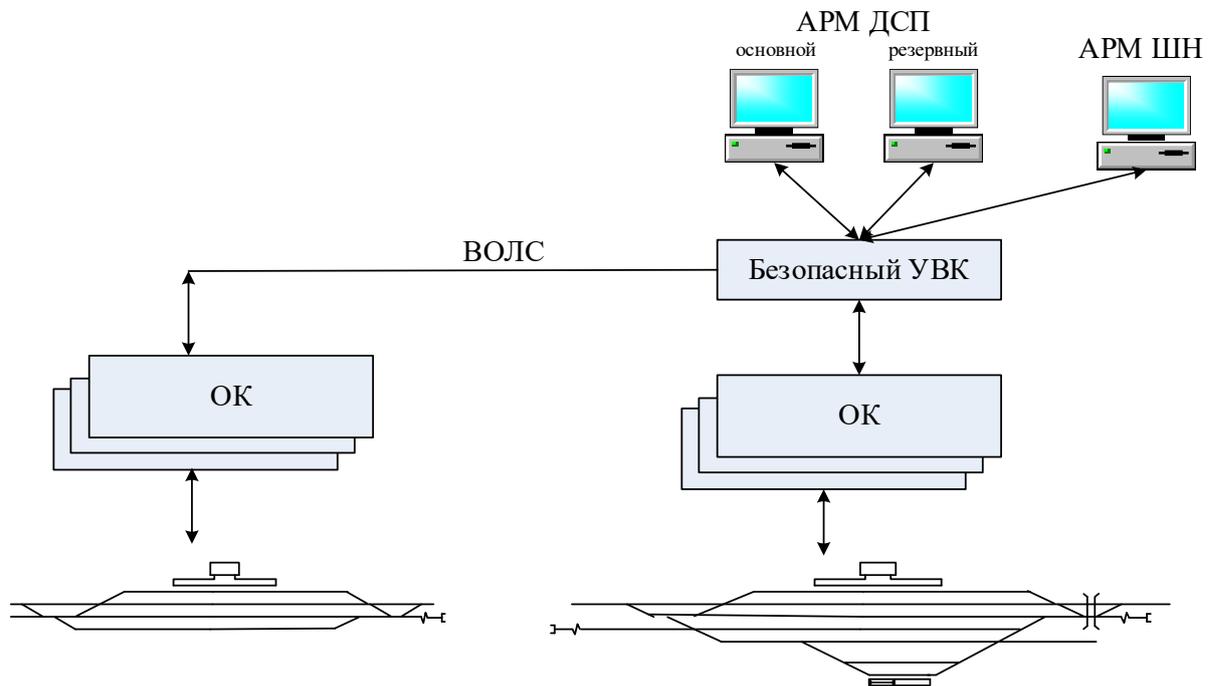


Рис. 5. Мультистанционная архитектура технических средств МПЦ

электромагнитной совместимости. Поскольку для напольного оборудования нормы более жесткие по сравнению с постовым [8], требуется применение элементов СЖАТ и их комплектующих специального использования.

Тем не менее рассмотренные варианты таких распределенных МПЦ обеспечивают экономию напольного кабеля и снижают объем капитальных вложений при строительстве кабельной сети станции.

На основе многочисленных расчетов было показано, что экономически целесообразным является применение МПЦ на станциях с числом стрелок, превышающим 45–50 [1]. Вместе с тем сохранение на небольших станциях релейных систем или применение гибридных систем релейно-процессорного типа [11, 12] нарушает монотонность (однородность) технической оснащённости участков, приводит к многообразию технических решений при комплексной реконструкции участка, что в последующем создает трудности в эксплуатации.

Это противоречие ликвидируется при использовании распределенной архитектуры системы управления, когда для группы станций используется один общий безопасный

УВК (рис. 5). Именно поэтому такое построение системы получило название «мультистанционной» архитектуры. Таким образом, возможности вычислительных средств в сочетании с применением волоконно-оптических каналов передачи данных в МПЦ с распределенной архитектурой впервые позволило рассматривать эффективность не только для крупных станций, но и на расширенном полигоне управления с небольшими раздельными пунктами.

## 2. Интегрированная распределенная система управления движением поездов

Однако наибольший интерес и экономическую целесообразность представляют интегрированные распределенные архитектуры. На рис. 6 показана схема интегрированной системы комплекса распределенной архитектуры.

Здесь распределение программно-аппаратных средств системы выполняется в пределах полигона управления, включающего несколько станций, а суть интеграции состоит в комплексовании с МПЦ других СЖАТ участка. Благодаря высокой производительности

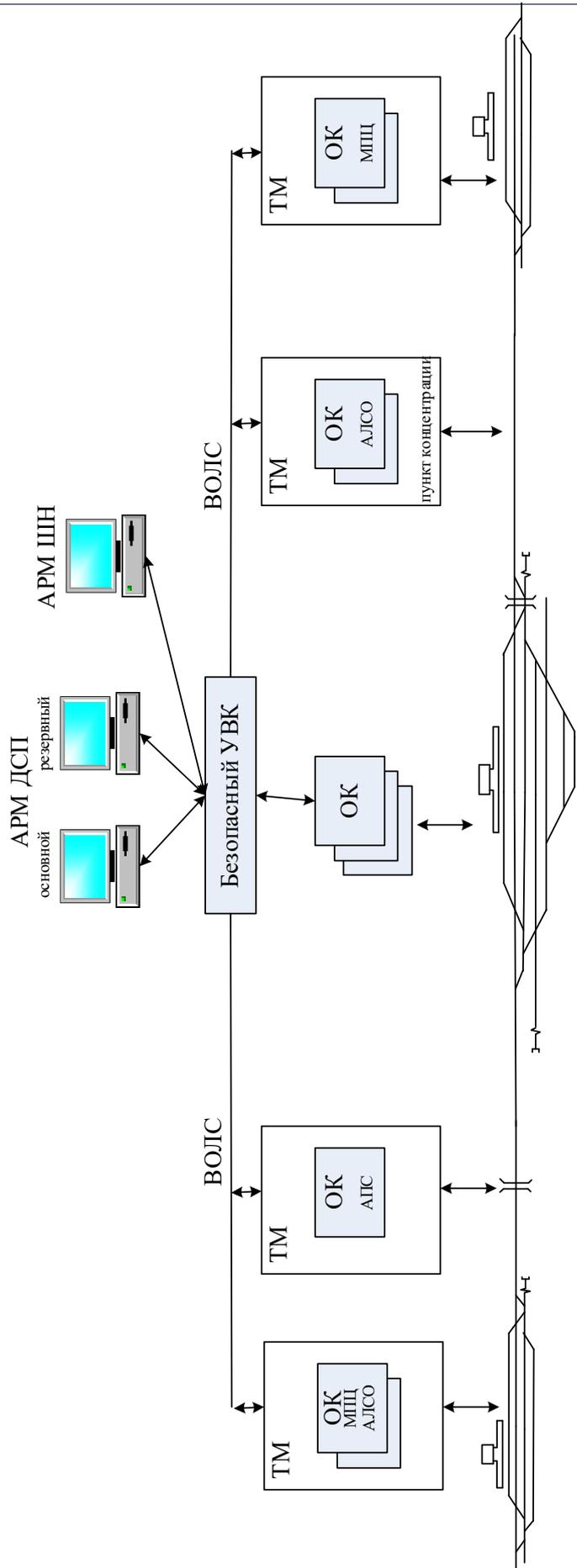


Рис. 6. Интегрированная структура комплексной распределенной архитектуры:

АЛСО — автоматическая локомотивная сигнализация и связи; АПС — автоматическая переездная сигнализация

## Заключение

современных вычислительных средств и высокоскоростных цифровых систем передачи данных по ВОЛС обслуживание полигона осуществляется одним УВК, который располагается на опорной станции. В этом варианте опорной станцией является, как правило, наибольшая из них по количеству объектов управления. Критерием выбора опорной станции также является наличие на ней квалифицированного обслуживающего персонала. На станциях, которые находятся на управлении с опорной станции, размещаются только конструктивы с устройствами сопряжения с объектами. Информационный обмен между опорной станцией и соподчиненными отдельными пунктами, которые находятся на управлении, осуществляется по оптоволоконным каналам связи. Исключение сменного дежурства на отдельных пунктах зоны опорной станции позволяет отказаться на них от устройства стационарных АРМ ДСП, предусмотрев возможность подключения мобильного АРМ для обеспечения функции станционного (резервного) управления.

По сравнению с классическими системами интегрированная распределенная архитектура позволяет одним УВК решать не только задачи станционных систем, но и существенно расширяет его функциональные возможности. И в этом смысле безопасный УВК следует рассматривать не только как станционное устройство для реализации блокировочных взаимозависимостей стрелок, светофоров и маршрутов, а в более широком смысле, как это принято в английской терминологии Interlocking. При этом на УВК также возлагаются задачи интервального регулирования — полуавтоматической блокировки или автоблокировки, управления заградительными устройствами переездной автоматики, сигнализации пешеходных дорожек и т. д. Именно при интеграции функций безопасности размывается функциональная принадлежность УВК к станционным или перегонным устройствам.

Неотъемлемыми являются в УВК также задачи управления устройствами электрообогрева или пневмоочистки стрелочных переводов, технической диагностики, информирования пассажиров о движении поездов и т. п.

1. Современными тенденциями для обновления и нового строительства систем ЭЦ является применение микропроцессорных централизаций стрелок и сигналов. В настоящее время для использования предлагается линейка систем МПЦ, которые имеют допуск для тиражирования на магистральном транспорте.

2. Реализуемые технологии обеспечения безопасности определяют высокую стоимость внедрения МПЦ, что зачастую обуславливает неэффективное применение этих систем, в особенности на станциях с небольшим числом стрелок, где высокая производительность используемых вычислительных средств создает загрузку 3–5 %.

3. Одним из направлений повышения эффективности использования МПЦ является проектирование распределенных децентрализованных структур, которые обеспечивают функционирование группы станций от одного УВК.

4. Наибольшую экономическую целесообразность представляют интегрированные распределенные архитектуры МПЦ, где распределение программно-аппаратных средств системы выполняется в пределах полигона управления, включающего несколько станций, а суть интеграции состоит в комплексировании с МПЦ других СЖАТ участка — систем интервального регулирования, переездной автоматики, оповещения работающих на путях, диагностики и удаленного мониторинга. Благодаря высокой производительности современных вычислительных средств и высокоскоростных цифровых систем передачи данных по ВОЛС обслуживание полигона осуществляется одним УВК, который располагается на опорной станции. ▲

## Библиографический список

1. Сапожников Вл. В. Анализ компьютерных систем оперативного управления устройствами ЭЦ / Вл. В. Сапожников, А. Б. Никитин // Автоматика, связь, информатика. — 2006. — № 6. — С. 6–8.
2. Системы микропроцессорной централизации. Международный обзор // Железные дороги мира. — 1997. — № 8. — С. 8–17.
3. Никитин А. Б. Интеллектуальные функции управления в микропроцессорных системах централизации / А. Б. Никитин, О. А. Наседкин, А. А. Лыков и др. // Автоматика на транспорте. — 2023. — Т. 9. — № 1. — С. 63–71. — DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-63-71.

4. Бочков К. А. Микропроцессорные системы автоматики на железнодорожном транспорте: учеб. пособие для вузов / К. А. Бочков, А. Н. Коврига, С. Н. Харлап. — Гомель: БелГУТ, 2013. — 254 с.
5. Fenner W. Bahnsicherungstechnik / W. Fenner, P. Naumann, J. Trinckauf. — Erlangen: Siemens, 2003. — 472 p.
6. Алешин В. Н. Микропроцессорная централизация стрелок и сигналов системы Ebilock-950 / В. Н. Алешин // Автоматика, связь, информатика. — 2003. — № 1. — С. 20–23.
7. Алешин В. Н. Этапы создания и внедрения МПЦ Ebilock-950 / В. Н. Алешин // Автоматика, связь, информатика. — 2005. — № 12. — С. 22–24.
8. Смагин Ю. С. Первая цифровая система централизации в Германии / Ю. С. Смагин, А. Ю. Ефремов // Железные дороги мира. — 2018. — № 8. — С. 63–67.
9. Электродвигатель малогабаритный стрелочный универсальный (ЭМСУ). ТУ32 ЦШ 162.22—2009. — URL: <http://geksar.ru/> (дата обращения: 02.11.2020).
10. Электродвигатель малогабаритный стрелочный универсальный (ЭМСУ) // Микрон. — URL: <https://www.mikronom.ru/katalog/privodnaia-tekhnika/elektrodvigateli/elektrodvigatel-malogabaritnyi-strelochnyi-universalnyi-emsu.html> (дата обращения: 02.11.2020).
11. Гавзов Д. В. Релейно-процессорная централизация ЭЦ-МПК / Д. В. Гавзов, А. Б. Никитин // Автоматика, связь, информатика. — 2002. — № 4. — С. 12–15.
12. Долгий И. Д. Возможности релейных и процессорных систем управления станцией / И. Д. Долгий // Автоматика, связь, информатика. — 2010. — № 5. — С. 25–27.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 2, pp. 153–161  
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-153-161

### Construction of Distributed Microprocessor-Based Train Control Systems

#### Information about authors

**Nikitin A. B.**, Doctor in Engineering in Engineering, Professor, Head of the Automation and Remote Control on Railways Department. E-mail: [nikitin@crtc.spb.ru](mailto:nikitin@crtc.spb.ru)

**Nasedkin O. A.**, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Automation and Remote Control on Railways Department. E-mail: [nasedkin@crtc.spb.ru](mailto:nasedkin@crtc.spb.ru)

**Lykov A. A.**, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Automation and Remote Control on Railways Department. E-mail: [bastdrew@mail.ru](mailto:bastdrew@mail.ru)

**Zhuravleva N. A.**, Doctor in Economics, Professor, Head of the Transport Economics Department. E-mail: [zhuravleva\\_na@mail.ru](mailto:zhuravleva_na@mail.ru)

**Korniyenko A. A.**, Doctor in Engineering, Professor, Professor of the Information Technology and IT Security Department. E-mail: [kaa.pgups@yandex.ru](mailto:kaa.pgups@yandex.ru)

**Kopytov D. V.**, Postgraduate Student, Automation and Remote Control on Railways Department. E-mail: [dmitry9786@gmail.com](mailto:dmitry9786@gmail.com)

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

**Abstract:** High material requirements of new relay systems make it impossible to modernize devices within existing areas and require the construction of new interlocking system buildings, which significantly affects the volume of capital investments. Transitioning to microelectronic and microprocessor electronic platforms allows for the design of more compact systems with expanded functional capabilities. In global practice, there is a trend towards widespread use of microprocessor-based interlocking system. However, there is a slow pace of device updates, mainly due to the high cost of microprocessor-based interlocking system, which exceeds by several times the cost of similar relay-based interlocking system. The high performance of computing resources and fiber-optic data transmission channels allows for the design of efficient structures for microprocessor-based interlocking system. The article presents a comparative analysis of the structures of microprocessor-based interlocking system. The implemented decentralized structures solve the issues of reducing investments for the design and construction of the station's cable network. The advantages of using these systems from the point of view of controlling the transportation process are described, conclusions are drawn on the effective use of the capabilities of modern control systems with integrated subsystems in relation to field-based train traffic control technologies.

**Keywords:** railway automation and remote control; microprocessor-based interlocking system; automated workplace; control computing complex; object controller; coupling device; user interface; station attendant; transportable module; fiber-optic communication line; field-based train traffic control technology.

#### References

1. Sapozhnikov V. I., Nikitin A. B. Analiz komp'yuternykh sistem operativnogo upravleniya ustroystvami ETs [Analysis of computer systems for operational control of EC devices]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2006, Iss. 6, pp. 6–8. (In Russian)
2. Sistemy mikroprotsessornoy tsentralizatsii. Mezhdunarodnyy obzor [Systems of microprocessor centralization. International review]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the world]. 1997, Iss. 8, pp. 8–17. (In Russian)
3. Nikitin A. B., Nasedkin O. A., Lykov A. A. et al. Intellektual'nye funktsii upravleniya v mikroprotsessornykh sistemakh tsentralizatsii [Intelligent control functions in microprocessor centralization systems]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2023, vol. 9, Iss. 1, pp. 63–71. DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-63-71. (In Russian)
4. Bochkov K. A., Kovriga A. N., Kharlap S. N. *Mikroprotsessornyye sistemy avtomatiki na zheleznodorozhnom transporte: ucheb. posobie dlya vuzov* [Microprocessor automation systems in railway transport: textbook. allowance for universities]. Gomel': BelGUT Publ., 2013, 254 p. (In Russian)
5. Fenner W., Naumann P., Trinckauf J. Bahnsicherungstechnik. Erlangen: Siemens, 2003, 472 p.
6. Aleshin V. N. Mikroprotsessornaya tsentralizatsiya strelok i signalov sistemy Ebilock-950 [Microprocessor centralization of arrows and signals of the Ebilock-950 system]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2003, Iss. 1, pp. 20–23. (In Russian)
7. Aleshin V. N. Etapy sozdaniya i vnedreniya MPTs Ebilock-950 [Stages of creation and implementation of the Ebilock-950 MPC]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2005, Iss. 12, pp. 22–24. (In Russian)
8. Smagin Yu. S., Efremov A. Yu. Pervaya tsifrovaya sistema tsentralizatsii v Germanii [The first digital centralization system in Germany]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways of the world]. 2018, Iss. 8, pp. 63–67. (In Russian)
9. *Elektrodvigatel' malogabaritnyy strelochnyy universal'nyy (EMSU). TU32 TsSh 162.22—2009* [Electric motor small-sized switch universal (EMSU). TU32 TsSh 162.22—2009]. Available at: <http://geksar.ru/> (accessed: November 2, 2020). (In Russian)
10. *Elektrodvigatel' malogabaritnyy strelochnyy universal'nyy (EMSU)* [Electric motor small-sized switch universal (EMSU)]. *Mikronom* [Micon]. Available at: <https://www.mikronom.ru/katalog/privodnaia-tekhnika/elektrodvigateli/elektrodvigatel-malogabaritnyi-strelochnyi-universalnyi-emsu.html> (accessed: November 2, 2020). (In Russian)
11. Gavzov D. V., Nikitin A. B. Releyeno-protsessornaya tsentralizatsiya ETs-MPK [Relay-processor centralization of EC-MPK]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2002, Iss. 4, pp. 12–15. (In Russian)
12. Dolgij I. D. Vozmozhnosti releynykh i protsessornykh sistem upravleniya stantsiy [Possibilities of relay and processor control systems of the station]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2010, Iss. 5, pp. 25–27. (In Russian)

# ОРГАНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ СТАНЦИИ

ГРОШЕВ Василий Александрович, инженер кафедры; e-mail: vas.groshev@mail.ru

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

Статья посвящена исследованию систем управления работой железнодорожных станций, обусловленного сложившейся в промышленности тенденцией к разработке и внедрению цифровых систем управления, обеспечивающих повышение функциональности применяемых технологических средств. Проведен анализ используемых на железных дорогах и метрополитене автоматизированных систем управления, описаны их достоинства и недостатки. Показана необходимость построения цифровой системы оперативного управления работой станции, обеспечивающей автоматизацию таких интеллектуальных функций, как планирование операций, формирование заданий и контроль за их выполнением ответственными подразделениями. В представленной работе произведен синтез информационной структуры подобной системы, обеспечивающей получение, передачу и обработку данных, источником которых являются эксплуатируемые в настоящее время автоматизированные системы железнодорожного транспорта различного назначения. Определены элементы структуры (базы данных, информационные массивы), дано их описание, выстроены связи между ними, описаны реализуемые функции. Сформулировано понятие модельной единицы как пакета данных, описывающего хранимую в системе информацию по каждому элементу технологического процесса работы станции. Приведены примеры алгоритмов функционирования описанной структуры в части контроля передвижений и формирования модельных единиц подвижного состава, находящегося в контуре управления системы. Сформулированы возможные направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** цифровая система управления; цифровая железнодорожная станция; автоматизированные системы управления; интеграция систем управления; цифровизация оперативного управления.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-162-177

## ▼ Введение

Системы управления технологическими процессами являются важным элементом структуры предприятия. Необходимость их развития обусловлена существующей тенденцией к цифровизации указанных процессов [1, 2]. В настоящее время на сети ОАО «РЖД» на разных этапах перевозочного процесса применяется множество различных информационно-управляющих систем широкого назначения.

Внедрение микропроцессорных систем управления позволяет повысить функциональность применяемых технических средств. Настоящий этап развития железнодорожной техники характеризуется, с одной стороны, массовым внедрением цифровой аппаратуры для решения различных задач с прицелом на реализацию проекта создания «цифровой

железной дороги» и в его составе проекта «цифровой железнодорожной станции». С другой стороны, применяемые устройства решают простейшие задачи зачастую без интеллектуальной составляющей. Как показывают исследования, текущий уровень автоматизации процесса управления работой станции соответствует первому — самому низшему уровню [3, 4].

Развитие автоматизированной системы управления железнодорожным транспортом (АСУ ЖТ) [5] в различных вариациях в настоящее время не устранило указанного противоречия. До сих пор существует ряд технических ограничений, например необходимость ручного ввода информации, отсутствие взаимосвязи между подсистемами, большое время обновления информации, которое может достигать в некоторых случаях часов и даже суток и пр.

Отдельно развивались системы, которые не были связаны непосредственно с управлением процессом работы станции, но облегчали управление эксплуатационной работой транспорта, в частности позволили автоматизировать фиксацию выполнения графика движения поездов (ГИД Урал), взаимодействие с контрагентами перевозочного процесса (ЭТРАН), мониторинг состояния объектов инфраструктуры (АПК-ДК).

В настоящее время осуществляются различные попытки создания системы, которая позволила бы обеспечить оперативное и интеллектуальное управление работой станции на основе цифровых технологий. Сюда можно отнести интеллектуальную систему управления железнодорожной станцией (ИСУЖТ) [6], разрабатываемую с 2010 года ВНИИЖТом, автоматизированные системы управления станцией (АСУ СТ), разрабатываемые ООО «ЦИТ Транс М» и ООО «НТЦ ТРАНССИСТЕМОТЕХНИКА». Указанные решения позволяют закрыть часть потребностей в автоматизации, но не получили в настоящее время массового применения на отечественных дорогах. Отметим, что каждая из этих систем, в отличие от АСУ ЖТ, является в некоторой степени уникальным решением. Их массовое внедрение приводит к риску необходимости разработки широкой палитры различных интерфейсов для объединения в общую структуру управления, что потребует дополнительных средств на разработку и обслуживание стыков между системами. Замена отдельных решений после истечения срока эксплуатации или вследствие отказа также может стать дорогостоящим нетривиальным решением.

В качестве примера технического решения, обеспечивающего интеграцию множества различных подсистем в единое информационно-цифровое пространство, можно рассмотреть комплексную автоматизированную систему диспетчерского управления (КАС ДУ) разработки Петербургского государственного университета путей сообщения, применяемую в ГУП «Петербургский метрополитен» и на других объектах на территории Российской Федерации [7], а также стран ближнего зарубежья. Система объединяет в себя технические

средства всех оперативных служб метрополитена: движения, электроснабжения, электро-механической и эскалаторной. Построение системы позволяет через совокупность стандартизированных интерфейсов подключать к единому информационно-цифровому пространству оборудование различных производителей, среди которых АО «НИИ точной механики» и ООО «ТяжПромИнжиниринг», что обеспечивает реализацию принципов непрерывности и устойчивости управления, постоянного обновления информации и своевременности принятия решения, сократив потери времени.

В зарубежных работах также рассматриваются различные варианты развития системы управления. В статьях [8, 9] описан пример интеграции подсистем управления движением поездов, контроля технического состояния поезда, цифровых систем связи в единое пространство для работы в железнодорожном узле Штутгарта. Работа [10] посвящена построению дата-центров для цифровых железных дорог на основе требований уровня SIL4. Авторами рассмотрены характеристики такого дата-центра, описана его архитектура. Работы [11, 12] отмечают необходимость применения новых средств контроля свободности пути для построения «цифровой централизации», что позволит повысить качество информации о перевозочном процессе железнодорожного транспорта и создаст предпосылки для принятия более эффективных управленческих решений.

Применение подхода, при котором автоматизированная система управления работой станции или полигона строится на основе интеграции существующих систем различных производителей со стандартизацией информационных и технических интерфейсов, позволит обеспечить повышение уровня автоматизации управления с минимальными затратами на разработку, внедрение и эксплуатацию. Настоящая работа посвящена разработке информационной структуры цифровой системы управления оперативной работой станции, обеспечивающей интеграцию существующих систем и их данных в единое технологическое пространство на уровне железнодорожной станции. Целью подобной интеграции

является создание информационной модели технологического процесса, функционирующей в режиме реального времени.

### 1. Модельная единица

В основе цифровой системы управления оперативной работой станции лежит модель технологического процесса, элементами которой являются: пути, стрелки, подвижной состав, другие объекты инфраструктуры.

Введем понятие «модельная единица» — пакет данных, находящийся в системе и описывающий каждый элемент технологического процесса. Иначе говоря, такой пакет данных позволяет однозначно и достоверно идентифицировать элемент технологического процесса и его состояние. Существуют следующие типы модельных единиц: модельная единица вагона, модельная единица локомотива, модельная единица поезда, модельная единица специального подвижного состава, модельная единица станционного технологического центра (СТЦ), модельная единица пункта технического осмотра (ПТО), модельная единица грузового фронта. Для каждого реального объекта, находящегося на станции, существует отдельная модельная единица с уникальным идентификатором. Время существования модельной единицы соответствует времени нахождения реального объекта в контуре управления.

Рассмотрим в качестве примера модельную единицу вагона. Она будет содержать следующие данные: уникальный идентификатор модельной единицы, номер вагона, количество осей, операция (выполняемая в настоящий момент времени), место нахождения вагона, наличие неисправности.

Работу с модельными единицами, а также наполнение, хранение, обработку и предоставление пользователям (операторам и смежным системам) данных о работе станции обеспечивает информационная структура системы.

### 2. Информационная структура системы

В основе информационной структуры рассматриваемой системы лежит совокупность наборов баз данных и информационных массивов (рис. 1).

Базы данных предназначены для долговременного хранения информации, предоставления данных смежным системам и пользователям. В системе существуют следующие базы данных: инфраструктурная, вагонная, локомотивная, поездная, архивная (протокольная), аналитическая. Все базы данных строятся на основе отношений с заданной структурой.

#### **Инфраструктурная база данных**

Инфраструктурная база данных (рис. 2) включает в себя набор следующих отношений (таблиц): таблица маршрутов, таблица негабаритности секций, таблица норм времени на операции, таблица характеристик приемоотправочных путей, таблица характеристик путей местного назначения, таблица характеристик подъездных путей, таблица маневровых локомотивов, таблица пункта технического обслуживания, таблица станционного технологического центра.

Таблица маршрутов описывается следующей структурой: «начало маршрута», «окончание маршрута», «положение стрелок по маршруту», «положение охранных стрелок», «категория маршрута», «признак вариантности», «тип тяги». В этой таблице должны быть все маршруты, по которым на станции осуществляются передвижения. Атрибут «категория маршрута» содержит информацию, что маршрут является «поездным» или «маневровым». Атрибут «признак вариантности» указывает, является ли маршрут основным или вариантным. Атрибут «тип тяги» содержит информацию о типе локомотивов, которые могут двигаться по этому маршруту.

Таблица негабаритности содержит перечень негабаритных секций на станции.

Таблица норм времени на операции описывается следующей структурой: «операция», «норма времени на выполнение». В ней должны быть отображены все передвижения, которые могут быть произведены на станции с указанием временных нормативов на их выполнение, все иные операции, связанные с перевозочным процессом и имеющие временной норматив.

Таблица характеристик приемоотправочных путей описывается следующей структурой: «наименование пути», «назначение»,

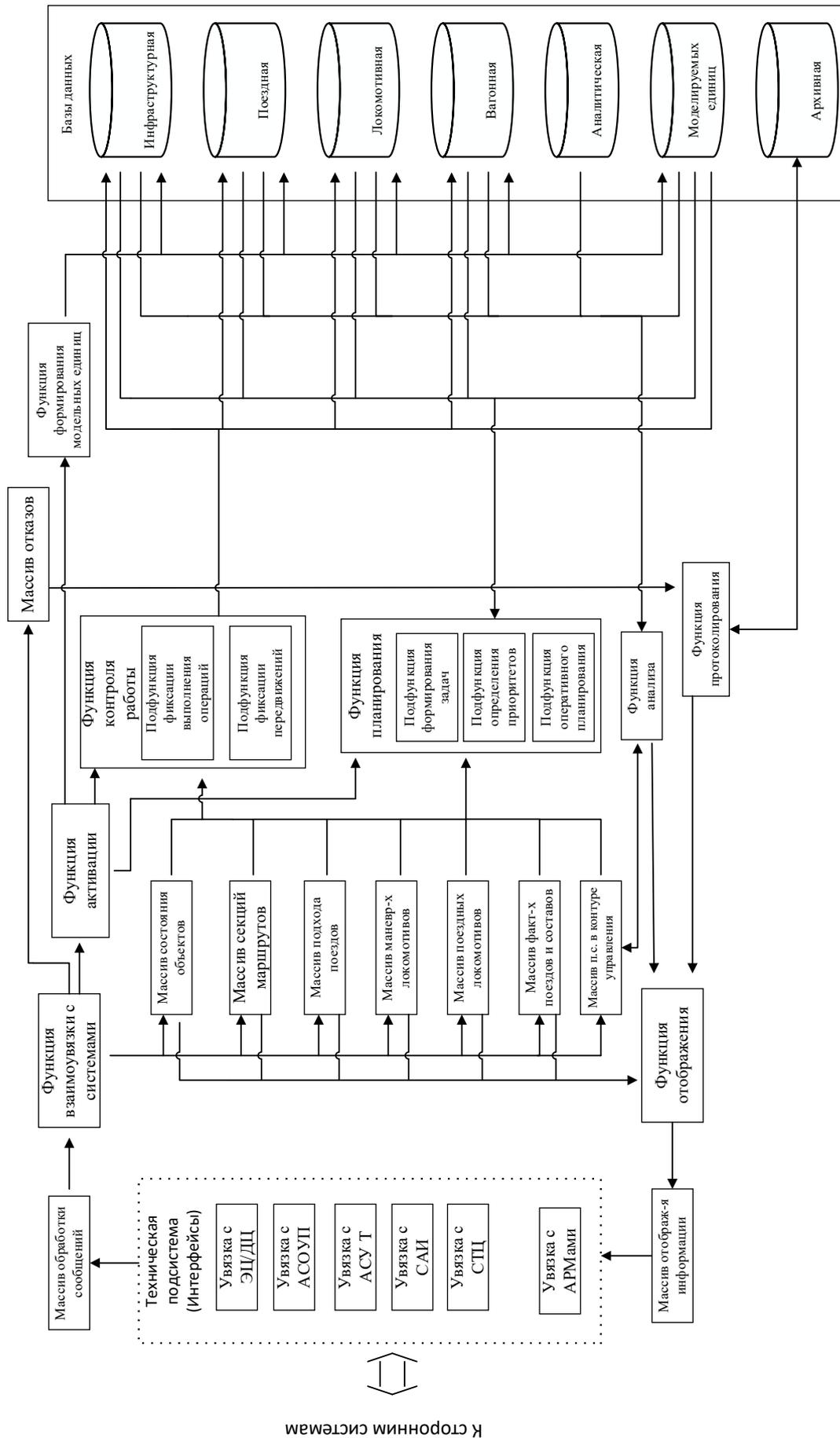


Рис. 1. Информационная структура системы

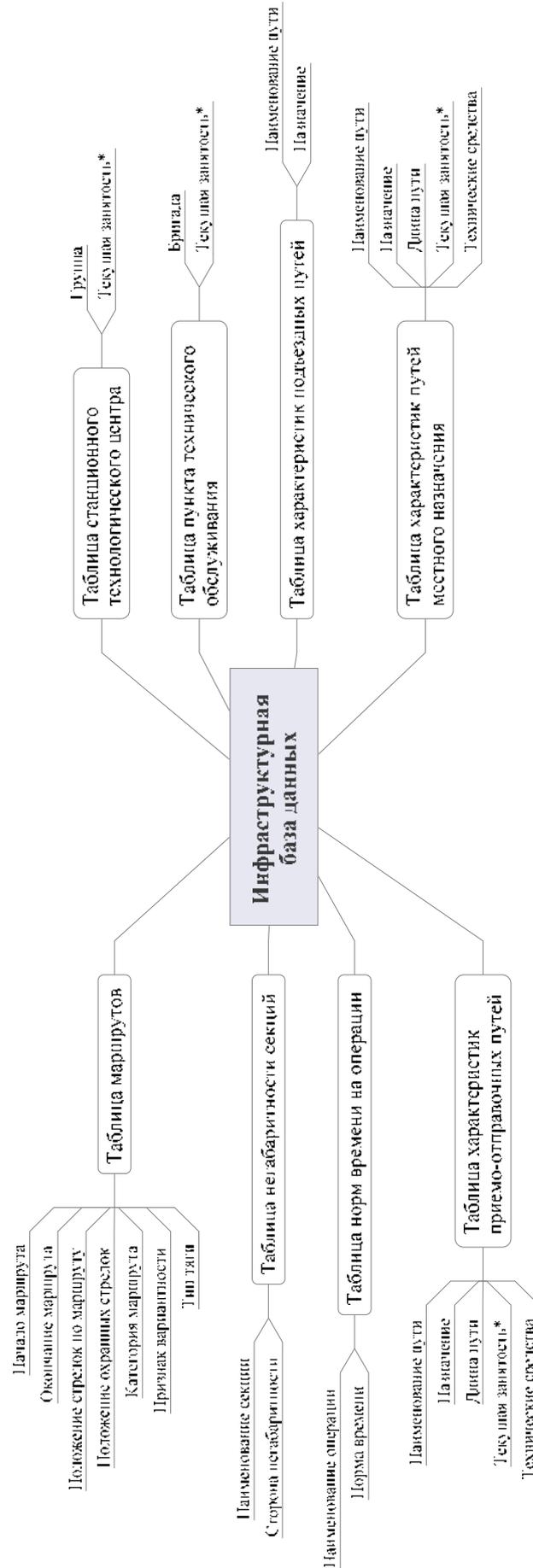


Рис. 2. Схема инфраструктурной базы данных (\* — динамические данные)

«длина пути», «текущая занятость», «технические средства». Атрибут «назначение» содержит информацию об операциях, выполняемых на конкретном пути. Атрибут «текущая занятость» заполняется номерами подвижных единиц, находящихся на пути. Атрибут «технические средства» отображает наличие на пути таких устройств, как: тормозные стационарные упоры, устройства зарядки и опробования тормозов и пр.

Таблица характеристик грузовых путей описывается следующей структурой: «наименование пути», «назначение», «длина пути», «текущая занятость», «технические средства». Атрибут «технические средства» отображает наличие на пути различных погрузочно-разгрузочных приспособлений. Атрибут «текущая занятость» заполняется номерами подвижных единиц, находящихся на пути.

Таблица характеристик подъездных путей описывается структурой: «наименование пути» — «назначение». Атрибут «назначение» содержит информацию о предприятии, к которому подходит путь.

Таблица «Пункт технического обслуживания» описывается структурой: «бригада», «текущая занятость». Атрибут «бригада» содержит обозначение всех бригад ПТО, задействованных в выполнении технологического процесса. Атрибут «текущая занятость» содержит информацию о выполняемой бригадой работе в настоящий момент времени.

Таблица «Станционный технологический центр» описывается структурой: «группа», «текущая занятость». Атрибут «группа» содержит информацию о всех группах работников СТЦ (по прибытию, отправлению, информационных), задействованных в работе станционного центра. Атрибут «текущая занятость» содержит информацию о выполняемых в настоящий момент времени группой операциях.

Описание структур «Пункт технического обслуживания» и «Станционный технологический центр» в настоящей структуре выполнено укрупненно.

Значения атрибутов отношений инфраструктурной базы данных определяются на основе информации, поступающей от смежных автоматизированных систем, среди которых

автоматизированная система управления тяговыми ресурсами (АСУТ), единая корпоративная автоматизированная система управления объектами инфраструктуры (ЕК АСУИ) и др., а также нормативной и технической документации (техническо-распорядительный акт станции, схематический план станции, нормы времени на выполнение маневровых операций и др.).

### *Вагонная база данных*

Вагонная база данных состоит из отношения со следующей структурой: «номер вагона», «количество осей», «станция назначения», «род груза», «негабаритность», «прикрытие», «техническая/коммерческая неисправность», «ремонт», «включенность в поезд», «текущее местоположение», «операция».

Атрибут «род груза» содержит отметки о характере перевозимого груза (взрывчатые материалы, животные). Атрибут «прикрытие» содержит информацию о необходимости прикрытия вагона в составе поезда. Атрибут «техническая/коммерческая неисправность» содержит информацию о выявленных в ходе технического или коммерческого осмотров неисправностях. Атрибут «ремонт» содержит информацию о необходимости проведения ремонта с целью устранения выявленных неисправностей и необходимость отцепки вагона. Атрибут «включенность в поезд» содержит информацию о номере поезда, в состав которого входит конкретный вагон. Атрибут «текущее местоположение» содержит информацию о секции, на которой в настоящий момент времени находится вагон, или о маршруте движения. Атрибут «операция» содержит информацию об операции, выполняемой с вагоном в настоящий момент, например ожидание операции, технический осмотр и пр.

Наполнение вагонной базы данных происходит на основе информации, получаемой из телеграммы-натурного листа, системы автоматической идентификации, системы оперативного управления перевозками (АСОУП), автоматизированных систем управления пунктами технического обслуживания и станционного технологического центра (АСУ ПТО, АСУ СТЦ), системы электрической централизации (ЭЦ), автоматизированного комплекса «ДИСПАРК».

### *Локомотивная база данных*

Локомотивная база данных состоит из отношений со следующей структурой: «номер локомотива», «количество секций», «количество осей», «род тяги», «депо приписки», «ремонт», «плановое время сдачи локомотива», «включенность в поезд», «текущее местоположение», «операция». В отношении вносятся данные о поездных локомотивах, находящихся на станции.

Атрибут «количество осей» содержит информацию о количестве осей для каждой секции. Атрибут «род тяги» содержит информацию о тяги локомотива. Атрибут «плановое время сдачи локомотива» содержит информацию о планируемом времени сдачи локомотива бригадой. Атрибут «включенность в поезд» содержит информацию о номере поезда, в состав которого входит конкретный локомотив. Атрибут «текущее местоположение» содержит информацию о секции, на которой в настоящий момент времени находится локомотив, или о маршруте движения. Атрибут «операция» содержит информацию об операции, выполняемой с локомотивом в настоящий момент, например отцепка или прицепка локомотива к составу, проба тормозов и пр.

Наполнение локомотивной базы данных происходит на основе информации, получаемой из телеграммы-натурного листа, системы автоматической идентификации, АСОУП, АСУ ПТО, АСУ Т, ЭЦ.

### *Поездная база данных*

Поездная база данных состоит из отношений со следующей структурой: «номер поезда», «время прибытия», «время отправления», «категория», «путь приема», «путь отправления», «операция», «назначение», «состав», «примечания», «неисправность», «необходимость отцепки», «род тяги», «пассажирский/грузовой». Атрибут «категория» содержит информацию о том, какой поезд — транзитный, своего формирования, своего расформирования, транзитный с изменением массы/длины. Атрибут «операция» содержит информацию об операции, выполняемой с поездом в настоящий момент (например, ожидание операции, техническое обслуживание, проба тормозов, перестановка состава, прицепка локомотива).

Атрибут «назначение» содержит информацию о станции назначения поезда. Атрибут «состав» содержит номера вагонов, входящих в состав поезда. Атрибут «примечания» содержит информацию о дополнительных отметках (взрывчатые материалы, живность, прочее). Атрибут «неисправность» содержит информацию о выявленных технических и коммерческих неисправностях вагонов. Атрибут «необходимость отцепки» содержит информацию о необходимости отцепки отдельных вагонов из состава. Атрибут «род тяги» содержит информацию о роде тяги локомотива в составе.

Наполнение поездной базы данных происходит на основе информации, получаемой из телеграммы-натурного листа, системы автоматической идентификации, АСОУП, АСУ ПТО, АСУ СТЦ, АСУ Т, систем диспетчерской и ЭЦ.

### *База модельных единиц*

Предназначена для хранения задействованных в работе системы модельных единиц в настоящий момент времени. При выходе подвижного состава из контура управления происходит удаление соответствующего кортежа. В отличие от записей в локомотивной, вагонной и поездной базах данных, не содержит информацию о прошлом состоянии подвижного состава.

### *Архивная база данных*

Целью создания протокольной базы данных является предоставление информации о работе станции и технических средств в прошлом. Пользователями архивной базы данных являются: оперативный персонал станции и диспетчерский персонал дороги, а также сервисный персонал системы.

Для предоставления информации оперативному персоналу станции и диспетчерскому персоналу дороги с целью анализа показателей работы станции, в протокольной базе данных хранится состояние всех баз данных, сохраненное с периодичностью 30 сек. за последний месяц работы.

База данных для технического персонала представляет собой журнал событий, в котором хранится информация о взаимодействии компонентов системы между собой и со смежными системами.

### *Аналитическая база данных*

Предназначена для обеспечения пользователям системы возможности анализировать работу станции на основе значений статистических показателей, характеризующих работу станции.

### *Прикладное программное обеспечение и информационные массивы*

Прикладное программное обеспечение предназначено для организации работы системы. Позволяет получить поступающую через технические интерфейсы от смежных систем информацию, обработать и занести ее в базы данных, выработать и передать в смежные системы управляющие воздействия, предоставить данные пользователям. Работа прикладного программного обеспечения реализуется набором функций и массивов, среди которых можно выделить следующие:

**Функция формирования модельных единиц** предназначена для создания модельных единиц и соотнесения информации, находящейся в базах данных и поступающей от смежных систем. На выходе функции появляются модельные единицы вагонов, маневровых и поездных локомотивов, специального подвижного состава, поездов, соответствующие подвижным единицам, находящимся на станции. Вносит созданные единицы в соответствующие базы данных и массивы.

**Функция контроля работы** предназначена для контроля и фиксации в базах данных информации о выполнении операций в ходе технологического процесса. Включает в себя подфункции контроля выполнения операций и фиксации передвижений. Обеспечивает фиксацию состояния элементов путевого развития, маневровых и поездных передвижений по станции и на подходах к ней (включая подъездные пути), подачу и уборку вагонов с грузовых фронтов, выход оперативного персонала для работы с подвижным составом (технический и коммерческий осмотры), фиксацию начала и окончания иных технологических операций. Обработанную информацию вносит в локомотивную, поездную, вагонную и инфраструктурную базы системы.

**Функция планирования** предназначена для формирования плана работы станции. Включает в себя подфункции формирования задач,

определения приоритетов, оперативного планирования. Обеспечивает определение ожидаемых моментов начала и окончания технологических операций, последовательности и места проведения операций, требуемых ресурсов, расстановку приоритетов при разрешении конфликтов между задачами, построение графика работы на два часа, формирование управляющих воздействий, передаваемых в смежные системы (необходимость установки маршрутов системой ЭЦ).

**Функция взаимоувязки с системами** предназначена для обработки сообщений, передаваемых между цифровой системой оперативного управления и смежными системами управления, задействованными в работе станции.

**Функция активации** предназначена для определения моментов времени и последовательности запускаемых программ в ходе работы системы.

**Функция анализа** обеспечивает предоставление оперативному персоналу и системе средств и методов изучения текущей ситуации и облегчает выявление рисков, возникающих в процессе работы.

**Функция отображения информации** предназначена для организации графического представления хранимой в системе информации в виде, удобном конечному пользователю. Обеспечивает индивидуальное или коллективное отображение информации, визуализацию данных в форме, усиливающей восприятие и облегчающей анализ информации.

**Функция протоколирования** предназначена для сохранения отчетов как о состоянии системы, так и о работе станции в архивной базе данных. Обеспечивает фиксацию результатов принятых решений, переданных команд, запросов и полученных ответов, возможности анализа развития ситуации до текущего состояния, расследования сбоев, поиска неисправностей. Собранная информация может быть полезна при выявлении точек возможной модернизации.

Информационные массивы предназначены для хранения данных, задействованных при вычислении функций. Массивы инициализируются в момент необходимости выполнения конкретных программ. Для обеспечения работы программ существуют следующие

массивы: массив состояния объектов, массив секций маршрутов, массив подхода поездов, массив маневровых локомотивов, массив поездных локомотивов, массив фактических поездов и составов, массив моделируемых единиц, массив подвижного состава в контуре управления, массив обработки сообщений, массив отображения информации, массив отказов. Рассмотрим их подробнее.

**Массив состояния объектов.** Предназначен для хранения состояния объектов путевого развития станции. Структура отношения содержит следующие атрибуты: наименование элемента, состояние (свободность, замкнутость, занятость, количество осей на секции). Информация поступает от системы ЭЦ.

**Массив секций маршрутов.** Предназначен для хранения набора секций, входящих в конкретный маршрут, фиксации состояния этих секций.

**Массив подхода поездов.** Предназначен для хранения информации о поездах, подходящих к станции. Для каждого пути подхода организуется отдельный массив, кортежи которого заполняются на основе данных от систем диспетчерской централизации и ГИД-Урал, АСОУП и телеграммы-натурного листа. Обработка данных кортежей для каждого поезда строится по принципу FIFO (First input — first output).

**Массив маневровых локомотивов.** Предназначен для хранения информации о маневровых локомотивах, работающих на станции. В него поступает информация от АСУ депо (АСУ Т) о характеристиках локомотива. Отношение описывается структурой: номер локомотива, количество осей, плановое время работы, техническое состояние. Имеет атрибут «Предварительные данные», который выставляется после получения информации от АСУ депо (АСУ Т) и до момента подтверждения оператором соответствия данных о локомотиве фактическому локомотиву. Является источником данных для формирования модельной единицы, соответствующей конкретному маневровому локомотиву.

**Массив поездных локомотивов.** Предназначен для хранения информации о поездных локомотивах (в составе поездов и отдельно), находящихся на станции. В него поступает

информация от АСУ Т и АСОУП. Отношение можно описать следующей структурой: номер локомотива, количество секций, количество осей, род тяги. В случае необходимости отцепки или прицепки поездного локомотива служит источником данных для формирования модельной единицы соответствующего локомотива.

**Массив фактических поездов и составов.** Предназначен для хранения информации о поездах и составах, фактически расположенных в зоне управления. Информация в массив поступает от систем управления диспетчерского уровня и позволяет реализовать функции контроля работы и планирования.

**Массив моделируемых единиц.** Предназначен для хранения всех модельных единиц, которые в настоящее время действуют в системе.

**Массив подвижного состава в контуре управления.** Предназначен для фиксации модельных единиц локомотивов и вагонов, временно вышедших за пределы станции для выполнения технологических операций. К ним относятся толкачи, маневровые локомотивы, передающие состав вагонов на предприятия. Если отсутствует увязка с системами управления работой железнодорожного транспорта предприятий, то хранятся модельные единицы вагонов.

**Массив отказов.** Предназначен для фиксации отказов в работе устройств, выявленных в ходе эксплуатационной работы.

**Массив обработки сообщений.** Предназначен для получения сообщений от смежных систем через технические интерфейсы и передачи их в функцию взаимоувязки с системами.

**Массив отображения информации.** Предназначен для хранения данных и управляющих воздействий, передаваемых в смежные системы после выполнения функции отображения.

### 3. Алгоритмы работы с модельными единицами

Работу информационной структуры рассмотрим с помощью алгоритмов фиксации передвижений и формирования отдельных модельных единиц (рис. 3.1, 3.2, 4) для примерной станции, оборудованной системой ЭЦ. Для повышения детализации представляемой информации о передвижениях система централизации дополнена счетчиками осей [13–16].



Рис. 3.1. Алгоритм контроля передвижений (начало)

Разбиение горловины на секции произведено по принципам, изложенным в работе [17]. Система ЭЦ, оборудованная счетчиками осей, обеспечивает: подготовку трассы маршрута, фиксацию вступления на маршрут и движения по нему колесных пар, определение направления движения, перекрытие сигнала и размыкание секций, контроль за соблюдением условий безопасности движения поездов и остальные функции, возлагаемые на устройства железнодорожной автоматики. На входе на станцию установлены пункты системы видеоидентификации подвижного состава.

Представленный выше алгоритм фиксации передвижений обеспечивает контроль проследования поезда по маршруту приема, получение данных о состоянии стрелочно-путевых секций, увязку передвижений прибывающего поезда с его номером в графике движения, автоматическую фиксацию прибытия поезда в полном составе на приемоотправочный путь, освобождение секций для новых маршрутов.

На вход алгоритма поступает информация от массивов состояния объектов о замкнутости и занятости стрелочно-путевых секций и данные от массива подхода поездов с номером прибывающего поезда.

По результатам выполнения алгоритма в базы данных поступает информация о состоянии стрелочно-путевых секций и приемоотправочных путей, местоположении поезда с № согласно графику движения. В случае фиксации нарушения порядка размыкания маршрута алгоритм передает информацию в массив отказов.

Работу алгоритма проиллюстрируем маршрутом приема на приемоотправочный путь.

Алгоритм начинает свою работу после установки маршрута и открытия входного сигнала. Полученное сообщение от ЭЦ попадает в массив обработки сообщений (рис. 1) и анализируется функцией взаимоувязки с системами (рис. 3.1, блоки 2–4). Она инициализирует массив секций маршрута и заносит в него состояние секций, полученное от системы ЭЦ (рис. 3.1, блоки 5–6). Параллельно с этим функция взаимоувязки активирует функцию инициализации, которая запускает функцию контроля работы (рис. 3.1, блоки 7–8). Последняя запрашивает из массива

подхода поездов данные о прибывающем поезде (рис. 3.1, блок 9). Полученная информация вносится в поездную и инфраструктурную базы данных (рис. 3.1, блок 10), после чего функция контроля работы переходит в режим ожидания поезда (рис. 3.1, блок 11).

Сообщения о вступлении поезда на трассу маршрута и о следовании по секциям обрабатываются функцией взаимоувязки, которая вносит полученные данные в массив секций маршрута (рис. 3.1–3.2, блоки 12–15). После размыкания маршрута и получения соответствующего сообщения от системы ЭЦ (рис. 3.2, блок 16) происходит фиксация прибытия поезда (рис. 3.2, блок 19). В случае нарушения алгоритмов ЭЦ, обеспечивающих фиксацию проследования поезда по трассе и ее размыкание, программа фиксации работы ожидает получение сигнала подтверждения прибытия поезда, формируемого дежурным по станции (ДСП) с помощью автоматизированного рабочего места (АРМ) (рис. 3.2, блоки 17–18). Получение указанного сигнала соответствует фиксации прибытия поезда на станцию (рис. 3.2, блок 19).

После этого происходит занесение данных в поездную, инфраструктурную, локомотивную и вагонные базы данных, активация функции инициализации для дальнейшей работы, в частности для формирования модельных единиц, и удаление массива секций маршрута, записи о поезде из массива подхода и изменение данных в массиве объектов (рис. 3.2, блоки 20–22). На этом работа алгоритма заканчивается.

Теперь рассмотрим алгоритм привязки передвижений к модельным единицам конкретных подвижных единиц. Его реализация позволит соотнести данные о местоположении подвижного состава, полученные по результатам выполнения предыдущего алгоритма, с формированием конкретных модельных единиц.

Локомотивы, оказавшиеся на станции (в данном случае рассматриваются и магистральные, и маневровые), относятся к конкретному депо, имеющему свою автоматизированную систему управления и конечное множество таких локомотивов. Рассмотрим алгоритм формирования модельных единиц для одиночных локомотивов (рис. 4). В этом случае для привязки количества осей к модельной единице локомотива в



Рис. 3.2. Алгоритм контроля передвижений (окончание)

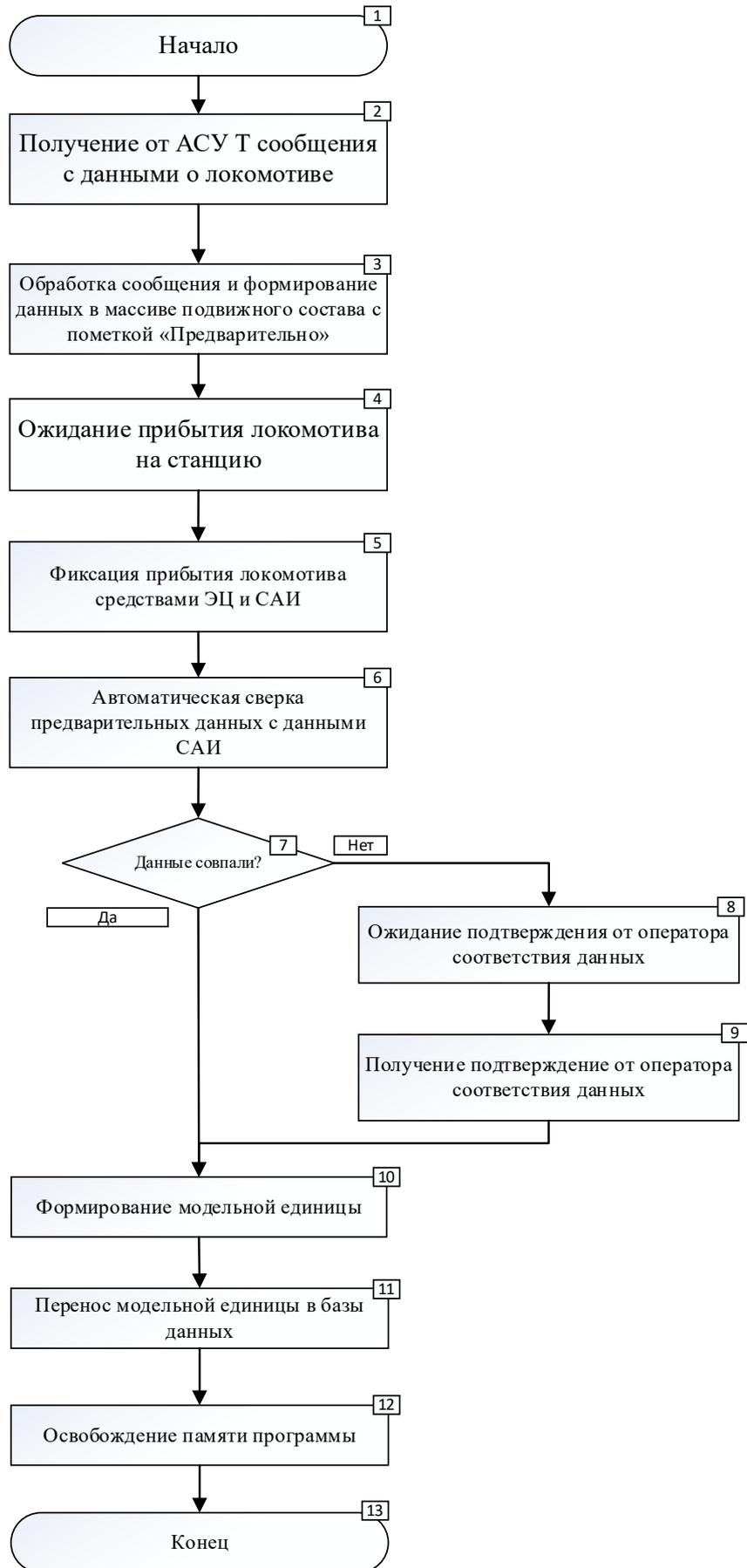


Рис. 4. Алгоритм формирования модельной единицы локомотива

системе необходима увязка с АСУ Т (АСУ депо). От АСУ Т в систему поступает следующая информация (рис. 4, блок 2): № локомотива, количество осей, тип локомотива (маневровый или поездной).

Рассмотрим порядок работы с локомотивами в части формирования их модельных единиц. Данные о локомотиве поступают через функцию взаимоувязки в массив подвижного состава с пометкой «Предварительно». Получение сообщения о планируемом прибытии локомотива на станцию запускает функцию инициализации, которая, в свою очередь, активирует функции контроля работы и формирования модельных единиц. После чего функция контроля работы переходит в режим ожидания до момента прибытия локомотива.

Прибытие локомотива на станцию фиксируется системой ЭЦ и средствами системы автоматической идентификации. Соответствующие сообщения передаются через интерфейс в массив обработки сообщений, где их воспринимает функция взаимоувязки (рис. 4, блок 5). Данные, полученные от системы автоматической идентификации (САИ), сравниваются с «предварительными» данными, полученными от АСУ Т и хранящимися в массиве подвижного состава (рис. 4, блок 6). Если данные не совпали, система ожидает получения подтверждения от оператора о прибытии локомотива на станцию (рис. 4, блоки 8–9). После получения такого подтверждения производится формирование модельной единицы, соответствующей локомотиву, и занесение ее в базы данных (рис. 4, блоки 10–11), откуда она переносится в массив поездных или маневровых локомотивов. Если данные совпали, то ожидание подтверждения от оператора не требуется. После этого производится завершение алгоритма и освобождение памяти (рис. 4, блок 12).

Удаление модельной единицы производится в случае отправления локомотива со станции на перегон или в депо. В случае отправления на подъездной путь удаления не происходит, в случае отправления в особом порядке (например, толкач) удаления не происходит.

Алгоритм работы с поездными локомотивами формирования депо, находящегося на станции, при выдаче локомотива под состав

аналогичен алгоритму работы с маневровыми локомотивами, но при этом задействован массив поездных локомотивов.

Порядок работы с поездными локомотивами, относящимися к депо другой станции, несколько иной. В этом случае получение данных о количестве осей производится в момент получения данных о составе поезда и может производиться как через АСУ депо, так и через АСОУП. Формирование модельной единицы поездного локомотива в случае обработки транзитного поезда с изменением массы или длины происходит одновременно с формированием модельных единиц вагонов.

При работе с транзитным поездом формирование отдельных модельных единиц локомотива и вагонов не производится, а формируется общая модельная единица поезда.

Далее рассмотрим формирование вагонных модельных единиц. В отличие от локомотивов, на станции в произвольный момент времени могут появиться любые вагоны, допущенные к передвижению по железнодорожной сети. Все они должны быть отражены в модели работы станции.

Рассмотрим несколько возможных ситуаций появления вагонов на станции и соответствующих им алгоритмов обработки этой информации:

- прибытие поезда с перегона на свободный путь;
- подача вагонов с подъездного пути на свободный путь;
- подача вагонов с подъездного пути на занятый путь.

В случае прибытия поезда на свободный путь, после фиксации прибытия поезда (рис. 3), функция инициализации активирует функцию формирования модельных единиц. Последняя на основе данных, содержащихся в поездной базе данных и массиве подвижного состава (рис. 1), заполняет базу модельных единиц.

Во втором случае работа системы аналогична приему поезда на свободный путь, но данные о составе поступают не от систем диспетчерского уровня, а от АСУ транспортного цеха предприятия.

В случае подачи вагонов с подъездного пути предприятия на занятый путь станции

информация о вагонах также передается от АСУ предприятия. На входе на станцию либо стоит система видеоидентификации, либо просто входной счетчик. В случае САИ решение задачи по привязке осей и передаче данных для формирования модельной единицы возлагается на нее. В случае работы входного счетчика на входе происходит считывание осей. Оператор вводит признак местоположения локомотива в составе (толкает или тянет). После чего в программе формируется массив с длиной, равной количеству вагонов в составе. Согласно номеру вагона и на основе системы нумерации вагонов устанавливается ожидаемое количество осей для каждой модельной единицы. Далее производится фиксация пройденных осей и отсечка их в данных. Если в результате этого процесса оставшееся количество осей не равно нулю, выдается сообщение об ошибке ввода. ▲

### Заключение

1. Проведен анализ современного состояния процесса цифровизации оперативного управления работой станции. Рассмотрены существующие подходы к построению АСУ станцией. Сделан вывод о необходимости повышения уровня автоматизации за счет интеграции разрозненных систем в единое техническое решение.

2. Дано описание информационной структуры, обеспечивающей цифровизацию получения, передачи и обработки данных в цифровой системе оперативного управления работой станции.

3. Дано описание технической структуры и требуемых увязок со смежными АСУ, обеспечивающими цифровизацию процессов получения, передачи и обработки информации в цифровой системе оперативного управления.

4. Приведен пример алгоритма контроля передвижений счетчиками осей при их расстановке методом, изложенным в [16]. Приведены алгоритмы формирования модельных единиц.

5. В ходе дальнейших исследований требуется рассмотреть алгоритмы формирования модельных единиц специального подвижного состава, алгоритмы распознавания ситуаций и построения планов работы, организации прикладного программного обеспечения, информационной безопасности.

### Библиографический список

1. Bitzer F. Quo vadis Digitale Leit- und Sicherungstechnik? / F. Bitzer, V. Blateau, C. Lammerskitten et al. // *Eisenbahningenieur*. — 2021. — Vol. 11. — Pp. 6–11.
2. Розенберг Е. Н. Цифровая экономика и цифровая железная дорога / Е. Н. Розенберг, В. И. Уманский, Ю. В. Дзюба // *Транспорт Российской Федерации*. — 2017. — № 5(72). — С. 45–49.
3. Никитин А. Б. Автоматизация оперативного управления на станциях диспетчерского управления / А. Б. Никитин // *Конструирование, сертификация и техническая диагностика устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики: сб. науч. трудов ПГУПС*. — СПб.: ПГУПС, 2003. — С. 99–106.
4. Корниенко А. А. Интеллектуальные компьютерные системы оперативного управления движением поездов на станциях / А. А. Корниенко, А. Б. Никитин, А. Д. Хомоненко // *Изв. ПГУПС*. — 2012. — № 2(31). — С. 116–119.
5. Гапанович В. А. Системы автоматизации и информационные технологии управления перевозками на железных дорогах: учебник для вузов ж.-д. транспорта / В. А. Гапанович, А. А. Грачев и др.; под ред. В. И. Ковалева, А. Т. Осминина, Г. М. Грошева. — М.: Маршрут, 2006. — 544 с.
6. Матюхин В. Г. О текущем состоянии проекта ИСУЖТ и реализации технологии интервального регулирования на его платформе / В. Г. Матюхин, В. И. Уманский, А. Б. Шабунин // *Сборник трудов восьмой научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» (ИСУЖТ-2019, Москва, 21 ноября 2019 г.)*. — М.: Изд-во ОАО «НИИАС», 2019. — С. 3–7.
7. Никитин А. Б. Комплексная автоматизированная система диспетчерского управления работой Екатеринбургского метрополитена / А. Б. Никитин, Д. В. Углев // *Современные технологии автоматизации*. — 2016. — № 4. — С. 64–68.
8. Behrens M. Auf dem Weg zum Digitalen Knoten Stuttgart: ein Überblick / M. Behrens, E. Eckardt, M. Kummling et al. // *Eisenbahningenieur*. — 2020. — Vol. 4. — Pp. 14–18.
9. Floter C. Innovative cooperation for the vehicle equipment at Stuttgart Digital Node / C. Floter, F. Raichle, T. Hohne et al. // *Signal + Draht*. — 2022. — Vol. 9. — Pp. 42–51.
10. Steffens S. SIL4 Data Center — a new platform architecture for safety-relevant railway applications / S. Steffens, T. Suess, F. Eschmann et al. // *Signalling + Datacommunication*. — 2021. — Vol. 10. — Pp. 41–48.
11. Bojic M. ETCS in large stations using the example of Stuttgart Central Station / M. Bojic, H. El-Hajj-Sleiman, M. Flieger et al. // *Signal + Draht*. — 2021. — Vol. 04. — Pp. 21–29.
12. Harmsen F. Was, wo, wann, warum? — Die automatisierte Erfassung von Bahninfrastruktur / F. Harmsen, P. Hintze, J. Elstner // *Signal + Draht*. — 2019. — Vol. 12. — Pp. 51–61.
13. Theeg G. Railway Signalling and Interlocking. International Compendium. 3<sup>rd</sup> edition / G. Theeg, S. Vlasenko, E. Anders et al. — Germany, Leverkusen: PMC Media House GmbH Publ., 2020 — 553 p.
14. Harmsen F. Was, wo, wann, warum? — Die automatisierte Erfassung von Bahninfrastruktur / F. Harmsen, P. Hintze, J. Elstner // *Signal + Draht*. — 2019. — Vol. 12. — Pp. 51–61.
15. Grzechca D. Comparison of Filtering Methods for Enhanced Reliability of a Train Axle Counter System / D. Grzechca,

A. Szczeponek // *Sensors*. — 2020. — № 20.10. — P. 2754. — DOI: 10.3390/s20102754.

16. Порошков В. С. Применение счетчиков осей в интервальном регулировании движения поездов / В. С. Порошков // Проблемы внедрения результатов инновационных разработок: сборник статей по итогам Международной науч-

но-практической конференции. — Уфа: ООО «Агентство международных исследований», 2019. — С. 100–103.

17. Groshov V. A. Ob opredelenii mest ustanovki schetchikov osей в горловинах станций / В. А. Groshov // *Автоматика на транспорте*. — 2022. — № 2(8). — С. 162–177. — DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-02-162-177.

*TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH*, 2023, Vol. 9, No. 2, pp. 162–177  
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-162-177

## Organizing Information Structure for a Digital Station Control System

### Information about author

**Groshev V. A.**, Engineer of the Department. E-mail: vas.groshev@mail.ru

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

**Abstract:** The article is devoted to the study of control systems for the operation of railway station, driven by the trend in the industry towards the development and implementation of digital control systems that increase the functionality of the technological means used. The analysis of automated control systems used on railways and in the metro is carried out, their advantages and disadvantages are described. It is shown that it is necessary to build a digital system of operational control of the station, which provides automation of such intellectual functions as planning operations, forming tasks and monitoring their implementation by responsible departments. In the presented work, the synthesis of the information structure of such a system is carried out, providing the receipt, transmission and processing of data, the source of which is currently operated automated railway transport systems for various purposes. The gates of the structure (databases, information arrays) are defined, their description is given, connections between them are built, implemented functions are described. The concept of a model unit as a data package describing the information stored in the system for each element of the technological process of the station is formulated. Examples of algorithms for the functioning of the described structure in terms of movement control and the formation of model units of rolling stock located in the control loop of the system are given. Possible directions for further research are formulated.

**Keywords:** digital control system; digital railway station; automated control systems; integration of control systems; digitalization of operational management.

### References

- Bitzer F., Blateau V., Lammerskitten C. et al. Quo vadis Digitale Leit- und Sicherungstechnik? *Eisenbahningenieur*, 2021, vol. 11, pp. 6–11.
- Rozenberg E. N., Umanskiy V. I., Dzyuba Yu. V. Tsifrovaya ekonomika i tsifrovaya zheleznaya doroga [Digital economy and digital railway]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2017, Iss. 5(72), pp. 45–49. (In Russian)
- Nikitin A. B. *Avtomatizatsiya operativnogo upravleniya na stantsiyakh dispetcherskogo upravleniya. Konstruirovaniye, sertifikatsiya i tekhnicheskaya diagnostika ustroystv i sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: sb. nauch. trudov PGUPS* [Operational control automation at dispatch control stations. Design, certification and technical diagnostics of devices and systems of railway automation and telemechanics: Sat. scientific Proceedings of PGUPS]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2003, pp. 99–106. (In Russian)
- Kornienko A. A., Nikitin A. B., Khomonenko A. D. Intellektual'nye komp'yuternye sistemy operativnogo upravleniya dvizheniem poezdov na stantsiyakh [Intelligent computer systems for operational control of train traffic at stations]. *Izv. PGUPS* [Proceedings of Emperor Alexander I Petersburg State Transport University]. 2012, Iss. 2(31), pp. 116–119. (In Russian)
- Gapanovich V. A., Grachev A. A. et al. *Sistemy avtomatizatsii i informatsionnye tekhnologii upravleniya perezovkami na zheleznnykh dorogakh: uchebnik dlya vuzov zh.-d. transporta* [Automation systems and information technologies for managing transportation on railways: a textbook for high schools railway transport]. Moscow: Marshrut Publ., 2006, 544 p. (In Russian)
- Matyukhin V. G., Umanskiy V. I., Shabunin A. B. *O tekushchem sostoyanii proekta ISUZhT i realizatsii tekhnologii interval'nogo regulirovaniya na ego platforme. Sbornik trudov vos'moy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Intellektual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte" (ISUZhT-2019, Moskva, 21 noyabrya 2019 g.)* [On the current state of the ISUZhT project and the implementation of interval control technology on its platform. Proceedings of the eighth scientific and technical conference "Intelligent systems management in railway transport" (ISUZhT-2019, Moscow, November 21, 2019)]. Moscow: OAO "NIAS" Publ., 2019, pp. 3–7. (In Russian)
- Nikitin A. B., Uglev D. V. *Kompleksnaya avtomatizirovannaya sistema dispetcherskogo upravleniya rabotoy Ekaterinburgskogo metropolitena* [Complex automated system of dispatch control of the work of the Yekaterinburg metro]. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii* [Modern technologies of automation]. 2016, Iss. 4, pp. 64–68. (In Russian)
- Behrens M., Eckardt E., Kummeling M. et al. Auf dem Weg zum Digitalen Knoten Stuttgart: ein Überblick. *Eisenbahningenieur*, 2020, vol. 4, pp. 14–18.
- Floter C., Raichle F., Hohne T. et al. Innovative cooperation for the vehicle equipment at Stuttgart Digital Node. *Signal + Draht*, 2022, vol. 9, pp. 42–51.
- Steffens S., Suess T., Eschmann F. et al. SIL4 Data Center — a new platform architecture for safety-relevant railway applications. *Signalling + Datacommunication*, 2021, vol. 10, pp. 41–48.
- Bojic M., El-Hajj-Sleiman H., Flieger M. et al. ETCS in large stations using the example of Stuttgart Central Station. *Signal + Draht*, 2021, vol. 04, pp. 21–29.
- Harmsen F., Hintze P., Elstner J. Was, wo, wann, warum? — Die automatisierte Erfassung von Bahninfrastruktur. *Signal + Draht*, 2019, vol. 12, pp. 51–61.
- Theeg G., Vlasenko S., Anders E. et al. *Railway Signalling and Interlocking. International Compendium. 3rd edition. Germany, Leverkusen: PMC Media House GmbH Publ., 2020, 553 p.*
- Harmsen F., Hintze P., Elstner J. Was, wo, wann, warum? — Die automatisierte Erfassung von Bahninfrastruktur. *Signal + Draht*, 2019, vol. 12, pp. 51–61.
- Grzechca D., Szczeponek A. Comparison of Filtering Methods for Enhanced Reliability of a Train Axle Counter System. *Sensors*, 2020, Iss. 20.10, p. 2754. DOI: 10.3390/s20102754.
- Poroshkov V. S. *Primeneniye schetchikov osej v interval'nom regulirovanii dvizheniya poezdov. Problemy vnedreniya rezul'tatov innovatsionnykh razrabotok: sbornik statey po itogam Mezhdunaronyy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [The use of axle counters in the interval control of train traffic. Problems of implementing the results of innovative developments: a collection of articles based on the results of the International Scientific and Practical Conference]. Ufa: 000 "Agentstvo mezhdunarodnykh issledovaniy" Publ., 2019. pp. 100–103. (In Russian)
- Groshev V. A. Ob opredelenii mest ustanovki schetchikov osej v gorlovinakh stantsiy [On determining the installation locations of axle counters in the necks of stations]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2022, Iss. 2(8), pp. 162–177. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-02-162-177. (In Russian)

# РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГОРОДСКИМИ РЕЛЬСОВЫМИ ТРАНСПОРТНЫМИ СИСТЕМАМИ

**СИДОРЕНКО Валентина Геннадьевна**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры;  
e-mail: valenfalk@mail.ru

**ЛОГИНОВА Людмила Николаевна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: ludmilanv@mail.ru

**САФРОНОВ Антон Игоревич**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: safronov-ai@mail.ru

Российский университет транспорта (МИИТ), кафедра «Управление и защита информации», Москва

В статье рассмотрены обобщенные подходы, применяемые к проектированию информационного обеспечения интеллектуальных транспортных систем на примере тренажера поездного диспетчера и автоматизированной системы построения плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена как взаимосвязанных систем в рамках единого технологического процесса организации движения подвижного состава по линиям Московского метрополитена, Московскому центральному кольцу, Московским центральным диаметрам, а также трамвайной сети города Москвы. Проведен анализ существующих систем, разработанных коллективом сотрудников кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта (МИИТ) для государственного унитарного предприятия «Московский метрополитен», составной частью которых являются информационные системы. Определены общие для информационного обеспечения свойства систем, и предложена классификация таблиц, служащих основой для реализации систем управления городскими рельсовыми транспортными средствами. Перечислены свойства, которыми обязательно должно обладать проектируемое информационное обеспечение интеллектуальной транспортной системы, предложена методика его построения. В работе приведены структуры и функциональные особенности информационных систем, используемых для построения интеллектуальной системы управления транспортными системами, показано содержимое баз данных, которые выполняют связующую роль между верхним интерфейсным и нижним техническим уровнями, обоснован выбор системы управления базами данных.

**Ключевые слова:** информационное обеспечение; база данных; системы управления базами данных; транспортные системы; автоматизация; проверка знаний; тренажер; сбойные ситуации; перевозочный процесс; моделирование движения поездов.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-178-192

## ▼ Введение

Современное общество диктует новые условия для развития отраслей экономики Российской Федерации. Наблюдается тенденция поиска новых производителей и поставщиков, ускорение планов собственных разработок отечественных IT-компаний, превращение малых внутренних продуктов в массовые [1]. От этого зависит успех реализуемой политикой импортозамещения в условиях изоляции Российской Федерации со стороны большинства стран Западной Европы [2, 3].

Повышению эффективности проведения политики импортозамещения способствуют логистически верно составленные транспортные маршруты. В настоящее время на территории Российской Федерации сложилась одна из самых крупных и сложных транспортных

схем, реализующая многоплановые связи на основе сформированных путей сообщения и налаженной работы службы перевозок [4].

Транспортная система Российской Федерации является важным связующим звеном экономической, социальной, культурной жизни страны и постоянно находится под воздействием всего спектра государственных проблем, одной из которых является безопасность движения транспортных средств [5–7], и самой организации транспортной деятельности [4].

В современных мегаполисах комплекс мер по:

- повышению использования пропускной способности,
- увеличению провозной способности городских рельсовых транспортных систем (ГРТС), в частности на

метрополитене [8, 9], скоростном трамвае [10, 11], пригородных и пригородно-городских электропоездах [12–14],

- совершенствованию систем обеспечения безопасности движения должен реализовываться интеллектуальными системами, предназначенными для автоматического управления движением транспортных средств [15].

В настоящее время управлением ГРТС с целью обеспечения перевозочного процесса занимается оперативный персонал ГРТС [16–18]. Квалификация оперативного персонала предполагает наличие определенного уровня подготовки для выполнения служебных обязанностей. В основе высокого уровня квалификации лежат знания, опыт работы и профессиональные навыки работника ГРТС [19]. В настоящее время накоплен значительный опыт по обучению, повышению квалификации и проверке знаний оперативного персонала в Российской Федерации [17, 18, 20] и за рубежом [21–25].

Коллективом сотрудников кафедры «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ) разрабатывались, внедрялись, эксплуатировались и сопровождалась на ГУП «Московский метрополитен» [26]:

- автоматизированная система энергооптимальных тяговых расчетов, применяемая с 1998 года [27–29];
- тренажер поездного диспетчера линии метрополитена, сданный в эксплуатацию в 1999 году [17, 18, 20];
- автоматизированная система построения плановых графиков движения (ПГД) пассажирских поездов, находящаяся в эксплуатации с 2003 года [30, 31] с интегрированными в нее:
  - подсистемой построения графиков оборота электроподвижного состава (ГО ЭПС) [32, 33];
  - подсистемой построения графиков исполненного движения (ГИД) пассажирских поездов метрополитена [34], для нормальной работы которой по сигналам телеуправления подключались:
    - имитационная модель движения поездов по линии метрополитена [34];

- пульт-табло поездного диспетчера для сборки маршрутов, управления стрелками и сигналами линии метрополитена [34];

- автоматизированная система оценки эффективности использования рекуперативного торможения на электроподвижном составе метрополитена и накопителей энергии, внедренная в 2011 году [35–37].

Дальнейшее повествование в статье сводится к рассмотрению взаимодействия только тренажера поездного диспетчера и автоматизированной системы построения плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена, поскольку результаты работы одной из систем являются исходной информацией для работы другой системы. Примером аналогичного межсистемного взаимодействия может служить изложенное в статье [38], где данные, получаемые в результате работы автоматизированной системы проведения энергооптимальных расчетов, позволяют качественно улучшить результаты, выдаваемые автоматизированной системой построения плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена. Здесь же показано, как последняя из упомянутых систем является принципиальным поставщиком данных для нормальной работы тренажера поездного диспетчера, поэтому фактически настоящая статья является развитием [38].

Интеллектуальная система управления ГРТС состоит из следующих информационных ресурсов-приложений [19, 39]:

- интеллектуальной системы планирования и анализа работы ГРТС;
- интеллектуальной системы планирования и анализа работы операторов ГРТС;
- интеллектуальной системы планирования и анализа работы диспетчеров ГРТС;
- интеллектуальной системы планирования и анализа работ по техническому содержанию инфраструктуры ГРТС;
- интеллектуальной системы планирования и анализа работы транспортных средств ГРТС;
- интеллектуальной системы управления движением и безопасностью транспортных средств;

- бортовых устройств беспилотного управления транспортными средствами;
- ситуационного центра.

Для обеспечения режима безопасного обмена информацией создана буферная база данных *MySQL*. Информация из базы данных поступает по сети *MultiProtocol Label Switching* в ядро сети централизованной интеллектуальной системы управления ГРТС на серверы верхнего функционального уровня. Хранилища адаптированы для нормальной работы микросервисов в составе системы. Микросервисы — сервисы, которые обрабатывают запросы от клиента и взаимодействуют со временным хранилищем (хранилища данных с результатами расчетов). При этом под *BigData* понимается основное хранилище, в котором данные только накапливаются и не предусмотрена функция автоочистки содержимого [39].

Целями данной статьи являются анализ накопленного опыта по созданию информационного обеспечения составных частей интеллектуальной системы управления ГРТС, выявление общих свойств этого типа обеспечения и определение направлений реинжиниринга информационного обеспечения.

Построение интеллектуальной системы управления ГРТС требует наличия полигона для проверки выбранных принципов построения системы и алгоритмов управления. Таким полигоном может служить интегрированная система обучения сотрудников ГРТС, базирующаяся на тесно связанных между собой тренажере поездного диспетчера линии метрополитена и автоматизированной системе построения ПГД пассажирских поездов, именно поэтому данная статья в первую очередь посвящена анализу опыта построения и направлениям развития информационного обеспечения конкретно этих систем.

### **1. Построение информационного обеспечения интегрированной системы обучения сотрудников ГРТС как полигона для апробации интеллектуальной системы управления ГРТС**

В работе [20] предложено использовать интеграционный подход, в основе которого прежде всего лежит применение широкого

спектра цифровых технологий на всех уровнях эксплуатации системы обучения и оценки знаний оперативного персонала. В основу интегрированной системы обучения сотрудников ГРТС должен входить:

1. Тренажер диспетчера ГРТС, позволяющий повышать квалификацию, совершенствовать умения оперативного управления ГРТС.
2. Автоматизированная система проверки знаний оперативного персонала ГРТС.
3. Система построения ПГД и ГИД ГРТС.

Тренажер, в частности, поездного диспетчера ГРТС должен включать в себя следующие подсистемы для моделирования движения поездов:

- по всем линиям метрополитена;
- по двум главным путям Московского центрального кольца (МЦК);
- по путям объединенных железнодорожных направлений Московских центральных диаметров (МЦД);
- по трамвайной сети города Москвы.

Автоматизированная система проверки знаний должна выполнять оценку знаний положений Инструкций по движению и маневровой работе метрополитена, МЦК, МЦД и трамвайной сети. Автоматизированная система построения плановых и исполненных графиков движения пассажирских поездов должна обеспечивать автоматизированный расчет расписания для всех перечисленных выше видов ГРТС.

Процесс разработки автоматизированных (автоматических) информационных систем (именно к такому виду систем относится интегрированная система обучения сотрудников ГРТС) основывается на подготовке информационного обеспечения. Под информационным обеспечением, в широком смысле слова, понимают целое направление, которое заключается в разработке методов и форм работы с информацией, отражающей в системе объекты, над которыми осуществляется мониторинг и/или управление, а также в грамотной организации этой информации с целью эффективного ее хранения и использования [40]. Без хранимых в базе данных сведений принципиально невозможно создать информационную систему, систему автоматического управления, интеллектуальную

систему, обучающую систему. Подготовка информационной системы является одной из целей настоящего исследования.

Стоит отметить, что проектируемая интеллектуальная интегрированная система обучения сотрудников ГРТС должна обладать следующими свойствами:

1. Высокая степень адаптивности — система должна гибко реагировать на любое изменение или модернизацию, например появление новых станций на линиях метрополитена, введение новых линий/участков и остановочных пунктов МЦД. Адаптивность предполагает, что в основу системы будут заложены [41]:
  - базы данных;
  - базы знаний и правил логического вывода;
  - механизм их своевременного обновления и корректировки.
2. Дружественный, ролевой графический пользовательский интерфейс.
3. Защита данных каждого пользователя системы.
4. Встроенные средства анализа данных за счет вычисления значений критериев качества операторского управления, основанного в том числе на экспертной оценке и/или принципах искусственного интеллекта [16].
5. Масштабируемость:
  - 5.1. Возможность модульного обновления — данное свойство позволит обновлять только заранее выделенную часть системы, а не систему целиком, что существенно сократит время на проведение работ по сопровождению программного обеспечения и техническое обслуживание сетевой инфраструктуры.
  - 5.2. Возможность разбиения на микросервисы [39] — данное свойство позволит дополнять систему новыми звеньями, которые будут получать на вход информацию, рассчитанную одними микросервисами, и генерировать решение для организации нормальной работы других микросервисов.

Для решения перечисленных задач предлагается методика построения информационного обеспечения:

1. Обобщить уже существующие отдельные информационные системы и подсистемы. Например, рассматриваемые в данной статье тренажер поездного диспетчера и автоматизированную систему построения плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена с подсистемами в ее составе.
2. Провести декомпозицию комплекса проблем. Например, свести структуры данных к одной из известных, высоких нормальных форм (нормализация базы данных).
3. Сформулировать требования к информационному обеспечению. Например, по скорости доступа к данным, распределенности или локализации размещения базы данных, безопасности, синхронизации, резервному копированию и др.
4. Разработать обобщенную информационную среду. Для эффективной работы микросервисов это должна быть одна и та же база данных и/или система управления базами данных. Например, в [39] предложен продукт *MySQL*. В данном подходе предлагается использование *PostgreSQL*.

На первом этапе проектирования информационного обеспечения необходимо декомпонировать комплекс проблем, то есть определить свод задач, которые должна решать интеллектуальная интегрированная система. После этого можно осуществить переход ко второму этапу проектирования, на котором для каждой группы задач следует идентифицировать метод ее решения и определить данные, необходимые для решения.

Определившись со структурой, внутри которой планируется размещение данных, необходимо выполнить переход от человеко-ориентированной структуры к машинно-ориентированной структуре — выполнить нормализацию. И только потом приступать к физическому проектированию.

При нормализации базы данных [42] важно создать все необходимые таблицы и установить отношения между ними в соответствии

	Поле 1 ( $f_1$ )	Поле 2 ( $f_2$ )	Поле 3 ( $f_3$ )	... ..	Поле $N$ ( $f_N$ )
1	Значение 1	Значение 2	Список 1	▼	Значение $N$
			Значение 3.1		
			Значение 3.2		
			... ..		
			Значение 3. $M$		

Обобщенный фрагмент таблицы базы данных (отношения)

с правилами, которые обеспечивают защиту данных, делают базу данных гибкой, устраняя избыточность и несогласованные зависимости. Избыточность данных приводит к непродуктивному расходованию свободного места на диске и затрудняет обслуживание баз данных.

При выборе средств построения информационного обеспечения необходимо учитывать накопленный опыт, а также передовые технологии в области хранения данных. Некоторые перечисленные выше системы основаны на более архаичной системе управления базой данных (СУБД) в связи с тем, что являются разработкой не одного-двух, а более 10-тилетней давности. Часть систем основана на СУБД *Microsoft Access*, *Microsoft SQL Server* [43–46]. Следует заметить, что перечисленные СУБД являются реляционными. На сегодняшний день — это очень важный аспект, принимаемый во внимание, поскольку мировое информационное сообщество делится на несколько фронтов приверженцев реляционных и *NoSQL* баз данных. В частности, приверженцы внедрения реляционных СУБД подразделяются на сообщества узкопрофильных специалистов, использующих: *Microsoft SQL Server*, *PostgreSQL* и др.

Делая выбор в сторону *PostgreSQL* [47, 48], авторы ориентируются не только на мировое информационное сообщество, результаты работы научного транспортного сообщества и интернет-сообщества любителей и профессионалов, активно работающих с базами данных, но также и на объективные факты. *PostgreSQL* — это прежде всего свободная объектно-реляционная СУБД с открытой документацией и исходным кодом.

С целью повышения удобства изложения модели информационного обеспечения на математическом языке сотрудниками кафедры «Управление и защита информации» предложен аппарат, основанный на теории множеств [30, 31]. При этом каждая таблица базы данных (отношение) представляется в виде вектора. Рассмотрим это на обобщенном абстрактном примере.

Имеем некоторое множество объектов, занесенных в таблицу базы данных (рис. 1), содержащую столбцы с именами: «Поле 1», «Поле 2», «Поле 3», ..., «Поле  $N$ ». При этом ячейки напротив столбцов «Поле 1», «Поле 2» и «Поле  $N$ » являются свободно заполняемыми без ограничений, а ячейки напротив столбца «Поле 3» ограничены по заполнению только множеством элементов из списка. Содержимое списка зависит от содержимого другой таблицы (отношения) той же базы данных. Внешне (*front-end*) отображается значение, понятное администратору базы данных (например, наименование объекта), а внутренне (*back-end*) в ячейке рассматриваемой таблицы базы данных фиксируется код/идентификатор объекта, выбранного из списка. Таким образом, «Поле 3» можно обозначить как вектор, связанный с рассматриваемым вектором.

Пусть рассмотренная таблица (отношение) имеет наименование « $T$ ». Каждый объект, содержащийся в  $T$ , может быть описан следующим вектором:

$$T = (f_1, f_2, f_3, \dots, f_N), \quad (1)$$

где  $f_1, f_2, f_N$  — значения, содержащиеся в ячейках напротив столбцов «Поле 1», «Поле 2» и «Поле  $N$ » соответственно;

$f_3$  — значение, подставляемое в ячейку напротив столбца «Поле 3» выбором из списка (маркировка жирным шрифтом здесь обязательна).

Если считать, что связанная таблица (отношение), содержащая сведения для постановки в «Поле 3», состоит только из двух столбцов: «Код» ( $ID$ ) и «Наименование» ( $Name$ ), то объекты «Поля 3» могут быть раскрыты через вектор:

$$f_3 = (ID, Name), \quad (2)$$

где  $ID$  — значение, содержащееся в ячейке напротив столбца «Код»;

$Name$  — значение, содержащееся в ячейке напротив столбца «Наименование».

Представленный материал является формальным описанием перехода к третьей нормальной форме базы данных [42].

Современный этап проектирования и развития информационных систем направлен на развитие *web*-ориентированных продуктов, и даже в тех случаях, когда инфраструктурных возможностей недостаточно для перевода программного обеспечения в рамки *web*, руководители и разработчики все равно стремятся отходить от «толстых» клиентских приложений в направлении распределенных систем с «тонкими» клиентскими приложениями.

Существует устойчивое неоспоримое мнение, относящееся к проектированию информационного обеспечения: «Чем раньше будут учтены все особенности предметной области, тем меньше изменений потребуется вносить в базу данных». Это работает только для организации нормального функционирования элементов модели (*back-end*) системы. Только первичное тестирование конечными пользователями системы позволит понять, чем потребуется дополнить базу данных для обеспечения дружелюбности графического пользовательского интерфейса (*front-end*) системы.

Исходя из сказанного в унифицированной базе данных должны быть обособлены пространства для хранения единой, нормативно-справочной информации (например, о станциях, линиях, перегонах, депо и иных фиксированных инфраструктурных объектах транспортной или любой другой рассматриваемой

предметной области). Должны иметь место блоки данных, необходимых для нормального функционирования разработанных моделей, в частности *front-end* и *back-end* блоки моделей. В редких случаях при унификации взаимодействия пользователей с различными подсистемами можно свести данные по *front-end* всех моделей в один общий блок.

## 2. Анализ информационного обеспечения действующих средств автоматизации обучения оперативного персонала и диспетчеров ГРТС

В настоящее время существуют три формы обучения, повышения квалификации и проверки знаний оперативного персонала ГРТС, связанного с управлением движением [20]:

- 1) тестовая форма;
- 2) с применением событийных абстрактных моделей;
- 3) с применением моделей реального объекта ГРТС, работающих в реальном времени.

Для решения вопросов автоматизации обучения оперативного персонала и диспетчеров метрополитена в качестве системы поддержки принятия решения применялись тренажер поездного диспетчера, который относится к типу моделей реальных объектов ГРТС, и автоматизированная система проверки знаний поездных диспетчеров, которая содержит тестовую форму, а также событийную абстрактную модель.

При использовании имитационной модели тренажера или автоматизированной системы проверки знаний генерируется нештатная ситуация или совокупности нештатных ситуаций, которые могут быть оперативно парированы по итогам применения диспетчером перечня управляющих воздействий, приводящих к устранению сбоя, сгенерированного для конкретной или абстрактной линии метрополитена.

Под сбойными ситуациями понимают инциденты, т. е. события на ГРТС, возникшие при движении поездов или выполнении маневровой работы вследствие опасных отказов технических средств, ошибок локомотивных бригад и железнодорожного персонала, служб обеспечения и управления движением,

недопустимых внешних воздействий, которые могли закончиться, но не закончились транспортным происшествием [20]:

- взрез стрелки,
- прием поезда на занятый путь,
- отправление поезда на занятый перегон,
- проезд запрещающего сигнала или предельного столбика,
- обрыв автосцепки подвижного состава и т. д.

Сбойные ситуации классифицируются на малые и большие сбои. В том случае, когда отклонение от планового графика движения может быть компенсировано имеющимися на линии ресурсами времен хода и длительностей стоянок, говорят о наличии на линии малого сбоя. При невозможности компенсировать сбой имеющимися временными ресурсами говорят о наличии большого сбоя, для ликвидации которого необходимо реализовать внеплановые обороты составов на станциях с путевым развитием и, если это необходимо, внеплановое удаление составов с линии в депо, что приводит к изменению парности и порядка следования поездов.

База данных тренажера поездного диспетчера и системы проверки знаний имеют схожую структуру информационного обеспечения, так как система проверки знаний является логическим продолжением тренажера, однако и разница очевидна: наличие блоков анализа результатов тестирования, сохранения данных у последней.

Тренажер поездного диспетчера имеет в своем составе следующие подсистемы и модели [17, 18, 20]:

- модель системы обеспечения безопасности движения,
- модель системы электрической централизации (ЭЦ),
- модель управления стрелками и сигналами,
- модель движения поездов,
- подсистема графика движения поездов,
- модель пассажиропотока,
- подсистема визуализации объектов, включающая в себя табло коллективного пользования и средства визуализации автоматизированных рабочих мест в составе тренажера,

- подсистема архивации состояний объектов,
- подсистема задания начальных условий объектов,
- модель управления работой тренажера инструктором.

База данных тренажера состоит из таблиц, которые возможно сгруппировать согласно сформулированной классификации:

1. *Нормативно-справочная информация/исходные данные, необходимые для организации работы подсистемы визуализации объектов тренажера поездного диспетчера:*

- Список объектов — таблица, содержащая информацию об объектах, состояние которых отображается на средствах визуализации, и их связи с объектами, задействованными при имитационном моделировании движения поездов;
- Станции — таблица, содержащая описание станций соответствующей линии;
- Отрезки рельсовых цепей — таблица, содержащая список и информацию об отрезках отображаемых рельсовых цепей;
- Светофоры — таблица, содержащая информацию о местоположении и свойствах отображаемых светофоров;
- Стрелки — таблица, содержащая информацию о местоположении и свойствах отображаемых стрелок линии;
- Реле — таблица, содержащая информацию о местоположении и свойствах отображения компонентов, участвующих в организации работы ЭЦ;
- Индикаторы номеров маршрутов — таблица, содержащая информацию о местоположении и свойствах мест отображения маршрутов.

2. *Информация, необходимая для имитационного моделирования движения поездов:*

- Маршруты ЭЦ: ... — множество таблиц, содержащих информацию из техникораспорядительного акта станции, необходимую для корректного моделирования функционирования маршрутов ЭЦ на станциях соответствующей линии [49, 50];
- Выход из депо — таблица, содержащая информацию о местах выхода из депо на соответствующей линии;

- Ночной отстой — таблица, содержащая информацию о местах ночного отстоя поездов на линии метрополитена;
- Точки останова — таблица, содержащая информацию о рельсовых цепях, на которых поезд должен остановиться на станции;
- Авторежимы: ... — множество таблиц, содержащих информацию из технокорпоративного акта станции, необходимую для корректного моделирования функционирования авторежимов на станциях соответствующей линии [50];
- Отрезки рельсовых цепей — таблица, содержащая информацию, необходимую для имитационного моделирования движения поездов по рельсовым цепям линии;
- Светофоры — таблица, содержащая информацию, необходимую для имитационного моделирования работы светофоров линии;
- Стрелки — таблица, содержащая информацию, необходимую для имитационного моделирования работы стрелок соответствующих станций линии.

Система проверки знаний основана на тренажере поездного диспетчера с дополнением следующих подсистем:

- Подсистема задания неисправности;
- Подсистема администрирования;
- Подсистема проведения анализа результатов проверки знаний.

База данных системы проверки знаний содержит все таблицы тренажера поездного диспетчера, а также следующие дополнительные таблицы, которые приведены в соответствии с классификацией по назначению:

3. *Нормативно-справочная информация/исходные данные, необходимые для реализации подсистемы визуализации:*

- Места поломки — таблица, содержащая информацию о рельсовых цепях, на которых имитируется соответствующая ситуация неисправности;

4. *Информация, необходимая для проведения имитационного моделирования движения поездов:*

- Сигналы останова — информация о сигналах, которые необходимо визуально

отобразить на табло коллективного пользования в случае наличия соответствующей неисправности;

- Освещение на перегоне — таблица, содержащая информацию о перегонах линии для включения освещения в соответствии с положениями Инструкции по движению поездов и маневровой работе на метрополитенах Российской Федерации.

5. *Информация, необходимая для проведения имитационного моделирования соответствующей неисправности на линии:*

- Ситуации — таблица, содержащая список возможных сбойных ситуаций для проверки знаний поездных диспетчеров;
- Ситуация, тип — таблица, в которой находится информация о типе сбойной ситуации — тестовая форма или с применением модели, работающей в реальном времени;

- Команды, название ситуации — таблицы, содержащие команды, которые используются при имитационном моделировании указанной ситуации;

- Команды правильные, название ситуации — таблицы, содержащие корректные команды из состава таблицы «Команды, название ситуации» с указанием связанных с командой объектов, за своевременную подачу этих команд обучающемуся выставляются указанные в таблице баллы;

- Приказы — таблица, содержащая ссылки на файлы-шаблоны приказов, которые необходимо заполнять в соответствии с выбранной сбойной ситуацией и положениями Инструкции по движению поездов и маневровой работе на метрополитенах Российской Федерации.

6. *Информация, необходимая для осуществления администраторских функций:*

- Учетные записи — таблица, содержащая логин и пароль обучаемых, инструкторов.

7. *Информация, необходимая для проведения анализа проверки знаний:*

- Название ситуации, команды — таблица, содержащая данные о результатах прохождения проверки знаний обучаемым

по соответствующей теме: перечень отданных команд; объекты, связанные с командой; баллы, начисленные за подачу команды; время выдачи команды; суммарные баллы; процент правильных ответов; дата и время прохождения проверки знаний;

- Приказы — таблица, содержащая информацию о заполненных обучаемым приказах.

### **3. Анализ информационного обеспечения действующих средств автоматизированного построения плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена**

Плановый график движения пассажирских поездов метрополитена является нормативным документом, увязывающим работу различных служб метрополитена, ответственных за планирование перевозочного процесса, своевременные диагностику и ремонт электроподвижного состава, обслуживание инфраструктуры, работы локомотивных бригад и другие технологические процессы, связанные с движением поездов по линиям метрополитена.

Автоматизированная система построения плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена содержит в своем составе следующие подсистемы:

- пользовательской навигации и организации корректной работы эргономичного графического пользовательского интерфейса;
- печати объектов и их образов;
- ручного построения и редактирования ПГД;
- автоматизированного построения и пошагового редактирования ПГД;
- ручного построения ГО ЭПС;
- автоматизированного построения ГО ЭПС согласно нормативам;
- автоматизированного построения ГО ЭПС по предварительно составленному ПГД;
- построения ГИД;
- формирования раскладок для выписки поездных расписаний машинистам;
- формирования карточек расписания для печати и выдачи машинистам.

База данных автоматизированной системы построения ПГД состоит из следующих таблиц, которые рационально сгруппировать согласно сформулированной классификации:

1. *Нормативно-справочная информация/исходные данные, необходимые для составления подложек для построения ПГД и ГО ЭПС, нормального размещения и сопряжения вновь создаваемых объектов, а также размещения и сопряжения ранее созданных объектов:*

- линии — таблица, содержащая информацию о наименованиях линий метрополитена, размещающихся на одном бланке;
- станции — таблица, содержащая информацию о наименованиях станций и порядке их следования станций друг за другом на линии метрополитена;
- задания — таблица, объединяющая между собой пары станций (станции отправления и станции прибытия) в перегоны с указанием направлений движения;
- времена хода — таблица, увязывающая между собой перегоны (задания) и типы расписаний [50];
- типы расписаний — таблица, содержащая информацию о множестве вариаций времен хода по перегонам и стоянок на станциях, необходимых для построения «ниток» непараллельного графика [50];
- депо — таблица, содержащая информацию о депо линии метрополитена с указанием станций и перегонов, с которыми связано депо;
- маршруты — таблица, содержащая информацию о нумерации маршрутов, привязке номеров маршрутов к конкретному депо, а также порядке следования маршрутов друг за другом;
- размеры движения — таблица, содержащая информацию распределении заданной парности движения поездов по часам работы линии метрополитена;
- пункты осмотра — таблица, содержащая информацию о местах проведения ремонтов и диагностических осмотров с привязкой к точкам ночной расстановки;
- типы ремонта — таблица, содержащая информацию о разновидностях плановых

- ремонтов и диагностических осмотров с указанием регламентов (ограничений) по длительностям их проведения [51];
- точки ночной расстановки — таблица, содержащая информацию о точках ночной расстановки, расположенных на линии и в депо.
2. *Информация, необходимая для реализации автоматизированного построения ПГД, а также для хранения текущего состояния процесса автоматизированного построения ПГД, обеспечивающего возможность перезапуска процесса не с нулевыми начальными условиями:*
    - автоматический синтез — таблица, содержащая информацию о выполненных этапах автоматизированного построения ПГД;
    - расстановка — таблица, содержащая информацию о возможных вариантах последовательности занятия и освобождения точек ночной расстановки.
  3. *Информация, необходимая для корректного вывода на печать объектов и их образов:*
    - карточки расписания — таблица, содержащая информацию о параметрах печатного шаблона для формирования карточек расписания, выдаваемых машинистам, заступающим в рейс;
    - надписи — таблица, содержащая все вспомогательные надписи и координаты их размещения на бланке для построения графика;
    - объекты печати — таблица, содержащая информацию о надписях, отображаемых только в режиме распечатки бланка на принтере/плоттере.
  4. *Информация, необходимая для хранения индивидуальных настроек графического пользовательского интерфейса системы для каждого отдельно взятого пользователя системы, а также базовых настроек ПГД, ГО ЭПС, подложек, иных объектов и их образов:*
    - параметры графика — таблица, содержащая информацию о дате вступления в действие, сезонности и прочих индивидуальных особенностях отображения графика;
    - размеры — таблица, содержащая информацию о разметке бланка для построения графика.
  5. *Объекты и образы ПГД:*
    - «нитки» графика — таблица, содержащая информацию о «нитках» — описаниях движения поездов по главным путям линий метрополитена;
    - элементы расписания — таблица, увязывающая между собой «нитки», станции, времена отправления и прибытия, а также времена стоянок.
  6. *Объекты и образы ГО ЭПС:*
    - график оборота: ремонты — таблица, увязывающая типы ремонтов, с маршрутами;
    - график оборота: элементы — таблица, хранящая информацию для формирования образов элементов графика оборота.

«Глубина погружения» в детализацию представления необходимых данных предметной области может быть различной. Отправными точками для начала проектирования информационного обеспечения интеллектуальной системы управления, представленного базой данных, могут быть различные инфраструктурные объекты ГРТС, например: линии метрополитена, станции, оборотные тупики за станциями, электродепо, пункты осмотра, точки ночной расстановки и др.

### **Заключение**

Учет положительного многолетнего опыта разработки программного обеспечения при несомненном накоплении базы знаний в ходе взаимодействия с конечными пользователями систем на этапах внедрения и сопровождения, а также расширение кругозора за счет анализа опубликованного опыта разработок различных компаний позволили обеспечить плавность перехода к реализации процесса реинжиниринга комплекса автоматизированных систем управления технологическими процессами организации перевозочного процесса на ГРТС города Москвы.

Заключаем, что в рамках начальных этапов процесса реинжиниринга комплекса автоматизированных систем управления особенно важными и значимыми являются шаги обобщения общих данных в блок нормативно-справочной информации, данных, относящихся к работе конкретной подсистемы организации перевозочного процесса, в блок

модели; данных, отвечающих за удобство взаимодействия пользователя с системой и за интеллектуализацию графического пользовательского интерфейса, в блок управления.

Для поставленных целей мониторинга и управления обоснован выбор СУБД *PostgreSQL* как открытой, хорошо документированной, многофункциональной, гибкой, сопровождаемой и перспективной.

СУБД в качестве базы знаний занимает центральное положение по отношению к остальным компонентам вычислительной интеллектуальной системы, поскольку через СУБД осуществляется интеграция средств вычислительной системы, участвующих в решении задач управления. Дальнейшие изыскания авторов направлены на совершенствование архитектуры интеллектуальной транспортной системы с учетом выбора типа СУБД и предложенного функционала интеллектуальной транспортной системы.

Дальнейшими шагами развития исследования является разработка архитектуры и обобщенной информационной среды для реализации программного обеспечения Интеллектуальной системы ГРТС. ▲

### Библиографический список

- Сергеев В. В. Реализация политики импортозамещения в транспортной отрасли современной российской экономики / В. В. Сергеев // Поиск: Политика. Обществоведение. Искусство. Социология. Культура. — 2016. — № 5(58). — С. 25–34.
- Алексеева Н. А. Макроэкономические параметры Российской экономики в период экономических санкций / Н. А. Алексеева, О. Ю. Абашева, В. Л. Редников // *Russian Economic Bulletin*. — 2022. — Т. 5. — № 3. — С. 67–74.
- Куренков П. В. Влияние экономических санкций на развитие промышленного комплекса и транспортной системы Российской Федерации / П. В. Куренков, А. А. Сафронова, О. Н. Мадяр и др. // *Экономика железных дорог*. — 2022. — № 4. — С. 45–57.
- Заводы России — промышленные предприятия и производства: Транспортная система России. URL: <https://xn--80aegj1b5e.xn--p1ai/publication/transportnaya-sistema-rossii> (дата обращения: 13.05.2022).
- Сафронов А. И. Подходы к автоматизированному составлению плановых графиков движения пассажирских поездов Московского метрополитена, обеспечивающие экономичные, комфортные и безопасные перевозки / А. И. Сафронов // *Актуальные проблемы техносферной безопасности: сборник трудов III национальной научно-практической конференции РОАТ, Москва, 30–31 марта 2021 года*. — М.: РОАТ, РУТ (МИИТ). — 2021. — С. 141–147.
- Логинова Л. Н. Методика составления расписания движения поездов для столичного метрополитена / Л. Н. Логинова, Е. А. Сеславина, А. И. Сеславин // *Автоматика на транспорте*. — 2022. — Т. 8. — № 1. — С. 67–77. — DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-1-67-77.
- Сидоренко В. Г. Современные вызовы безопасности городских транспортных систем / В. Г. Сидоренко; под общ. ред. А. О. Калашникова, В. В. Кульбы // *Проблемы управления безопасностью сложных систем: материалы XXVIII международной конференции*. — М.: ИГУ РАН. — 2020. — С. 434–439. — DOI: 10.25728/iccscs.2020.35.36.079.
- Сафронов А. И. Моделирование плана перевозочного процесса в утренний час пик на замкнутой Большой кольцевой линии Московского метрополитена / А. И. Сафронов, Е. В. Лысенко // *Автоматика на транспорте*. — 2021. — Т. 7. — № 4. — С. 584–616. — DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-584-616.
- Искаков Т. А. Подходы к оценке качества планирования и управления движением пассажирских поездов метрополитена / Т. А. Искаков, А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // *Автоматика на транспорте*. — 2020. — Т. 6. — № 1. — С. 38–63. — DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-1-38-63.
- Николаев К. Ю. Применение технологии «трамвай-поезд» в России. Требования к подвижному составу и технологическое обеспечение взаимодействия транспортных систем / К. Ю. Николаев // *Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт: сборник материалов научно-практической конференции АО «ВНИИЖТ», Щербинка, 26–27 августа 2021 года*. — Щербинка: АО «ВНИИЖТ». — 2021. — С. 132–138.
- Горбачев А. М. Автоматизация планирования движения городского скоростного легкорельсового транспорта / А. М. Горбачев, П. А. Василенко // *Транспорт Российской Федерации*. — 2021. — № 5-6 (96-97). — С. 43–46.
- Бородина Е. В. Организация местной работы в Московском железнодорожном узле в условиях организации диаметального движения пригородно-городских поездов / Е. В. Бородина, Е. О. Дмитриев, Г. Г. Горбунов и др. // *Вестник транспорта Поволжья*. — 2021. — № 1(85). — С. 33–44.
- Евреенова Н. Ю. Совершенствование системы пропуска электропоездов на участках с интенсивным движением / Н. Ю. Евреенова, Д. Ю. Роменский, К. А. Калинин // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. — 2021. — № 1(81). — С. 88–96. — DOI: 10.46973/0201-727X\_2021\_1\_88.
- Сафронов А. И. Прогнозирование плановых размеров движения на перспективных московских центральных диаметрах при использовании интеллектуальной системы «АРМ графиста» / А. И. Сафронов, А. А. Дятлова // *Интеллектуальные транспортные системы: материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 26 мая 2022 года*. — М.: РУТ, 2022. — С. 298–305.
- Баранов Л. А. Комплексное решение задач планирования и управления движением городских рельсовых транспортных средств / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, Е. П. Балакина и др. // *Труды международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию*

- университета «Академик Владимир Николаевич Образцов — основоположник транспортной науки». — М.: РУТ (МИИТ), 2021. — С. 56–64. — DOI: 10.47581/2022/Obrazcov.09.
16. Сидоренко В. Г. Подход к формированию рейтинга работы машиниста с использованием различных метрик сравнения / В. Г. Сидоренко, М. А. Кулагин // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2018. — № 1. — С. 14–17.
  17. Баранов Л. А. Принципы построения автоматизированных систем обучения и повышения квалификации эксплуатационного персонала интеллектуальных систем управления движением поездов городского внеуличного транспорта / Л. А. Баранов, Е. П. Балакина, Л. Н. Логинова // Интеллектуальные транспортные системы: материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 26 мая 2022 года. — М.: РУТ, 2022. — С. 45–48.
  18. Балакина Е. П. Обеспечение безопасности применения речевых технологий в работе оперативного персонала городских рельсовых транспортных систем / Е. П. Балакина, М. А. Кулагин, Л. Н. Логинова и др. // Проблемы управления безопасностью сложных систем: материалы XXIX международной научно-практической конференции, Москва, 15 декабря 2021 года. — М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2021. — С. 355–361. — DOI: 10.25728/iccss.2021.94.35.056.
  19. Баранов Л. А. Интеллектуальные киберфизические системы управления движением внеуличного транспорта (2 часть) / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко // Транспортное строительство. — 2021. — № 4. — С. 19–23.
  20. Баранов Л. А. Интеграционный подход в обучении оперативных работников городских рельсовых транспортных систем / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, Е. П. Балакина и др. // Наука и техника транспорта. — 2021. — № 2. — С. 22–31.
  21. Baranov L. A. Automatiche und energioptimale Zugsteuerung / L. A. Baranov, V. F. Goldenberg, V. M. Maksimov et al. // Eisenbahningenieur. — 2018. — Iss. 11. — Pp. 20–25.
  22. Krnac E. An evaluation of train control information systems for sustainable railway using the analytic hierarchy process (AHP) model / E. Krnac, B. Djordjevic // European Transport Research Review. — 2017. — Iss. 9. — Pp. 35. — DOI: 10.1007/s12544-017-0253-9.
  23. Boyd K. Area under the precision-recall curve: Point estimates and condence intervals / K. Boyd, K. H. Eng, C. D. Page // Joint European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. — Berlin, Heidelberg: Springer. — 2013. — Pp. 451–466.
  24. Chawla N. SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique / N. Chawla, K. Bowyer, L. Hall et al. // Journal of Artificial Intelligence Research. — 2002. — Pp. 321–357.
  25. Khromov S. K. Machine learning application for support for automated control systems users / S. K. Khromov, M. A. Kulagin, V. G. Sidorenko // Journal of Physics: Conference Series, Computer-Aided Technologies in Applied Mathematics, 7–9 September 2020. — Tomsk: Tomsk State University. — 2020. — Vol. 1680. — DOI: 10.1088/1742-6596/1680/1/012019.
  26. Баранов Л. А. Интеллектуальные киберфизические системы управления движением внеуличного транспорта / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко // Транспортное строительство. — 2021. — № 3. — С. 27–29.
  27. Васильева М. А. Энергооптимальные траектории для метропоездов / М. А. Васильева, А. А. Должикова // Мир транспорта. — 2007. — Т. 5. — № 3(19). — С. 38–41.
  28. Baranov L. A. Energy-optimal control of vehicle traffic / L. A. Baranov, V. M. Maksimov, N. A. Kuznetsov // Russian Electrical Engineering. — 2016. — Vol. 87. — Iss. 9. — Pp. 498–504. — DOI: 10.3103/S1068371216090030.
  29. Baranov L. A. Minimization of Energy Consumption for Urban Rapid-Transit Traction / L. A. Baranov, V. G. Sidorenko, E. P. Balakina et al. // Russian Electrical Engineering. — 2021. — Vol. 92. — Iss. 9. — Pp. 492–498. — DOI: 10.3103/S1068371221090030.
  30. Сидоренко В. Г. Автоматизация синтеза планового графика движения поездов метрополитена / В. Г. Сидоренко // Наука и техника транспорта. — 2004. — № 2. — С. 48–57.
  31. Сидоренко В. Г. Построение планового графика движения для метрополитена / В. Г. Сидоренко, А. И. Сафронов // Мир транспорта. — 2011. — Т. 9. — № 3(36). — С. 98–105.
  32. Сидоренко В. Г. Автоматизация планирования работы ЭПС метрополитена / В. Г. Сидоренко, А. И. Сафронов, К. М. Филипченко // Мир Транспорта. — 2015. — Т. 13. — № 4. — С. 154–165.
  33. Сидоренко В. Г. Применение генетических алгоритмов к решению задачи планирования работы электроподвижного состава метрополитена / В. Г. Сидоренко, М. А. Чжо // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2016. — № 6. — С. 13–16.
  34. Сафронов А. И. Антология задач организации графического пользовательского интерфейса в интеллектуальной системе «АРМ графиста» / А. И. Сафронов, У. А. Старовойтова // Интеллектуальные транспортные системы: материалы Международной научно-практической конференции. — М.: РУТ (МИИТ), 2022. — С. 326–337.
  35. Гаев Д. В. Внедрение энергосберегающих технологий / Д. В. Гаев, А. В. Ершов, Л. А. Баранов и др. // Мир транспорта. — 2010. — Т. 8. — № 3(31). — С. 3–8.
  36. Баранов Л. А. Оценка эффективности использования стационарных емкостных накопителей энергии в метрополитене на основе экспериментальных замеров показателей работы системы тягового электроснабжения / Л. А. Баранов, Ю. А. Бродский, В. А. Гречишников и др. // Электротехника. — 2010. — № 1. — С. 62а–65.
  37. Баранов Л. А. Энергооптимальное управление движением транспортных средств / Л. А. Баранов, Н. А. Кузнецов, В. М. Максимов // Электротехника. — 2016. — № 9. — С. 12–18.
  38. Баранов Л. А. Минимизация расхода энергии на тягу поездов внеуличного городского транспорта / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, Е. П. Балакина и др. // Электротехника. — 2021. — № 9. — С. 26–34. — DOI: 10.53891/00135860\_2021\_9\_26.
  39. Алексеев В. М. Построение архитектуры интеллектуальной системы управления городской рельсовой транспортной системой / В. М. Алексеев, Л. А. Баранов, М. А. Кулагин и др. // Мир транспорта. — 2021. — Т. 19. — № 1(92). — С. 18–46. — DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-1-18-46.
  40. Юрасов В. Г. Организация информационного обеспечения систем управления / В. Г. Юрасов // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2013. — Т. 9. — № 3-1. — С. 163.

41. Шориков А. Ф. Разработка информационной системы комплексного управления предприятием / А. Ф. Шориков, Е. Ю. Виноградова // Прикладная информатика. — 2007. — № 5(11). — С. 23–35.
42. Microsoft Learn: приобретение навыков, которые открывают путь к карьерному росту: Описание нормализации базы данных. URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/office/troubleshoot/access/database-normalization-description> (дата обращения: 27.10.2022).
43. Varga S. *Introducing Microsoft SQL Server 2016: Mission-Critical Applications, Deeper Insights, Hyperscale Cloud* / S. Varga, D. Cherry, J. D'Antoni. — Redmond, 98052-6399 (Washington): Microsoft Press, 2016. — 199 p. — ISBN 978-1-5093-0195-9.
44. Sebastian J. *The Art of SQL Server Filestream* / J. Sebastian, S. Aelterman. — Simpletalk Publishing. — 2012. — 486 p. — ISBN 978-1-906434-88-5.
45. Ben-Gan I. *Microsoft SQL Server 2012 T-SQL Fundamentals* / I. Ben-Gan. — Sebastopol, 95472 (California): SolidQ. — 2012. — 412 p. — ISBN 978-0-735-65814-1.
46. Cote C. *SQL Server 2017 Integration Services Cookbook* / C. Cote, M. Lah, D. Sarka. — Birmingham (UK): Packt Publishing Ltd, 2017. — 534 p. — ISBN 978-1-78646-182-7.
47. Thomas S. M. *PostgreSQL High Availability Cookbook: SE* / S. M. Thomas. — Birmingham, B3 2PB (UK): Packt Publishing Ltd., 2017. — 940 p. — ISBN 978-1-78712-553-7.
48. Hellerstein J. M. Looking back at Postgres / J. M. Hellerstein // ArXiv. — 2019. — DOI: [abs/1901.01973](https://doi.org/abs/1901.01973).
49. Логинова Л. Н. Разработка аналитического алгоритма составления расписания движения поездов метрополитена / Л. Н. Логинова, Е. А. Сеславина, А. И. Сеславин // Интеллектуальные транспортные системы: материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 26 мая 2022 года. — М.: Российский университет транспорта, 2022. — С. 221–225.
50. Бакулин А. С. Организация движения поездов и работа станций метрополитена / А. С. Бакулин, В. А. Пронин, Е. А. Федоров и др. — М.: Транспорт, 1981. — 230 с.
51. Балакина Е. П. Алгоритм оперативного управления линией метрополитена для восстановления движения по плановому графику / Е. П. Балакина, М. И. Щеглов, Е. В. Ерофеев // Наука и техника транспорта. — 2015. — № 1. — С. 23–25.

*TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 2, pp. 178–192*  
 DOI: [10.20295/2412-9186-2023-9-02-178-192](https://doi.org/10.20295/2412-9186-2023-9-02-178-192)

### Development of Information Support for Intelligent Control of Urban Rail Transport Systems

#### Information about authors

**Sidorenko V. G.**, Doctor in Engineering, Professor, Department Professor.  
 E-mail: [valenfalk@mail.ru](mailto:valenfalk@mail.ru)

**Loginova L. N.**, PhD in Engineering, Associate Professor, Department Associate Professor. E-mail: [ludmilanv@mail.ru](mailto:ludmilanv@mail.ru)

**Safronov A. I.**, PhD in Engineering, Associate Professor, Department Associate Professor. E-mail: [safronov-ai@mail.ru](mailto:safronov-ai@mail.ru)

Russian University of Transport (MIIT), Department “Management and Protection of Information”, Moscow

**Abstract:** The article discusses generalized approaches used in designing information support for intelligent transportation systems, based on the example of a train dispatcher simulator and an automated system for building schedules of passenger trains movement in the Moscow Metro as interrelated systems within a unified technological process of organizing the movement of rolling stock along the lines of the Moscow metro, Moscow Central Circle, Moscow Central Diameters, and the city's tram network. The article analyzes the existing systems developed by the team of the “Management and Protection of Information” department at the Russian University of Transport (MIIT) for the State Unitary Enterprise “Moscow Metro”, an integral part of which are information systems. Common properties of the systems are identified for information support, and a classification of tables serving as the basis for implementing urban rail transport management systems is proposed. The article lists the properties that the designed information support of the intelligent transport system must possess, and proposes a methodology for its

construction. The article presents the structures and functional features of information systems used for building an intelligent transportation system, including the content of databases that serve as a link between the upper interface and lower technical levels. The selection of the database management system is also justified.

**Keywords:** information support; database; database management systems; transportation systems; automation; knowledge testing; simulator; failure situations; transportation process; train movement modeling.

#### References

1. Sergeev V. V. Realizatsiya politiki importozameshcheniya v transportnoy otrasli sovremennoy rossiyskoy ekonomiki [Implementation of import substitution policy in the transport industry of modern Russian economy]. *Poisk: Politika. Obshchestvovedenie. Iskusstvo. Sotsiologiya. Kultura* [Search: Politics. Social science. Art. Sociology. Culture]. 2016, vol. 5, Iss. 58, pp. 25–34. (In Russian)
2. Alexeeva N. A., Abasheva O. Yu., Rednikov V. L. Makroekonomicheskie parametry Rossiyskoy ekonomiki v period ekonomicheskikh sanktsiy [Macro-economic parameters of the Russian economy during economic sanctions]. *Russian Economic Bulletin*, vol. 5, Iss. 3, 2022, pp. 67–74. (In Russian)
3. Kurenkov P. V., Safronova A. A., Madyar O. N. et al. Vliyaniye ekonomicheskikh sanktsiy na razvitiye promyshlennogo kompleksa i transportnoy sistemy Rossiyskoy Federatsii [The impact of economic sanctions on the development of the industrial complex and transportation system of the Russian Federation]. *Ekonomika zheleznnykh dorog* [Railway economics]. 2022, Iss. 4, pp. 45–57. (In Russian)
4. *Zavody Rossii — promyshlennyye predpriyatiya i proizvodstva: Transportnaya sistema Rossii* [Factories of Russia — Industrial enterprises and productions: Transportation system of Russia]. Available at: <https://xn--80aegj1b5e.xn--p1ai/publication/transportnaya-sistema-rossii> (accessed: May 13, 2022). (In Russian)
5. Safronov A. I. Podkhody k avtomatizirovannomu sostavleniyu planovykh grafikov dvizheniya passazhirskikh poezdov Moskovskogo metropolitena, obespechivayushchie ekonomichnyye, komfortnyye i bezopasnyye perevozki

- [Approaches to automated scheduling of passenger train traffic on the Moscow Metro, providing economic, comfortable and safe transportation]. *Aktualnye problemy tekhnosfernoy bezopasnosti: sbornik trudov III natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii ROAT, Moscow, March 30–31, 2021* [Actual problems of technosphere safety: Proceedings of the III National Scientific and Practical Conference ROAT, Moscow, March 30–31, 2021]. Moscow: ROAT, RUT (MIIT) Publ., 2021, pp. 141–147. (In Russian)
6. Loginova L. N., Seslavina E. A., Seslavin A. I. Metodika sostavleniya raspisaniya dvizheniya poezdov dlya stolichnogo metropolitena [Method of train scheduling for the metropolitan subway]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2022, vol. 8, Iss. 1, pp. 67–77. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-1-67-77. (In Russian)
  7. Sidorenko V. G. *Sovremennye vyzovy bezopasnosti gorodskikh transportnykh sistem. Problemy upravleniya bezopasnost'yu slozhnykh sistem: materialy XXVIII mezhdunarodnoy konferentsii* [Modern challenges of the safety of urban transport systems. Problems of managing the safety of complex systems: materials of the XXVIII international conference]. Moscow: IPU RAN Publ., 2020, pp. 434–439. DOI: 10.25728/iccss.2020.35.36.079. (In Russian)
  8. Safronov A. I., Lysenko E. V. Modelirovanie plana perevozhnogo protsessu v utrennii chas pik na zamknoy Bol'shoi koltsevoi linii Moskovskogo metropolitena [Modeling of transport process plan during morning rush hour on a closed Great Circular Line of the Moscow Metro]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2021, vol. 7, Iss. 4, pp. 584–616. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-4-584-616. (In Russian)
  9. Iskakov T. A., Safronov A. I., and Sidorenko V. G. Podkhody k otsenke kachestva planirovaniya i upravleniya dvizheniem passazhirkh poezdov metropolitena [Approaches to evaluating the quality of planning and managing the movement of subway passenger trains]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2020, vol. 6, Iss. 1, pp. 38–63. DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-1-38-63. (In Russian)
  10. Nikolaev K. Yu. Primenenie tekhnologii "tramvai — poezd" v Rossii. Trebovaniya k podvizhnomu sostavu i tekhnologicheskoe obespechenie vzaimodeistviya transportnykh sistem [Application of the "tram — train" technology in Russia. Requirements to rolling stock and technological support for interaction between transport systems]. *Nauka 1520 VNIIZHT: Zaglyani za gorizont: sbornik materialov nauchno-prakticheskoi konferentsii AO "VNIIZHT", Shcherbinka, 26–27 avgusta 2021 goda* [Nauka 1520 VNIIZHT: Look beyond the horizon: collection of materials of the scientific and practical conference of JSC VNIIZHT, Shcherbinka, August 26–27, 2021]. Shcherbinka: AO "VNIIZHT" Publ., 2021, pp. 132–138. (In Russian)
  11. Gorbachev A. M., Vasil'enko P. A. Avtomatizatsiya planirovaniya dvizheniya gorodskogo skorostnogo legkorel'sovogo transporta [Automation of planning the movement of urban high-speed light rail transport]. *Transport Rossiiskoi Federatsii* [Transport Russian Federation]. 2021, Iss. 5-6 (96-97), pp. 43–46. (In Russian)
  12. Borodina E. V., Dmitriev E. O., Gorbinov G. G. et al. Organizatsiya mestnoy raboty v Moskovskom zheleznodorozhnom uzle v usloviyakh organizatsii diametral'nogo dvizheniya prigorodno-gorodskikh poyezdov [Organization of large volumes of work in the Moscow railway junction in the conditions of measuring the diameter of the movement of suburban-urban trains]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of Transport of the Volga Region]. 2021, Iss. 1(85), pp. 33–44. (In Russian)
  13. Evreenova N. Yu., Romenkii D. Yu., Kalinin K. A. Sovershenstvovanie sistemy propuska elektropoezdov na uchastkakh s intensivnym dvizheniem [Improving the system for passing electric trains in areas with heavy traffic]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State Communication of Communications]. 2021, Iss. 1(81), pp. 88–96. DOI: 10.46973/0201-727X\_2021\_1\_88. (In Russian)
  14. Safronov A. I., Dyatlova A. A. *Prognozirovanie planovykh razmerov dvizheniya na perspektivnykh moskovskikh tsentral'nykh diametrah pri ispol'zovanii intellektual'noy sistemy "ARM grafista". Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 26 maya 2022 goda* [Forecasting of the planned movement values on promising Moscow central diameters in the assembly of the intelligent system "Workstation of a graphist". Intelligent Transport Systems: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Moscow, May 26, 2022]. Moscow: RUT Publ., 2022, pp. 298–305. (In Russian)
  15. Baranov L. A., Sidorenko V. G., Balakina E. P. et al. *Kompleksnoe reshenie zadach planirovaniya i upravleniya dvizheniem gorodskikh rel'sovykh transportnykh sredstv. Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 125-letiyu universiteta "Akademik Vladimir Nikolaevich Obraztsov — osnovopolozhnik transportnoy nauki"* [Complex solution of problems of planning and traffic control of urban rail vehicles. Proceedings of the international scientific and practical conference devoted to 125 anniversary of the university "Academician Vladimir Nikolaevich Obraztsov — the founder of transport science"]. Moscow: RUT (MIIT) Publ., 2021, pp. 56–64. DOI: 10.47581/2022/Obrazcov.09. (In Russian)
  16. Sidorenko V. G. Podkhod k formirovaniyu reytinga raboty mashinista s ispol'zovaniem razlichnykh metrik sravneniya [Approach to the rating of the driver's work using various comparison metrics]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport]. 2018, Iss. 1, pp. 14–17. (In Russian)
  17. Baranov L. A., Balakina E. P., Loginova L. N. *Printsipy postroyeniya avtomatizirovannykh sistem obucheniya i povysheniya kvalifikatsii ekspluatatsionnogo personala intellektual'nykh sistem upravleniya dvizheniem poezdov gorodskogo vneulichnogo transporta. Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 26 maya 2022 goda* [Principles of building automated systems for training and advanced training of operational personnel of intelligent control systems for the movement of trains of urban off-street transport. Intelligent transport systems: materials of the International scientific-practical conference, Moscow, May 26, 2022]. Moscow: RUT Publ., 2022, pp. 45–48. (In Russian)
  18. Balakina E. P., Kulagin M. A., Loginova L. N., et al. *Obespechenie bezopasnosti primeneniya rechevykh tekhnologiy v rabote operativnogo personala gorodskikh rel'sovykh transportnykh sistem. Problemy upravleniya bezopasnost'yu slozhnykh sistem: materialy XXIX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 15 dekabrya 2021 goda* [Safety management of the use of speech technologies in the work of operational personnel of urban rail transport systems. Problems of managing the safety of complex systems: materials of the XXIX international scientific and practical conference, Moscow, December 15, 2021]. Moscow: Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences Publ., 2021, pp. 355–361. DOI: 10.25728/iccss.2021.94.35.056. (In Russian)
  19. Baranov L. A., Sidorenko V. G. Intellektual'nye kiberfizicheskie sistemy upravleniya dvizheniem vneulichnogo transporta (chast' 2) [Intelligent cyber-physical control systems for off-street traffic (part 2)]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport construction]. 2021, Iss. 4, pp. 19–23. (In Russian)
  20. Baranov L. A., Sidorenko V. G., Balakina E. P. et al. Integratsionnyy podkhod v obucheniye operativnykh rabotnikov gorodskikh rel'sovykh transportnykh sistem [Integration approach in training operational workers of urban rail transport systems]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2021, Iss. 2, pp. 22–31. (In Russian)
  21. Baranov L. A., Goldenberg V. F., Maksimov V. M. et al. Automatiche und energioptimale Zugsteuerung. *Eisenbahningenieur*, 2018, Iss. 11, pp. 20–25.
  22. Krmac E., Djordjevic B. An evaluation of train control information systems for sustainable railway using the analytic hierarchy process (AHP) model. *European Transport Research Review*, 2017, Iss. 9, pp. 35. DOI: 10.1007/s12544-017-0253-9.
  23. Boyd K., Eng K. H., Page C. D. Area under the precision-recall curve: Point estimates and condence intervals. *Joint European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, pp. 451–466.

24. Chawla N., Bowyer K., Hall L. et al. SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2002, pp. 321–357.
25. Khromov S. K., Kulagin M. A., Sidorenko V. G. Machine learning application for support for automated control systems users. *Journal of Physics: Conference Series, Computer-Aided Technologies in Applied Mathematics*, 7–9 September 2020. Tomsk: Tomsk State University, 2020, vol. 1680. DOI: 10.1088/1742-6596/1680/1/012019.
26. Baranov L. A., Sidorenko V. G. Intellektual'nye kiberfizicheskie sistemy upravleniya dvizheniem vneulichnogo transporta [Intelligent cyber-physical systems for off-street traffic control]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport construction]. 2021, Iss. 3, pp. 27–29. (In Russian)
27. Vasil'eva M. A., Dolzhikova A. A. Energoptimal'nye traektorii dlya metropoezdov Energy-optimal trajectories for metro trains]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2007, vol. 5, Iss. 3(19), pp. 38–41. (In Russian)
28. Baranov L. A., Maksimov V. M., Kuznetsov N. A. Energy-optimal control of vehicle traffic. *Russian Electrical Engineering*, 2016, vol. 87, Iss. 9, pp. 498–504. DOI: 10.3103/S1068371216090030.
29. Baranov L. A., Sidorenko V. G., Balakina E. P. et al. Minimization of Energy Consumption for Urban Rapid-Transit Traction. *Russian Electrical Engineering*, 2021, vol. 92, Iss. 9, pp. 492–498. DOI: 10.3103/S1068371221090030.
30. Sidorenko V. G. Avtomatizatsiya sinteza planovogo grafika dvizheniya poezdov metropolitena [Automation of the synthesis of the planned subway train schedule]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2004, Iss. 2, pp. 48–57. (In Russian)
31. Sidorenko V. G., Safronov A. I. Postroenie planovogo grafika dvizheniya dlya metropolitena [Development of a scheduled movement plan for the metro]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2011, Iss. 9(3), pp. 98–105. (In Russian)
32. Sidorenko V. G., Safronov A. I., Filipchenko K. M. Avtomatizatsiya planirovaniya raboty EPS metropolitena [Automation of subway rolling stock scheduling]. *Mir Transporta* [World of Transport]. 2015, Iss. 13(4), pp. 154–165. (In Russian)
33. Sidorenko V. G., Chzho M. A. Primenenie geneticheskikh algoritmov k resheniyu zadachi planirovaniya raboty elektropodvizhnogo sostava metropolitena [Application of genetic algorithms to the problem of subway rolling stock scheduling]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Application of genetic algorithms to solving the problem of planning the operation of the electric rolling stock of the subway]. 2016, Iss. 6, pp. 13–16. (In Russian)
34. Safronov A. I., Starovoitova, U. A. *Antologiya zadach organizatsii graficheskogo pol'zovatel'skogo interfeysa v intellektual'noy sisteme "ARM grafista"*. *Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Anthology of problems organizing graphical user interfaces in the intelligent system "Graphist's workstation". Intelligent transport systems: materials of the International scientific and practical conference]. Moscow: RUT (MIIT) Publ., 2022, pp. 326–337. (In Russian)
35. Gaev D. V., Ershov A. V., Baranov L. A. et al. Vnedrenie energosberegayushchikh tekhnologiy [Introduction of energy-saving technologies]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2010, Iss. 8(3), pp. 3–8. (In Russian)
36. Baranov L. A., Brodskiy Yu. A., Grechishnikov V. A. et al. Otsenka effektivnosti ispol'zovaniya statsionarnykh emkostnykh nakopiteley energii v metropolitene na osnove eksperimental'nykh zamerov pokazateley raboty sistemy tyagovogo electrosnabzheniya [Estimation of the effectiveness of stationary capacitive energy storage devices in the subway based on experimental measurements of the performance of the traction power supply system]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2010, Iss. 1, pp. 62a–65. (In Russian)
37. Baranov L. A., Kuznetsov N. A., Maksimov V. M. Energoptimal'noe upravlenie dvizheniem transportnykh sredstv [Energy-optimal control of vehicle movement]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2016, Iss. 9, pp. 12–18. (In Russian)
38. Baranov L. A., Sidorenko V. G., Balakina E. P. et al. Minimizatsiya raskhoda energii na tyagu poezdov vneulichnogo gorodskogo transporta [Minimizing energy consumption on the traction of trains in non-street urban transport]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2021, Iss. 9, pp. 26–34. DOI: 10.53891/00135860\_2021\_9\_26. (In Russian)
39. Alekseev V. M., Baranov L. A., Kulagin M. A. et al. Postroenie arkhitektury intellektual'noy sistemy upravleniya gorodskoy rel'sovoy transportnoy sistemoi [Construction of the architecture of an intelligent system for managing the city rail transport system]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2021, vol. 19, Iss. 1(92), pp. 18–46. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-1-18-46. (In Russian)
40. Yurasov V. G. Organizatsiya informatsionnogo obespecheniya sistem upravleniya [Organization of information support for management systems]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Voronezh State Technical University]. 2013, vol. 9, Iss. 3-1, p. 163. (In Russian)
41. Shorikov A. F., Vinogradova E. Yu. Razrabotka informatsionnoy sistemy kompleksnogo upravleniya predpriyatiem [Development of an information system for integrated enterprise management]. *Prikladnaya informatika* [Applied Informatics]. 2007, Iss. 5(11), pp. 23–35. (In Russian)
42. *Microsoft Learn: priobretenie navykov, kotorye otkryvayut put' k kar'ernomu rostu: Opisanie normalizatsii bazy dannykh* [Microsoft Learn: acquiring skills that pave the way to career advancement: Description of database normalization]. Available at: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/office/troubleshoot/access/database-normalization-description> (accessed: October 27, 2022). (In Russian)
43. Varga S., Cherry D., D'Antoni J. *Introducing Microsoft SQL Server 2016: Mission-Critical Applications, Deeper Insights, Hyperscale Cloud*. Redmond, 98052-6399 (Washington): Microsoft Press, 2016, 199 p. ISBN 978-1-5093-0195-9.
44. Sebastian J., Aelterman S. *The Art of SQL Server Filestream*. Simpletalk Publishing, 2012, 486 p. ISBN 978-1-906434-88-5.
45. Ben-Gan I. *Microsoft SQL Server 2012 T-SQL Fundamentals*. Sebastopol, 95472 (California): SolidQ, 2012, 412 p. ISBN 978-0-735-65814-1.
46. Cote C., Lah M., Sarka D. *SQL Server 2017 Integration Services Cookbook*. Birmingham (UK): Packt Publishing Ltd, 2017, 534 p. ISBN 978-1-78646-182-7.
47. Thomas S. M. *PostgreSQL High Availability Cookbook: SE*. Birmingham, B3 2PB (UK): Packt Publishing Ltd., 2017, 940 p. ISBN 978-1-78712-553-7.
48. Hellerstein J. M. Looking back at Postgres. *ArXiv*, 2019. DOI: abs/1901.01973.
49. Loginova L. N., Seslavina E. A., Seslavin A. I. *Razrabotka analiticheskogo algoritma sostavleniya raspisaniya dvizheniya poezdov metropolitena. Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 26 maya 2022 goda* [Development of an analytical algorithm for scheduling the movement of metro trains. Intelligent transport systems: materials of the International Scientific and Practical Conference, Moscow, May 26 2022]. Moscow: Rossiyskiy universitet transporta Publ., 2022, pp. 221–225. (In Russian)
50. Bakulin A. S., Pronin V. A., Fedorov E. A. et al. *Organizatsiya dvizheniya poezdov i rabota stantsiy metropolitena* [Organization of train traffic and operation of metro stations]. Moscow: Transport Publ., 1981, 230 p. (In Russian)
51. Balakina E. P., Shcheglov M. I., Erofeev E. V. Algoritm operativnogo upravleniya liniei metropolitena dlya vosstanovleniya dvizheniya po planovomu grafiku [Operational control algorithm for the metro line to restore traffic according to the planned schedule]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2015, Iss. 1, pp. 23–25. (In Russian)

УДК 519.876.5+681.518.5+656.25

# ТЕХНОЛОГИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

**КОНСТАНТИНОВА Татьяна Юрьевна**, канд. техн. наук, доцент кафедры; e-mail: at-tanya@mail.ru  
**ЛЫКОВ Андрей Александрович**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: bastdrew@mail.ru  
**МАРКОВ Дмитрий Спиридонович**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: MDS1945@yandex.ru  
**НАСЕДКИН Олег Андреевич**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: nasedkin@crtc.spb.ru  
**СОКОЛОВ Вадим Борисович**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: SVB9@yandex.ru

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

Целью данной статьи является обобщение опыта и формирование понятийного аппарата имитационного моделирования в области исследования и обоснования системотехнических решений, принимаемых на различных этапах жизненного цикла систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Для решения поставленной задачи использованы системный подход и формализация основных положений и проблем имитационного моделирования на системотехническом уровне. Сформулированы термины и определения, в совокупности образующие понятийный аппарат в рассматриваемой предметной области. На основе введенного понятийного аппарата предложена технология имитационного моделирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики на системном уровне. Указано, что имитационная модель сложной системы сама является сложной системой со своим жизненным циклом, представленным в виде предложенной технологии моделирования. В качестве основной проблемы применения метода имитационного моделирования выделена его неструктурированность. Для решения этой проблемы предложено использовать различные способы формализации на всех этапах жизненного цикла имитационных моделей. Предложенный понятийный аппарат обеспечивает более высокое качество коммуникативности и обучения участников решению системотехнических проблем с использованием методологии имитационного моделирования. Технология имитационного моделирования применялась и продолжает применяться на различных этапах жизненного цикла микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики.

**Ключевые слова:** системы железнодорожной автоматики и телемеханики; имитационная модель; жизненный цикл; понятийный аппарат; технология имитационного моделирования.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-193-204

## ▼ Введение

Целесообразность применения методологии имитационного моделирования определяется как свойствами систем железнодорожной автоматики и телемеханики, так и сложностью задач, решаемых на различных этапах их жизненного цикла (ЖЦ). Объектом моделирования являются натурные или виртуальные объекты (например, разрабатываемая система), а именно — собственно устройства и системы железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ), а также системы обеспечения их жизненного цикла (СОЖЦ). К СОЖЦ СЖАТ относятся: система доказательства безопасности и сертификации СЖАТ на безопасность; системы автоматизированного

проектирования и электронного документооборота технической документации; системы диспетчерского контроля и на их основе технической диагностики и удаленного мониторинга технического состояния устройств ЖАТ; системы автоматизированного управления службы сигнализации, централизации и блокировки АСУ-Ш-2, системы технической эксплуатации СЖАТ. Далее СЖАТ и СОЖЦ, если нет необходимости указывать различия, определяются как СЖАТ.

СЖАТ являются сложными системами и характеризуются следующими особенностями:

- СЖАТ совместно с объектом управления образуют сложный автоматизированный

- технологический комплекс станции, перегона, сортировочной горки, участка;
- выполнение множества технологических функций;
- выполнение функций с обеспечением контроля условий безопасности движения поездов;
- реализация СЖАТ в виде сложных аппаратно-программных комплексов;
- реализация технологических функций программными средствами;
- обеспечение защищенности от опасных отказов аппаратных, аппаратно-программных и программных средств систем;
- иерархическая структура;
- человеко-машинные системы со сложным интерфейсом;
- распределение функций по уровням иерархии и между техническими средствами и человеком-оператором;
- функционирование в реальном масштабе времени;
- территориальная распределенность устройств и подсистем;
- сложные взаимосвязи систем различных объектов управления (перегон, станция, переезд, сортировочная горка, подвижные объекты);
- большое количество разнородных элементов со сложными связями;
- долгосрочность функционирования;
- наличие большого количества иногда противоречивых нормативных документов различного статуса;
- необходимость системы технической эксплуатации, обеспечивающей поддержку работоспособного состояния систем на протяжении всего периода технологической эксплуатации;
- сложный, многоэтапный, длительный по времени ЖЦ СЖАТ;
- воздействие внешней среды, включая климатические, электромагнитные, механические, электрохимические.

Приведенные свойства СЖАТ как сложных систем определяют сложность и многоэтапность их ЖЦ. ЖЦ СЖАТ — это совокупность взаимосвязанных, последовательно выполняемых процессов от формирования концепции

безопасности и исходных требований к устройству или системе железнодорожной автоматики и телемеханики до вывода из эксплуатации и утилизации. ЖЦ СЖАТ включает следующие основные процессы:

- разработка эксплуатационно-технических требований;
- разработка концепции безопасности и соответствующих документов;
- разработка аппаратно-программных решений и конструкторско-технической документации в виде альбомов типовых решений;
- доказательство безопасности принятых технических, программных решений и подтверждение соответствия или сертификация на безопасность;
- тиражирование — проектирование аппаратно-программных средств СЖАТ для конкретных объектов железнодорожного транспорта и их изготовление по заказным спецификациям проекта;
- выполнение по проекту строительных, монтажных и пусконаладочных работ на объекте, проведение соответствующих испытаний и ввод в эксплуатацию;
- технологическая, техническая эксплуатация и модернизация в процессе эксплуатации;
- прекращение тиражирования и выполнение процедур вывода СЖАТ из эксплуатации и утилизация на конкретных объектах.

Практически на всех этапах ЖЦ СЖАТ для решения различных системотехнических и системотехнических задач разрабатываются и применяются соответствующие инструментальные средства на основе имитационных моделей (ИМ) и методов моделирования, а именно:

- ИМ и методы оценки технологической и технической эффективности принимаемых системотехнических решений (выбор функциональной, информационной, технической, программной структур; разработка систем автоматизированного проектирования и электронного документооборота; организация технологической и технической эксплуатации систем и т. п.);

- имитаторы и эмуляторы в качестве отладочных комплексов для разработчиков аппаратно-программных средств, схемотехнических и программных решений, а также для испытаний на этапе доказательства работоспособности и безопасности функционирования устройства и (или) СЖАТ;
- имитаторы и эмуляторы в качестве инструментальных средств проектирования и при модернизации в процессе эксплуатации;
- ИМ и методы оценки вероятностных показателей надежности и безопасности технических решений;
- ИМ как основа автоматизированных обучающих комплексов;
- гибридные экспертные системы на основе ИМ.

Известны два класса задач моделирования автоматизированных систем управления и СЖАТ, в частности схемотехнические и системотехнические. В каждом классе существует множество возможных постановок задач и методов их решения, как детерминированных, так и стохастических.

Далее рассматриваются вопросы синтеза имитационных моделей системного уровня [1–3], предназначенных для оценки системотехнических решений, включая оценку вероятностных показателей надежности и безопасности устройств и систем ЖАТ.

В настоящее время известны следующие парадигмы имитационного моделирования сложных систем:

- системная динамика [1, 2];
- агентное моделирование [4];
- непрерывное процессное моделирование;
- дискретно-событийное моделирование;
- процессное дискретно-событийное моделирование [5].

Транспортные системы, включая системы оперативного управления движением и эксплуатационной работой, являются достаточно жестко регламентированными системами реального времени, в которых важнейшим фактором выполнения технологических процессов является время. В соответствии с этим для системного моделирования необходим

процессный дискретно-событийный подход. Реализация такого подхода возможна на основе следующих математических схем и способов:

- конечные автоматы, вероятностные автоматы,
- сети Петри,
- схемы массового обслуживания.

Массовый характер транспортных процессов и определяющее значение временных параметров перевозочного процесса определяют выбор для моделирования СЖАТ, математической схемы массового обслуживания [6, 7].

СЖАТ и автоматизированные технологические комплексы в целом в качестве систем массового обслуживания (СМО) характеризуются:

- многоканальностью;
- многофазностью;
- многофункциональностью;
- разнообразными связями элементов;
- наличием сложной системы приоритетов и дисциплины обслуживания заявок, т. е. являются сложными системами массового обслуживания (ССМО).

Очевидно, что наиболее эффективным, а в большинстве случаев единственным методом исследования таких систем является метод имитационного моделирования.

Подход к исследованию СЖАТ как ССМО определяет требования к инструментальным средствам моделирования, а именно: ведение модельного времени, наличие средств представления объектов моделируемой системы, ведение параллельных процессов, генерация случайных величин и событий, генерация потоков событий, выполнение вычислительных и логических операций в процессе моделирования, организация и ведение различных списковых структур, организация выполнения отдельных имитационных экспериментов (ИЭ) и серий ИЭ (СИЭ), накопление и предварительная обработка результатов моделирования, наличие средств отладки и диагностики моделирующих программ. Практически полностью технические проблемы имитационного моделирования систем с указанными характеристиками решаются выбором специализированного инструментального средства — GPSS World [8, 9], которое, несмотря на

солидный возраст, имеет широкое применение в процессе изучения различных дисциплин в высших учебных заведениях и развивается в настоящее время зарубежными и отечественными специалистами [10].

Целью моделирования всегда является получение новой информации о моделируемой системе или процессе. Информацию можно извлекать, приобретать, хранить, обрабатывать, передавать и использовать для решения конкретных системотехнических задач. Следует отметить, что технология имитационного моделирования обеспечивает реализацию всех указанных процессов в данной предметной области и, следовательно, является мощным инструментом обучения. К сожалению, общего определения понятия информации с учетом семантики и количественных характеристик не существует, поэтому практически в каждой предметной области это понятие описывается определенным набором свойств.

Многолетний опыт синтеза ИМ и выполнения имитационных исследований, проводимых на кафедре «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ПГУПС, в области обоснования системотехнических и схемотехнических решений на различных этапах ЖЦ СЖАТ, например [7, 11], позволил выделить следующий набор свойств информации как результата моделирования:

- полезность относительно цели моделирования и при наличии у субъекта требуемого уровня базовых знаний в данной предметной области;
- нетривиальность относительно достигнутого ранее базового уровня знаний в данной предметной области;
- полнота — достаточность по семантике для решения поставленной задачи;
- достоверность семантическая и статистическая (для стохастических систем) относительно цели моделирования;
- своевременность относительно сроков выполнения проектов в целом;
- объективность, определяемая уровнем независимости от субъективных предпочтений разработчиков и пользователей ИМ;

- эргономичность, определяемая степенью удовлетворения потребностей пользователя по интерфейсам с ИМ.

Конкретное семантическое содержание и количественные характеристики указанных свойств определяются свойствами исследуемой СЖАТ и целью моделирования, а качество информации, как результатов моделирования, определяется характеристиками ИМ и процесса моделирования.

## 1. Основные понятия, термины и определения

Принципы формирования понятийного аппарата:

- 1) определяющее значение знания на современном уровне предметной области и детальное знание моделируемой СЖАТ для получения в результате моделирования информации с приведенными выше свойствами;
- 2) корректность формулировки целей моделирования на основе п. 1;
- 3) формализация для снижения субъективности результатов моделирования;
- 4) возможность пооперационного отслеживания выполнения в ИМ моделируемых процессов;
- 5) иерархичность (вложенность) ИМ в соответствии с иерархичностью структуры и (или) процессов, выполняемых и (или) происходящих в СЖАТ;
- 6) отображение в ИМ в явном виде объектов моделируемой СЖАТ;
- 7) воспроизведение в явном виде процессов, выполняемых и (или) происходящих в моделируемой СЖАТ (виртуальная реальность);
- 8) обеспечение требуемых свойств информации, особенно объективности и семантической достоверности;
- 9) возможность синтеза моделирующих алгоритмов, в которых свойства СЖАТ как ССМО записываются на уровне исходных данных;
- 10) возможность оценки широкого спектра операционных характеристик СЖАТ как ССМО;

Следует отметить, что нормативная база в области моделирования сложных технических систем явно не соответствует потребностям большого объема практического применения методологии имитационного моделирования. Действующие в настоящее время стандарты (ГОСТ Р 57412—2017, ГОСТ Р 57700—2017, ГОСТ Р 57188—2016) посвящены методам вычислительной математики, компьютерного моделирования в целом, вскользь рассматривают проблемы имитационного моделирования сложных систем и практически не содержат развитого понятийного аппарата. Это определило необходимость формирования соответствующего понятийного аппарата в области имитационного моделирования СЖАТ.

ИМ и метод имитационного моделирования СЖАТ идентифицируются следующим понятийным аппаратом.

**Определение 1.1. Имитационная модель системы железнодорожной автоматики:** программный аналог, подобный моделируемой системе относительно цели моделирования.

**Определение 1.2. Прямая имитационная модель:** моделирующая программа, в которой в явном виде установлено соответствие виртуальных объектов модели реальным или виртуальным объектам моделируемой системы с учетом их взаимосвязей.

**Определение 1.3. Процессная имитационная модель:** моделирующая программа, воспроизводящая выполняемые системой процессы и (или) процессы, происходящие в ней в модельном времени.

**Определение 1.4. Имитационная модель надежности и безопасности системы железнодорожной автоматики и телемеханики:** прямая процессная моделирующая программа, воспроизводящая дискретные процессы отказов, обнаружения отказов элементов и восстановления работоспособного (исправного) состояния системы с целью оценки вероятностных показателей надежности и безопасности моделируемой системы.

**Определение 1.5. Функционально-алгоритмическая имитационная модель:** прямая процессная моделирующая программа, построенная по алгоритмическому описанию процессов обслуживания заявок в СЖАТ,

формализованных как сложные системы массового обслуживания.

**Определение 1.6. Морфологическая имитационная модель:** прямая, процессная моделирующая программа, построенная по структурному описанию СЖАТ.

**Определение 1.7. Динамическая порционная имитационная модель:** прямая, процессная моделирующая программа, построенная на основе порционной аппроксимации потоков заявок в СЖАТ.

**Определение 1.8. Адекватность имитационной модели:** степень соответствия имитационной модели моделируемому объекту относительно цели моделирования.

*Примечание:* адекватность является свойством имитационной модели, возможность применения которой для конкретных задач контролируется процедурами верификации и валидации на всех этапах ЖЦ модели.

**Определение 1.9. Верификация имитационной модели:** подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что установленные требования к имитационной модели СЖАТ выполнены.

**Определение 1.10. Валидация имитационной модели** — подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что требования, предназначенные для конкретного применения имитационной модели, выполнены.

*Примечание:* процедуры верификации отвечают на вопрос: «Сделано ли то, что предполагалось?», а валидации — «Допускается ли использовать то, что сделано для конкретных исследований?». Верификация — «взгляд» назад, а валидация — вперед по ЖЦ ИМ.

**Определение 1.11. Калибровка имитационной модели:** выполнение процедур тестирования и корректировки имитационной модели при неудовлетворительных результатах ее верификации и (или) валидации.

**Определение 1.12. Имитационный эксперимент:** единичный прогон имитационной модели с заданными значениями всех переменных и условий.

**Определение 1.13. Серия имитационных экспериментов:** целенаправленно организованная и проведенная в соответствии с заданным планом

последовательность имитационных экспериментов.

**Определение 1.14. Планирование имитационных экспериментов:** рациональная по затратам машинного времени последовательность имитационных экспериментов, спланированная в соответствии с целью моделирования.

**Определение 1.15. Тактическое планирование имитационных экспериментов:** планирование выполнения предварительных (контрольных) экспериментов для определения условий выполнения экспериментов по стратегическому плану.

*Примечания:*

1. Составление и проверка корректности функциональных спецификаций для выполнения детерминированных ИЭ.
2. Проверка принятых границ изменения управляемых переменных.
3. Оценка чувствительности и устойчивости значений операционных характеристик по крайним значениям управляемых переменных.
4. Определение условий окончания ИЭ.
5. Определение условий окончания выполнения СИЭ.
6. Результаты контрольных экспериментов частично могут использоваться совместно с результатами экспериментов по стратегическим планам.

**Определение 1.16. Стратегическое планирование стохастических имитационных экспериментов:** планирование выполнения серий имитационных экспериментов для оценки зависимостей операционных характеристик СЖАТ от управляемых переменных.

**Определение 1.17. Рандомизированный план стохастических имитационных экспериментов:** многофакторный план, в котором значения управляемых переменных в имитационных экспериментах задаются случайным образом из ограниченной области допустимых значений.

*Примечание:* ограничения на значения управляемых переменных накладываются на основе знания предметной области, здравого смысла и экспертных оценок.

**Определение 1.18. Стратегическое планирование детерминированных имитационных экспериментов:** планирование рациональной по

затратам машинного времени последовательности имитационных экспериментов, проводимой с целью проверки полноты и корректности выполнения функций СЖАТ.

**Примечание:** проверка соответствия выполнения функций СЖАТ функциональным спецификациям.

На основе предложенных определений сформулированы определения метода имитационного моделирования СЖАТ.

**Определение 1.19. Имитационное моделирование** — это (в широком смысле) многоэтапный процесс постановки задач моделирования; разработки, поэтапной верификации и валидации прямой процессной имитационной модели СЖАТ с целью обеспечения ее адекватности; планирования и проведения серий имитационных экспериментов; обработки и анализа результатов моделирования; разработки рекомендаций по системотехническим решениям.

**Определение 1.20. Имитационное моделирование** — это (в узком смысле) воспроизведение процессов, выполняемых реальной или виртуальной системой и (или) процессов, происходящих в ней, прямой процессной имитационной моделью в заданных условиях, определяемых целью моделирования.

Приведенные определения позволяют сформулировать основные (как положительные, так и отрицательные) свойства метода имитационного моделирования для моделирования СЖАТ:

- компьютер — не арифмометр, а средство имитации процессов, выполняемых системой по назначению и (или) происходящих в ней;
- возможность контроля и анализа имитируемого процесса поэтапно в текущем времени;
- отсутствие ограничений на вид и количество учитываемых в модели переменных и их взаимосвязей;
- оценка в одном ИЭ множества операционных характеристик объекта моделирования;
- возможность включения в одну ИМ объектов, представленных различными математическими схемами;

- возможность разработки на основе ИМ гибридных статических и динамических экспертных систем;
- развитие ИМ в соответствии с ЖЦ моделируемых систем;
- синтез ИМ — лучший способ обучения и изучения систем и процессов;
- неструктурированность и, как следствие, субъективность метода, что предъявляет высокие требования к формализации (структуризации) основных этапов разработки и применения имитационных моделей в конкретной предметной области;
- проблемы выбора инструментальных средств (известны более 300 специализированных языков и систем имитационного моделирования);
- проблемы выбора единицы и способа организации модельного времени;
- проблемы доказательства адекватности имитационных моделей;
- точечные оценки операционных характеристик;
- затратность процессов разработки, сопровождения имитационных моделей и выполнения СИЭ;
- неоднозначность понятийного аппарата и терминологии;
- отсутствие стандартов по методологии имитационного моделирования.

Введенные определения и сформулированные свойства позволяют выделить следующие определяющие характеристики применения метода имитационного моделирования для обоснования системотехнических решений в СЖАТ:

1. Метод основан на проведении имитационных экспериментов с ИМ СЖАТ и, следовательно, для стохастических систем и процессов предполагает использование методов математической статистики для обработки и оценки качества результатов моделирования. Детерминированные ИМ применяются для оценки полноты и корректности процессов функционирования СЖАТ [12].
2. Достоверность информации как результата моделирования ЖАТ имеет семантическую и статистическую составляющие и определяется адекватностью ИМ, полнотой и корректностью базовой и исходной информации, полнотой и корректностью планов ИЭ, их выполнения и применяемых методов обработки и представления информации [7, 13].
3. Метод имитационного моделирования по своей природе не структурирован.

Основным положительным следствием неструктурированности метода является то, что он практически не имеет ограничений на свойства моделируемого объекта, размерность и свойства решаемых задач. Основным недостатком является отсутствие теоретических положений и общей методологии синтеза ИМ, выполнения процессов и получение результатов моделирования. Это означает, что ИМ, разработанные для решения одних и тех же задач в одной и той же предметной области различными коллективами специалистов, могут кардинально различаться и давать различные результаты. Таким образом, следствием неструктурированности метода является субъективность результатов моделирования, что противоречит требуемому свойству объективности соответствующей информации. Следует отметить, что прямым подтверждением неструктурированности является наличие в мировой практике более 300 специализированных языков и инструментальных средств имитационного моделирования в различных предметных областях. Такое количество инструментальных средств объясняется попытками структурировать ИМ в конкретной предметной области для решения ограниченного круга задач.

Эффективным средством структурирования имитационных моделей является формализация СЖАТ по математической схеме массового обслуживания. С этой целью предложена обобщенная формализованная схема (ОФС) СЖАТ как ССМО. ОФС определяется следующим образом:

**Определение 1.21. Обобщенная формализованная схема** — это форма, определяющая состав и вид представления данных, включающая модель внешней среды; структурно-алгоритмическое и параметрическое описание СЖАТ как ССМО; множество операционных характеристик СЖАТ.

**Определение 1.22. Заявка** — это единичный объект, обрабатываемый системой массового обслуживания и характеризующийся типом, набором свойств и приоритетом.

**Примечание:** в качестве заявок, в зависимости от целей моделирования, могут выступать подвижные единицы, информационные сообщения, комплекты технических документов, электрические сигналы, требования на выполнение работ по техническому обслуживанию СЖАТ и т. п.

**Определение 1.23. Модель внешней среды** — это формализованное описание состава заявок и вероятностно-временных характеристик потоков заявок на обслуживание по всем входам ССМО.

**Примечание:** Внешние условия (климат, электромагнитная совместимость, механические воздействия) функционирования СЖАТ влияют на свойства устройств и их связей и должны учитываться в моделях этих устройств.

**Определение 1.24. Структурно-алгоритмическое отображение системы** — это формализованное описание элементов системы как обслуживающих устройств, дисциплины обслуживания заявок, связей между обслуживающими устройствами и выполняемых системой алгоритмов обслуживания заявок.

**Определение 1.25. Параметрическое отображение системы** — это математическое описание вероятностно-временных и детерминированных параметров процесса обслуживания заявок.

В ОФС СЖАТ как ССМО включены три группы операционных характеристик:

- 1) характеристики процесса обслуживания заявок;
- 2) структурные характеристики ССМО;
- 3) оптимизационные характеристики ССМО.

К характеристикам первой группы относятся:

- времена обслуживания и пребывания заявок в системе в целом и по типам заявок;
- времена обслуживания и пребывания заявок в подсистемах;
- вероятность своевременного обслуживания заявок в системе;
- вероятность своевременного обслуживания заявок подсистемами;
- количество одновременно обслуживаемых заявок;

- характеристики очередей на входах ССМО, ее подсистем и отдельных обслуживающих устройств;
- вероятность отказа в обслуживании;
- вероятность ожидания обслуживающего устройства (поезд);
- время ожидания обслуживающего устройства (поезд);
- количество заявок, покинувших очередь по максимальному времени ожидания.

К характеристикам второй группы относятся:

- пропускная способность системы;
- пропускная способность подсистем;
- коэффициенты загрузки подсистем;
- времена простоя подсистем;
- характеристики очередей на обслуживание заявок в отдельных подсистемах.

К третьей группе относятся комплексные показатели, учитывающие значения характеристик первой и второй групп и, как правило, имеющие экономический характер.

Следует отметить, что предложенный «классический» состав операционных характеристик СЖАТ как ССМО является открытым, может дополняться и изменяться при исследованиях конкретных систем.

## 2. Участники и технология моделирования

Как отмечалось ранее, по своей природе метод имитационного моделирования не структурирован и его методологию определяют как «науку и искусство» [14]. В процессе имитационных исследований взаимодействуют следующие участники:

- натуральный или виртуальный объект моделирования СЖАТ;
- участники-субъекты (эксперты, системные аналитики, программисты, пользователи имитационной модели, лица, принимающие системотехнические решения);
- инструментальные средства синтеза ИМ (в нашем случае GPSS World и компьютер);
- имитационная модель СЖАТ;
- информация (базовая, модель-описание, концептуальная модель, результаты моделирования).

В качестве инструментального средства для разработки ИМ СЖАТ выбрана среда

транзактного, процессного, дискретно-событийного моделирования сложных систем GPSS World, которая отвечает требованиям синтеза прямой, процессной модели СЖАТ как ССМО.

Следует отметить, что, хотя выбор инструментального средства имеет существенное значение, для успешных имитационных исследований СЖАТ определяющим является уровень знания современного состояния предметной области. При этом целесообразно использовать инструментальные средства, наибольший опыт применения которых имеется у разработчиков ИМ СЖАТ, даже несмотря на наличие на рынке программного обеспечения более современных систем моделирования. Подобное утверждение можно сформулировать и относительно средств автоматизации выполнения этапов подготовки ИМ, проведения серий ИЭ и обработки результатов моделирования. Эти средства положительно влияют на свойство информации — своевременность, но часто не обладают достаточной гибкостью, могут ограничивать круг выполняемых ИЭ, особенно на основе наиболее применимых в моделировании СЖАТ рандомизированных планов [15], и в значительной мере компенсируются опытом разработчиков, накопленным в процессе выполнения множества имитационных исследований СЖАТ.

Сформулированные в разделе 1 положения позволили предложить технологию имитационного моделирования СЖАТ (рис. 1), которая также может быть определена как ЖЦ ИМ [16].

ИМ разрабатывается системными аналитиками и программистами с привлечением экспертов в соответствии со сформулированными задачами конкретного этапа ЖЦ конкретной СЖАТ.

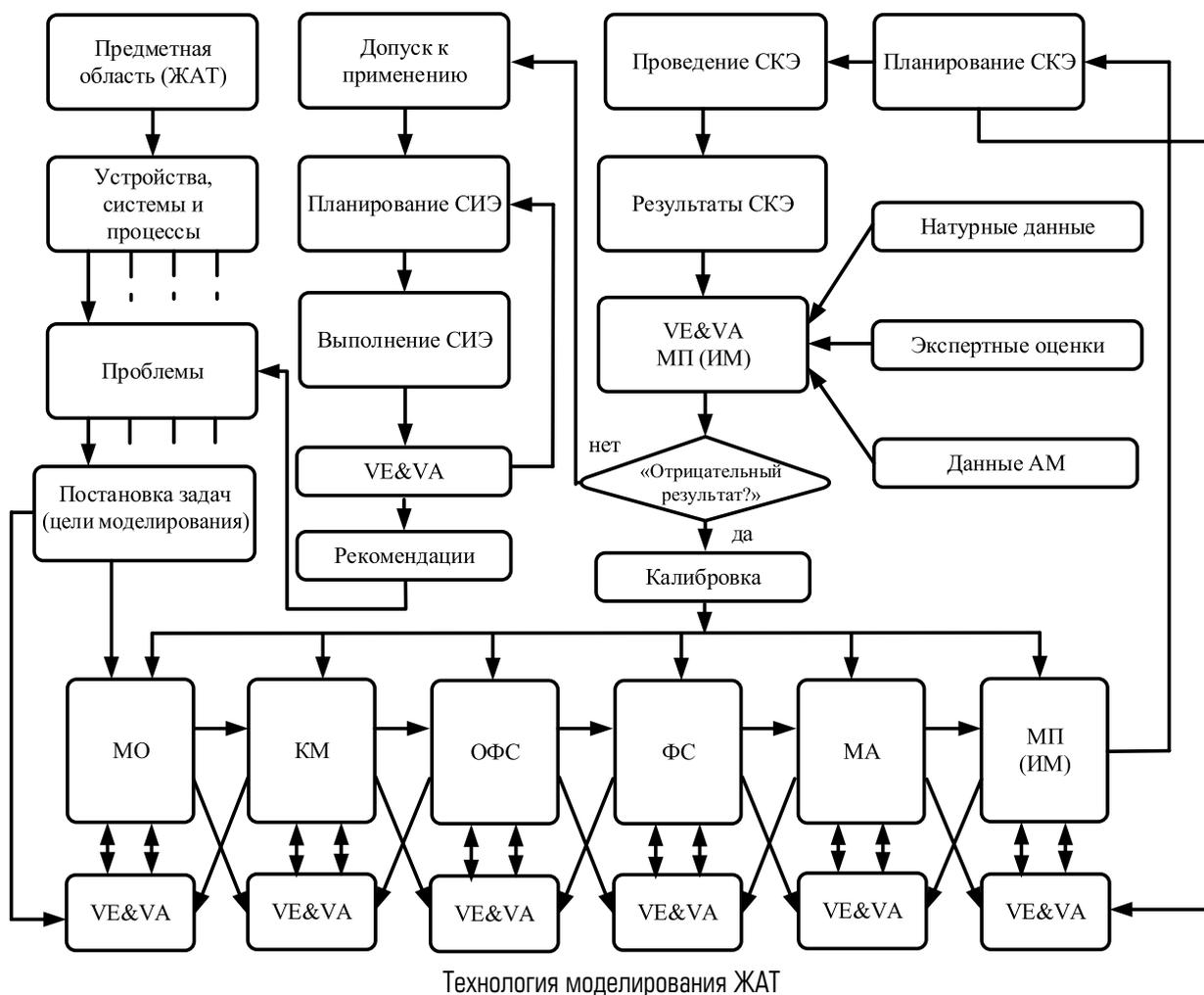
Важнейшим фактором успешного выполнения системного моделирования является качество базового уровня знаний об объекте моделирования. Базовый уровень знаний определяется опытом и квалификацией экспертов, системных аналитиков и формируется знанием нормативной документации, технической документации на объект моделирования и подобные объекты, технической литературы в предметной области, коммуникациями с другими разработчиками и должен постоянно пополняться и поддерживаться на высоком

уровне. На основе базового уровня знаний формируется модель-описание (МО), которая служит постоянно ведущейся базой данных по объекту моделирования.

Следует отметить, что одним из существенных источников ведения и корректировки базы данных МО являются результаты выполненного моделирования. В свою очередь, МО как база данных позволяет отобрать необходимую для данного исследования информацию и сформировать концептуальную модель (КМ) в соответствии с целями моделирования. Для повышения уровня объективности результатов системного моделирования ИМ СЖАТ структурируется как ССМО с использованием ОФС, которая определяет состав и вид исходной информации для синтеза модели. Формализованная схема исследуемой СЖАТ разрабатывается в соответствии с ОФС и концептуальной моделью. Таким образом, ОФС является «фильтром» информации МО и КМ для синтеза ФС СЖАТ, исследуемой с конкретными целями.

Полученная ФС позволяет разработать моделирующий алгоритм (МА), а на его основе моделирующую программу (МП) в среде GPSS World, которая и является ИМ СЖАТ. Язык GPSS является концептуально-выразительным и при достаточной квалификации системного аналитика и программиста МП ИМ может разрабатываться непосредственно по ФС, минуя стадию МА, с учетом организации управления СИЭ, сбора данных по операционным характеристикам и их предварительной обработки.

На каждом этапе разработки ИМ (МО, ФС, МА, GPSS-модель) выполняются процедуры верификации (VE) и валидации (VA) [17, 18]. Верификация подтверждает соответствие результатов выполнения данного этапа требованиям предыдущего, а валидация — возможность использования результатов данного этапа для выполнения следующего [19]. Так же верифицируются и валидируются результаты серий контрольных экспериментов (СКЭ). Процедуры VE & VA выполняются системными аналитиками с привлечением экспертов, с использованием данных по функционированию систем подобных моделируемой, результатам расчетов альтернативных моделей (АМ) и экспертных оценок [20, 21].



Технология моделирования ЖАТ

При отрицательных результатах VE и (или) VA выполняется корректировка данных этапов или калибровка GPSS-модели. Эти процедуры повторяются до получения доверия к результатам СКЭ экспертов, системных аналитиков и пользователей. Положительные результаты VE & VA обеспечивают допуск ИМ к планированию и выполнению СИЭ в рамках обеспечения информацией с требуемыми свойствами лиц, принимающих системотехнические решения.

ИМ СЖАТ сама является сложной системой с многоэтапным и длительным ЖЦ, что определяет необходимость документирования всех этапов, включая технологию проведения и результаты процедур VE & VA по всему ЖЦ ИМ СЖАТ [22]. Как правило, ИМ СЖАТ являются моделями многоразового применения, подлежат хранению и сопровождению в специальных фондах алгоритмов и программ организаций пользователей и (или) разработчиков.

### Заключение

В данной работе получены следующие результаты:

- обоснован выбор метода имитационного моделирования и математической схемы массового обслуживания для исследования и обоснования системотехнических решений в области СЖАТ;
- приведены свойства, которыми должна обладать информация, используемая для синтеза ИМ и получаемая в результате выполнения СИЭ;
- показана роль формализации процессов синтеза ИМ для получения объективной и семантически достоверной информации в результате выполнения СИЭ;
- сформулированы принципы построения понятийного аппарата в области имитационного моделирования СЖАТ и автоматизированных технологических комплексов;

- сформулирован комплекс терминов, определяющих предметную область — имитационное моделирование СЖАТ на системном уровне;
- введено понятие базового уровня знаний предметной области СЖАТ, и показано его значение для синтеза концептуальной модели и получения результатов моделирования (информации) с заданными свойствами;
- на основе сформулированного понятийного аппарата предложена технология имитационного моделирования СЖАТ, ключевыми моментами которой являются процедуры верификации, валидации этапов ЖЦ ИМ и моделирующей программы для решения конкретных системотехнических проблем на разных стадиях ЖЦ СЖАТ.

Дальнейшие работы по развитию понятийного аппарата в области имитационного моделирования СЖАТ авторы предполагают вести в следующих направлениях:

- разработка системы терминов и определений по моделированию процессов отказов и восстановления работоспособного состояния микропроцессорных СЖАТ с избыточной структурой с учетом средств функциональной и тестовой диагностики;
- разработка системы терминов и определений по синтезу ИМ и моделированию СЖАТ для оценки показателей надежности и безопасности с учетом временных характеристик периода диагностирования, обнаружения отказов и восстановления работоспособного состояния системы;
- разработка терминологии по инструментальным средствам на основе ИМ для этапов разработки технических решений, доказательства безопасности, проектирования ЖЦ СЖАТ;
- разработка нормативных документов по понятийному аппарату в области моделирования на системном уровне на всех этапах ЖЦ СЖАТ. ▲

### Библиографический список

1. Акопов А. С. Имитационное моделирование / А. С. Акопов. — М.: Юрайт, 2023. — 389 с.

2. Палей А. Г. Имитационное моделирование. Разработка имитационных моделей / А. Г. Палей, Г. А. Поллак. — СПб.: Лань, 2023. — 208 с.
3. Гончаренко А. Н. Моделирование систем. Возможности использования имитационного моделирования при формировании систем / А. Н. Гончаренко. — М.: МИСиС, 2020. — 42 с.
4. Ивашкин Ю. А. Мультиагентное моделирование в имитационной системе Simplex3 / Ю. А. Ивашкин. — М.: Лаборатория знаний, 2016. — 350 с.
5. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем / Т. И. Алиев. — СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. — 363 с.
6. Кудрявцев Е. М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем: монография / Е. М. Кудрявцев. — М.: ДМК Пресс, 2018. — 37 с.
7. Марков Д. С. Матричный метод формализации имитационных моделей сложных систем массового обслуживания / Д. С. Марков, П. Е. Булавский. — СПб.: Известия ПГУПС, 2010. — Вып. 4. — С. 186–195.
8. Девятков В. В. Руководство пользователя по GPSS World / В. В. Девятков. — Казань: Мастер Лайн, 2002. — 383 с.
9. Боев В. Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World / В. Д. Боев. — СПб.: БХВ-Петербург, 2004. — 348 с.
10. Девятков В. В. Имитационные исследования в среде моделирования GPSS STUDIO / В. В. Девятков, Т. В. Девятков, М. В. Федотов. — М.: ИНФРА-М, 2019. — 283 с.
11. Лыков А. А. Метод формализации имитационных моделей технологических процессов в хозяйстве автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте / А. А. Лыков, Д. С. Марков. — СПб.: Известия ПГУПС, 2012. — Вып. 1. — С. 23–38.
12. Советов Б. Я. Моделирование систем / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. — М.: Высшая школа, 2001. — 343 с.
13. Лоу А. М. Имитационное моделирование. Классика CS / А. М. Лоу, В. Д. Кельтон. — СПб.: BHV, 2004. — 846 с.
14. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем — искусство и наука / Р. Шеннон. — М.: Мир, 1978. — 287 с.
15. Бродский В. З. Введение в факторное планирование эксперимента / В. З. Бродский. — М.: Мир, 2019. — 224 с.
16. Balci O. A Life Cycle for Modeling and Simulation / O. Balci // Simulation. — 2012. — Vol. 88(7). — Pp. 870–883.
17. Balci O. Verification, validation and accreditation / O. Balci // Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference. — 1998. — Pp. 41–48.
18. Sargent R. G. Some approaches and paradigms for verifying and validating simulation models / R. G. Sargent // Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference. — 2001. — Pp. 106–114.
19. Law A. M. How to build valid and credible simulation models / A. M. Law, M. G. McComas // Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference. — 2001. — Pp. 22–29.
20. Carson J. S. Model verification and validation / J. S. Carson // Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference. — 2002. — Pp. 52–58.
21. Law A. M. Simulation Modeling and Analysis / A. M. Law, W. D. Kelton. — Fourth Edition. — McGraw-Hill, 2007. — 768 p.
22. Rabe M. Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik / M. Rabe, S. Spieckermann, S. Wenzel. — Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. — 195 p.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 2, pp. 193–204  
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-193-204

## Technology of Simulation Modeling for Railway Automation and Remote Control Systems

### Information about authors

**Konstantinova T. Yu.**, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department.  
E-mail: at-tanya@mail.ru

**Lykov A. A.**, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department. E-mail: bastdrew@mail.ru

**Markov D. S.**, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department. E-mail: MDS1945@yandex.ru

**Nasedkin O. A.**, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department. E-mail: nasedkin@crtc.spb.ru

**Sokolov V. B.**, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department. E-mail: SVB9@yandex.ru

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

**Abstract:** The aim of this article is to summarize the experience and develop the conceptual framework of simulation modeling in the field of research and validation of system engineering solutions taken at various stages of the life cycle of railway automation and remote control systems. To address the stated objective, a systemic approach and formalization of the key principles and challenges of simulation modeling at the system engineering level have been employed. Terms and definitions have been formulated, collectively forming the conceptual framework in the subject area under consideration. Based on the introduced conceptual framework, a technology for simulation modeling of railway automation and remote control systems at the system level has been proposed. It is stated that a simulation model of a complex system is itself a complex system with its own life cycle, represented in the form of the proposed modeling technology. The main problem highlighted in the application of the simulation modeling method is its lack of structure. To address this issue, various methods of formalization have been proposed at all stages of the life cycle of simulation models. The proposed conceptual framework ensures higher quality of communicativeness and training of participants in solving system engineering problems using simulation modeling methodology. The technology of simulation modeling has been applied and continues to be applied at various stages of the life cycle of microprocessor-based railway automation and remote control systems.

**Keywords:** railway automation and remote control systems; simulation model; life cycle; conceptual framework; simulation modeling technology.

### References

1. Akopov A. S. *Imitatsionnoe modelirovanie* [Simulation Modeling]. Moscow: Yurayt Publ., 2023, 389 p. (In Russian)
2. Paley A. G., Pollak G. A. *Imitatsionnoe modelirovanie. Razrabotka imitatsionnykh modeley* [Simulation. Development of simulation models]. St. Petersburg: Lan' Publ., 2023, 208 p. (In Russian)
3. Goncharenko A. N. *Modelirovanie sistem. Vozможности ispol'zovaniya imitatsionnogo modelirovaniya pri formirovaniy sistem* [Modeling systems. Possibilities of using simulation modeling in the formation of systems]. Moscow: MISIS Publ., 2020, 42 p. (In Russian)
4. Ivashkin Yu. A. *Mul'tiagentnoe modelirovanie v imitatsionnoy sisteme Simplex3* [Multi-agent modeling in the simulation system Simplex3]. St. Petersburg: Laboratoriya znaniy Publ., 2016, 350 p. (In Russian)
5. Aliev T. I. *Osnovy modelirovaniya diskretnykh sistem* [Fundamentals of modeling discrete systems]. St. Petersburg: SPbGU ITMO Publ., 2009, 363 p. (In Russian)
6. Kudryavtsev E. M. *GPSS World. Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya razlichnykh sistem: monografiya* [GPSS World. Fundamentals of simulation modeling of various systems: monograph]. Moscow: DMK Press Publ., 2018, 37 p. (In Russian)
7. Markov D. S., Bulavskiy P. E. *Matrichnyy metod formalizatsii imitatsionnykh modeley slozhnykh sistem massovogo obsluzhivaniya* [Matrix method of formalization of simulation models of complex queuing systems]. St. Petersburg: Izvestiya PGUPS Publ., 2010, Iss. 4, pp. 186–195. (In Russian)
8. Devyatkov V. V. *Rukovodstvo pol'zovatelya po GPSS World* [User manual for GPSS World]. Kazan': Master Layn Publ., 2002, 383 p. (In Russian)
9. Boev V. D. *Modelirovanie sistem. Instrumental'nye sredstva GPSS World* [System Modeling. Tools GPSS World]. St. Petersburg: BKhV-Peterburg Publ., 2004, 348 p. (In Russian)
10. Devyatkov V. V., Devyatkov T. V., Fedotov M. V. *Imitatsionnyye issledovaniya v srede modelirovaniya GPSS STU-DIO* [Simulation studies in the GPSS STU-DIO modeling environment]. Moscow: INFRA-M Publ., 2019, 283 p. (In Russian)
11. Lykov A. A., Markov D. S. *Metod formalizatsii imitatsionnykh modeley tekhnologicheskikh pro-tsessov v khozyaystve avtomatiki i telemekhaniki na zheleznodorozhnom transporte* [The method of formalization of simulation models of technological processes in the economy of automation and telemechanics in railway transport]. St. Petersburg: Izvestiya PGUPS Publ., 2012, Iss. 1, pp. 23–38. (In Russian)
12. Sovetov B. Ya., Yakovlev S. A. *Modelirovanie sistem* [Modeling of systems]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2001, 343 p. (In Russian)
13. Lou A. M., Kel'ton V. D. *Imitatsionnoe modelirovanie. Klassika CS* [Simulation. Classics CS]. St. Petersburg: BHV Publ., 2004, 846 p. (In Russian)
14. Shennon R. *Imitatsionnoe modelirovanie sistem — iskusstvo i nauka* [Simulation of systems — art and science]. Moscow: Mir Publ., 1978, 287 p. (In Russian)
15. Brodskiy V. Z. *Vvedenie v faktornoe planirovanie eksperimenta* [Introduction to factorial planning of experiment]. Moscow: Mir Publ., 2019, 224 p. (In Russian)
16. Balci O. A Life Cycle for Modeling and Simulation. *Simulation*, 2012, vol. 88(7), pp. 870–883.
17. Balci O. Verification, validation and accreditation. *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, 1998, pp. 41–48.
18. Sargent R. G. Some approaches and paradigms for verifying and validating simulation models. *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, 2001, pp. 106–114.
19. Law A. M., McComas M. G. How to build valid and credible simulation model. *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, 2001, pp. 22–29.
20. Carson J. S. Model verification and validation. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, 2002, pp. 52–58.
21. Law A. M., Kelton W. D. *Simulation Modeling and Analysis*. Fourth Edition. McGraw-Hill, 2007, 768 p.
22. Rabe M., Spieckermann S., Wenzel S. *Verifikation und Validierung fur die Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2008, 195 p.

# САМОДВОЙСТВЕННЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ СИНТЕЗА КОНТРОЛЕПРИГОДНЫХ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ

**ЕФАНОВ Дмитрий Викторович**, д-р техн. наук, профессор, член Института инженеров электротехники и электроники (IEEE), действительный член Международной академии транспорта, заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе<sup>1</sup>, профессор<sup>2,3,4</sup>; e-mail: TrES-4b@yandex.ru  
**ПОГОДИНА Татьяна Сергеевна**, студент<sup>3</sup>; e-mail: pogodina-ts@mail.ru

<sup>1</sup>ООО «НИПИ «ТрансСтройбезопасность», Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа транспорта, Института машиностроения, материалов и транспорта, Санкт-Петербург

<sup>3</sup>Российский университет транспорта (МИИТ), кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте», Москва

<sup>4</sup>Ташкентский государственный транспортный университет, кафедра «Автоматика и телемеханика», Ташкент

Рассмотрены все самодвойственные аналоги элементарных функциональных элементов, использование которых позволяет синтезировать самодвойственные схемные реализации произвольных булевых функций. При этом может быть применено два способа синтеза, каждый из которых основан на том свойстве, что любую булеву функцию можно преобразовать в самодвойственную с использованием одной дополнительной переменной. Первый состоит в замене в структуре устройства всех несамодвойственных функциональных элементов самодвойственными аналогами. Второй состоит в получении самодвойственной функции по исходной формуле. В работе проведено моделирование самодвойственных функциональных элементов в импульсном режиме работы. Показано, что все самодвойственные функциональные элементы, кроме элементов, реализующих функции равнозначности и неравнозначности (сложения по модулю два), являются полностью самопроверяемыми относительно одиночных константных неисправностей при контроле вычислений на основе принадлежности формируемых функций классу самодвойственных булевых функций. Элементы же, реализующие упомянутые функции, требуется дополнительно контролировать. Для них неисправности не тестируются, поскольку происходят при одновременном искажении сигналов на обеих комбинациях в паре. Эту особенность данных самодвойственных функциональных элементов следует учитывать при разработке контролепригодных самопроверяемых цифровых вычислительных устройств и систем. В статье приводится пример применения способов построения самодвойственных схемных реализаций. Полученные результаты могут быть использованы при синтезе контролепригодных самодвойственных вычислительных устройств и систем.

**Ключевые слова:** самодвойственная булева функция; контроль вычислений; контролепригодное устройство; контроль самодвойственности; самопроверяемая схема.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-205-221

## ▼ Введение

При разработке высоконадежных вычислительных устройств и систем используются элементы с низкими показателями интенсивности отказов, а также методы, основанные на внесении избыточности в исходный объект [1–3]. При этом сами устройства снабжают развитыми средствами тестового и рабочего диагностирования, а также техническими средствами отключения отказавших узлов и реконфигурации архитектур [4–7].

Важной задачей является обнаружение неисправностей и ошибок в вычислениях, что реша-

ется зачастую путем применения самопроверяемых схем встроенного контроля (СВК) [8]. СВК синтезируются различными методами, одним из которых является использование временной избыточности и специального представления сигналов [9]. При этом контролируют принадлежность формируемых кодовых векторов множеству слов заранее выбранного двоичного избыточного кода или же принадлежность формируемых функций в контрольных точках особым классам булевых функций, например, классу самодвойственных булевых функций [10, 11]. Оба диагностических признака можно комбинировать.

В отчете [12], опубликованном в 1976 году в Университете Иллинойса (Урбана-Шампейн, Иллинойс, США), представлены оптимальные реализации самодвойственных функций от четырех переменных в базисе NOR (ИЛИ-НЕ). В этой работе обращается внимание на диагностические особенности самодвойственных функций. Несколько позже в этом же году Д. А. Рейнолдс защитил магистерскую диссертацию, основной решаемой задачей в которой была разработка методов синтеза устройств с импульсным режимом работы с обнаружением неисправностей [13]. В 1978 году была опубликована статья [14], которая широко известна специалистам в области компьютерных систем. В ней рассмотрены возможности обнаружения ошибок в схемах, функционирующих в импульсном режиме, с использованием самодвойственных сигналов. Авторами установлены необходимые и достаточные условия для логических структур, дающие возможность обнаружения любых одиночных неисправностей в них.

Методы организации контроля вычислений, основанные на импульсном режиме работы и проверке самодвойственности вычисляемых функций, в дальнейшем исследовались в ряде отдельных научных школ. Например, в более современной работе [15] смоделированы устройства сложения двоичных чисел, а в [16] показано, что логические элементы, реализующие самодвойственные функции, могут быть эффективно реализованы с применением реконфигурируемых нанотехнологий.

Среди отечественных исследователей отметим две научные школы. В исследованиях специалистов лаборатории технической диагностики и отказоустойчивости (№ 27) Института проблем управления РАН поднимались вопросы синтеза дублированных систем с контролем вычислений по признаку самодвойственности. К примеру, широко известна статья [17], в которой предложены самодвойственные аналоги запоминающих элементов (триггеров), а также обсуждаются вопросы синтеза самодвойственных конечных автоматов. В статьях профессоров Сапожниковых (кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I)

разработаны методы синтеза СВК с контролем вычислений по признаку самодвойственности. Можно кратко перечислить основные результаты их деятельности в данной отрасли диагностики: разработаны основные методы контроля вычислений с самодвойственным дополнением [18–21], разработаны методы синтеза самодвойственных комбинационных устройств и устройств с памятью [22]. Теория синтеза самодвойственных вычислительных устройств помимо множества статей опубликована в двух отечественных монографиях [23, 24] и, несколько позже, в книге [11].

Исследования последних лет в теории синтеза самодвойственных вычислительных устройств позволили разработать методы синтеза СВК с контролем вычислений по двум диагностическим признакам одновременно. В работах [25, 26] описан метод самодвойственного контроля по равновесным кодам. При этом применен такой способ организации СВК, при котором с сигналами от объекта диагностирования производят логическую коррекцию. Это позволяет контролировать любые устройства таким образом. В [27–30] описывается метод самодвойственного контроля по классическим кодам Хэмминга и их модификациям. Он подразумевает контроль вычислений устройств, выходы которых описываются самодвойственными функциями (самодвойственными устройствами). Самодвойственными являются не все устройства, а только некоторые, например, полный сумматор или мажоритарный элемент. Для получения самодвойственных устройств из несамодвойственных может быть применен способ, подразумевающий использование самодвойственных аналогов функциональных элементов при синтезе устройств, либо же предварительная процедура получения самодвойственного функционального описания. Оба способа основаны на использовании дополнительной, альтернативной переменной  $a$  для преобразования любой функции в самодвойственную.

*Данная статья посвящена рассмотрению особенностей реализации самодвойственных функциональных элементов, реализующих элементарные булевы функции, в том числе моделированию их работы.*

### 1. Самодвойственные аналоги элементарных булевых функций

Элементарные булевы функции могут быть заданы табл. 1 [9]. Через них могут быть выражены функции с любым количеством аргументов.

Функции пронумерованы от  $f_0$  до  $f_{15}$  в соответствии с двоичными эквивалентами их значений на каждой входной комбинации  $x_1x_2$ . Две функции не зависят от переменных — функции  $f_0$  (тождественный ноль, 0) и  $f_{15}$  (тождественная единица, 1). Четыре функции зависят от одной переменной — это функции  $f_3$  (повтор  $x_1$ ),  $f_5$  (повтор  $x_2$ ),  $f_{10}$  (инверсия  $x_2$ ) и  $f_{12}$  (инверсия  $x_1$ ). Десять функций зависят от обеих переменных — функции  $f_1$  (конъюнкция,  $x_1 \& x_2$ ),  $f_2$  (запрет  $x_1$ , инверсия прямой импликации,  $x_1 \mapsto x_2$ ),  $f_4$  (запрет  $x_2$ , инверсия обратной импликации,  $x_2 \mapsto x_1$ ),  $f_6$  (неравнозначность, сложение по модулю 2, исключающее ИЛИ,  $x_1 \oplus x_2$ ),  $f_7$  (дизъюнкция,  $x_1 \vee x_2$ ),  $f_8$  (стрелка Пирса, кинжал Квайна, функция Вебба, ИЛИ-НЕ,  $x_1 \downarrow x_2$ ),  $f_9$  (равнозначность, эквивалентность,  $x_1 \sim x_2$ ),  $f_{11}$  (обратная импликация,  $x_2 \rightarrow x_1$ ),  $f_{13}$  (прямая импликация,  $x_1 \rightarrow x_2$ ) и  $f_{14}$  (штрих Шеффера, И-НЕ,  $x_1 | x_2$ ).

**Определение 1.** Функция  $g(x_1, x_2, \dots, x_i)$  называется двойственной функции  $f(x_1, x_2, \dots, x_i)$ , если:

$$g(x_1, x_2, \dots, x_i) = \overline{f(\overline{x_1}, \overline{x_2}, \dots, \overline{x_i})}. \quad (1)$$

Из элементарных булевых функций двойственными являются следующие пары: (0, 1), ( $x_1 \& x_2$ ,  $x_1 \vee x_2$ ), ( $x_1 \mapsto x_2$ ,  $x_2 \rightarrow x_1$ ), ( $x_2 \mapsto x_1$ ,  $x_1 \rightarrow x_2$ ), ( $x_1 \oplus x_2$ ,  $x_1 \sim x_2$ ), ( $x_1 \downarrow x_2$ ,  $x_1 | x_2$ ).

**Определение 2.** Функция  $f(x_1, x_2, \dots, x_i)$  называется самодвойственной, если:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_i) = \overline{f(\overline{x_1}, \overline{x_2}, \dots, \overline{x_i})}. \quad (2)$$

Среди элементарных функций четыре являются самодвойственными — это все функции существенно зависящие от одной переменной.

Для преобразования любой булевой функции в самодвойственную достаточно одной переменной  $a$  (альтернативного сигнала):

Таблица 1. Элементарные булевы функции

$x_1$	$x_2$	$f_0$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$	$f_9$	$f_{10}$	$f_{11}$	$f_{12}$	$f_{13}$	$f_{14}$	$f_{15}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1
1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1

Таблица 2. Таблица истинности самодвойственного аналога функции ИЛИ-НЕ

$a$	$x_1$	$x_2$	$f$
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0

$$f^\sigma = \overline{a}f \vee ag. \quad (3)$$

где  $f$  — исходная функция, а  $g$  — двойственная к ней функция.

На ортогональных по всем переменным входных комбинациях самодвойственная функция имеет противоположные значения. Другими словами, самодвойственная функция имеет противоположные значения на симметричных (относительно середины таблицы истинности) входных комбинациях.

В табл. 2 для примера показано, как с помощью переменной  $a$  можно получить самодвойственный аналог функции ИЛИ-НЕ.

Из формулы (3) и табл. 2 получаем:

$$\begin{aligned} f_{x_1 \downarrow x_2}^\sigma &= \overline{a}(x_1 \downarrow x_2) \vee a(x_1 | x_2) = \overline{a} \overline{x_1 \vee x_2} \vee a x_1 x_2 = \\ &= \overline{a} \overline{x_1} \overline{x_2} \vee a(\overline{x_1} \vee \overline{x_2}) = \overline{a} \overline{x_1} \overline{x_2} \vee a \overline{x_1} \vee a \overline{x_2} = \\ &= \overline{x_1} \overline{x_2} \vee a \overline{x_1} \vee a \overline{x_2} = a(\overline{x_1} \vee \overline{x_2}) \vee \overline{x_1} \overline{x_2}. \end{aligned} \quad (4)$$

В преобразованиях (4) использованы формулы де Моргана и Блейка — Порецкого [9].

Аналогично преобразованиям (4) с помощью формулы (3) можно получить самодвойственные аналоги всех элементарных булевых функций. Приведем их ниже:

$$f_0^\sigma = a; \quad (5)$$

$$f_{x_1 \& x_2}^\sigma = a(x_1 \vee x_2) \vee x_1 x_2; \quad (6)$$

$$f_{x_1 \mapsto x_2}^\sigma = a(x_1 \vee \bar{x}_2) \vee x_1 \bar{x}_2; \quad (7)$$

$$f_{x_1}^\sigma = x_1; \quad (8)$$

$$f_{x_2 \mapsto x_1}^\sigma = a(\bar{x}_1 \vee x_2) \vee \bar{x}_1 x_2; \quad (9)$$

$$f_{x_2}^\sigma = x_2; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} f_{x_1 \oplus x_2}^\sigma &= a \oplus x_1 \oplus x_2 = \\ &= \bar{a}(\bar{x}_1 x_2 \vee x_1 \bar{x}_2) \vee a(\bar{x}_1 \bar{x}_2 \vee x_1 x_2); \end{aligned} \quad (11)$$

$$f_{x_1 \vee x_2}^\sigma = \bar{a}(x_1 \vee x_2) \vee x_1 x_2; \quad (12)$$

$$f_{x_1 \downarrow x_2}^\sigma = a(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2) \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2; \quad (13)$$

$$\begin{aligned} f_{x_1 \sim x_2}^\sigma &= \bar{a} \oplus x_1 \oplus x_2 = \\ &= \bar{a}(\bar{x}_1 \bar{x}_2 \vee x_1 x_2) \vee a(\bar{x}_1 x_2 \vee x_1 \bar{x}_2); \end{aligned} \quad (14)$$

$$f_{x_2}^\sigma = \bar{x}_2; \quad (15)$$

$$f_{x_2 \rightarrow x_1}^\sigma = \bar{a}(x_1 \vee \bar{x}_2) \vee x_1 \bar{x}_2; \quad (16)$$

$$f_{x_1}^\sigma = \bar{x}_1; \quad (17)$$

$$f_{x_1 \rightarrow x_2}^\sigma = \bar{a}(\bar{x}_1 \vee x_2) \vee \bar{x}_1 x_2; \quad (18)$$

$$f_{x_1 | x_2}^\sigma = \bar{a}(\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2) \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2; \quad (19)$$

$$f_1^\sigma = \bar{a}. \quad (20)$$

Представленные выражения (5) — (20) позволяют синтезировать любые самодвойственные структуры путем замены в них логических элементов на их самодвойственные аналоги и последующей оптимизации.

Отметим следующие особенности выражений (5) — (20):

- самодвойственные аналоги тождественных 0 и 1 получаются с использованием

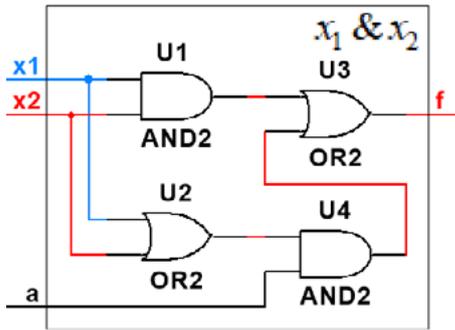
только альтернативного сигнала  $a$  (формулы 5 и 20);

- функции повтора и инверсии являются самодвойственными и не требуют использования преобразования и альтернативного сигнала  $a$  (формулы 8, 10, 15 и 17);
- самодвойственные аналоги функций  $x_1 \oplus x_2$  и  $x_1 \sim x_2$  получаются путем сложения по модулю 2 функции  $x_1 \oplus x_2$  с сигналом  $a$  и  $\bar{a}$  соответственно;
- самодвойственные аналоги двойственных функций ( $x_1 \& x_2$ ,  $x_1 \vee x_2$ ), ( $x_1 \mapsto x_2$ ,  $x_2 \rightarrow x_1$ ), ( $x_2 \mapsto x_1$ ,  $x_1 \rightarrow x_2$ ), ( $x_1 \oplus x_2$ ,  $x_1 \sim x_2$ ), ( $x_1 \downarrow x_2$ ,  $x_1 | x_2$ ) получаются при замене в самодвойственной реализации первой функции переменной  $a$  на  $\bar{a}$  соответственно.

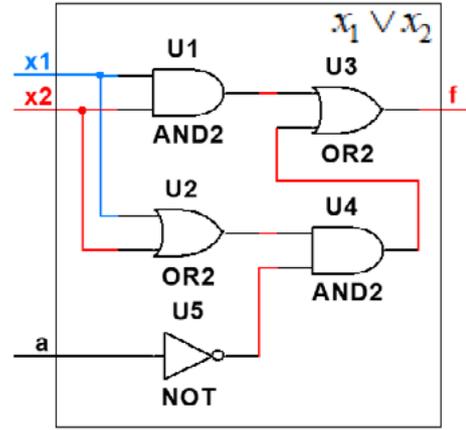
## 2. Моделирование самодвойственных функциональных элементов

Для моделирования работы самодвойственных функциональных элементов нами была выбрана среда Multisim [31]. В ней предварительно с использованием вышеприведенных формул были реализованы все десять пар самодвойственных аналогов функций. Самодвойственные функциональные элементы для пяти пар двойственных функций ( $x_1 \& x_2$ ,  $x_1 \vee x_2$ ), ( $x_1 \mapsto x_2$ ,  $x_2 \rightarrow x_1$ ), ( $x_2 \mapsto x_1$ ,  $x_1 \rightarrow x_2$ ), ( $x_1 \oplus x_2$ ,  $x_1 \sim x_2$ ), ( $x_1 \downarrow x_2$ ,  $x_1 | x_2$ ) приведены на рис. 1–5. Схемы спроектированы на стандартных функциональных элементах И (AND), ИЛИ (OR), НЕ (NOT) и «сложение по модулю 2» (XOR). Схемы отображены в стандарте ANSI<sup>1</sup>. Каждый функциональный элемент для самодвойственного аналога булевой функции имеет две подписи: сверху подписан номер логического элемента в структуре U#, где # — номер элемента; снизу подписана реализуемая элементом операция, при этом число входов элемента указано в виде числа после самой операции

<sup>1</sup> ANSI (American National Standards Institute — Американский национальный институт стандартов) представляет собой объединение американских промышленных и деловых групп, разрабатывающих торговые и коммуникационные стандарты. Входит в организации ISO (International Organization for Standardization — Международная организация по стандартизации) и IEC (International Electrotechnical Commission — Международная электротехническая комиссия).

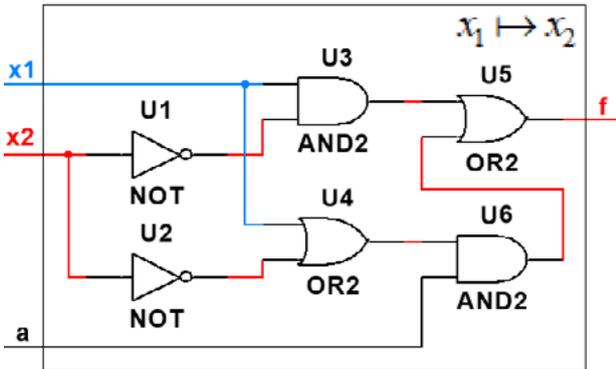


a

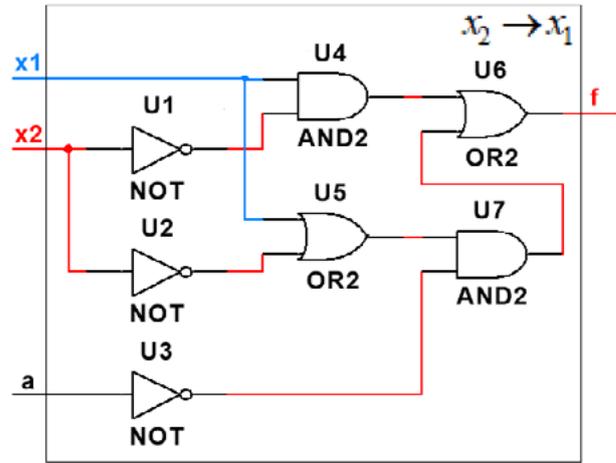


б

Рис. 1. Самодвойственные функциональные элементы, реализующие функции  $x_1 \& x_2$  (a) и  $x_1 \vee x_2$  (б)

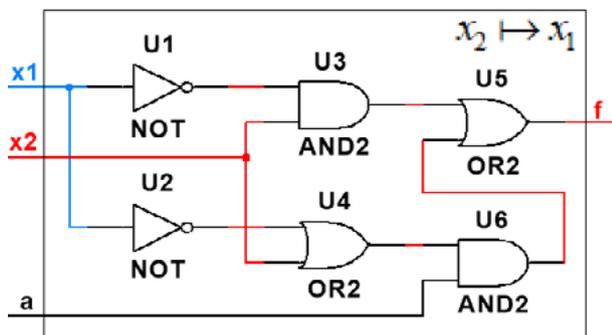


a

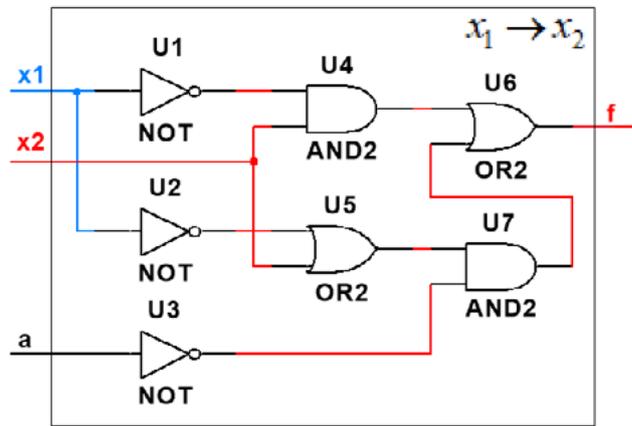


б

Рис. 2. Самодвойственные функциональные элементы, реализующие функции  $x_1 \mapsto x_2$  (a) и  $x_2 \rightarrow x_1$  (б)



a



б

Рис. 3. Самодвойственные функциональные элементы, реализующие функции  $x_2 \mapsto x_1$  (a) и  $x_1 \rightarrow x_2$  (б)

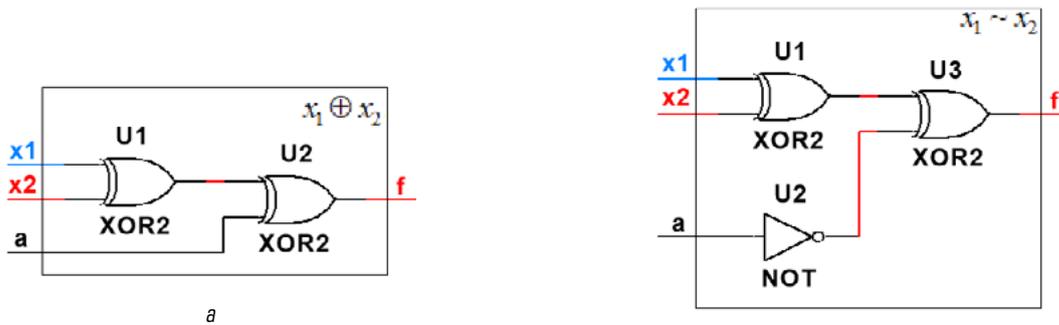


Рис. 4. Самодвойственные функциональные элементы, реализующие функции  $x_1 \oplus x_2$  (а) и  $x_1 \sim x_2$  (б)

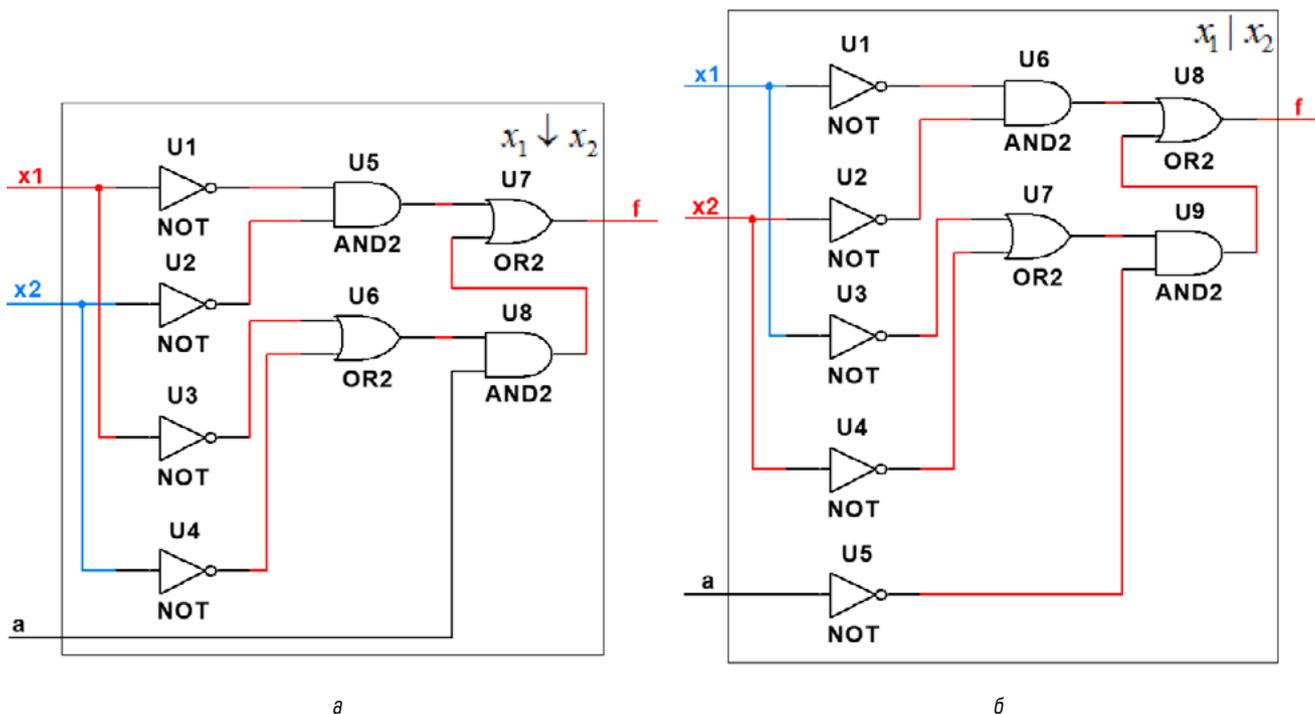


Рис. 5. Самодвойственные функциональные элементы, реализующие функции  $x_1 \downarrow x_2$  (а) и  $x_1 | x_2$  (б)

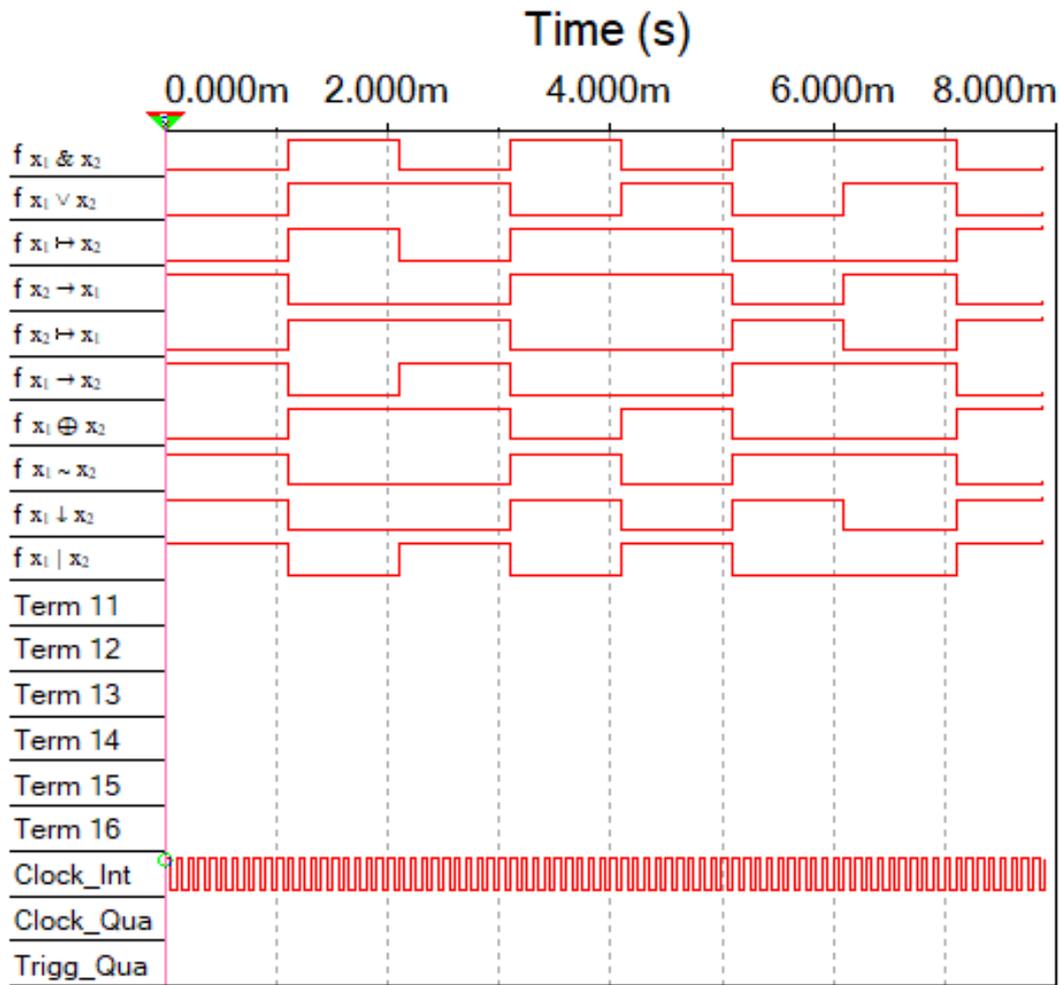
(для инверсии используется один вход и цифра не подписывается после операции).

Временные диаграммы работы самодвойственных функциональных элементов представлены на рис. 6, по которым можно проверить корректность схемных реализаций.

В ходе исследования также была поставлена задача оценки тестопригодности самодвойственных функциональных элементов. Оценивались обнаруживающие характеристики схемных решений с контролем по принадлежности вычисляемых функций классу самодвойственных булевых функций при воздействии одиночных константных неисправностей выходов внутренних логических элементов (stuck-at faults), за исключением

инверторов входного каскада (их неисправности не рассматривались).

Для контроля ошибок, возникающих на выходах самодвойственных функциональных элементов, устанавливался самодвойственный тестер SSC (self-dual self-checking checker), особенности функционирования которого описаны в [27, 30]. Данное устройство содержит два входа  $f^*$  и  $a$  и два выхода  $z^0$  и  $z^1$ . На вход  $f^*$  подается рабочий сигнал, который требуется контролировать. Вход  $a$  предназначен для подачи сигнала преобразования. Выходы  $z^0$  и  $z^1$  представляют собой контрольные выходы тестера, парафазный сигнал на которых свидетельствует о корректности работы контролируемого объекта при исправности самого


 Рис. 6. Диаграмма работы самодвойственных функциональных элементов<sup>2</sup>

тестера. Нарушение парафазности есть свидетельство того, что при исправности тестера присутствуют ошибки в работе контролируемого объекта. Сам SSC является самопроверяемым устройством.

В качестве примера на рис. 7 приведена схема контроля для эксперимента с самодвойственным функциональным элементом ИЛИ-НЕ. В ходе эксперимента моделировались все одиночные константные неисправности. Они вносились в схему путем обрыва линий и подключения на входы элементов последующих каскадов элементов с постоянным сигналом

нуля или единицы. На рис. 7, а представлена схема моделирования поведения схемы при внесении неисправности константа 1 на выходе элемента У6. Выход самодвойственного функционального элемента ИЛИ-НЕ подключен к функциональному входу SSC. На рис. 7, б и в даны временные диаграммы работы схемы в штатном режиме и при наличии обозначенной неисправности. Схемы функционируют в импульсном режиме при подаче на входы пар комбинаций: (000, 111), (001, 110), (010, 101), (011, 100). Фиксация неисправности происходит на первой подаваемой паре наборов (000, 111). Нарушение парафазности на второй комбинации свидетельствует о фиксации ошибки тестером самодвойственности.

В табл. 3 приводятся результаты тестирования всех самодвойственных функциональных элементов. Для каждого элемента в структуре самодвойственного функционального

<sup>2</sup> В окне диаграммы слева приведены все входы логического анализатора, на которые выводятся сигналы. Особенности его работы описаны в разнообразных учебных пособиях. Как пример — лабораторный практикум «Моделирование цифровых устройств в среде Multisim 7» (автор Бесперстов Э. А., издательство Балтийского государственного технического университета, СПб., 2018).

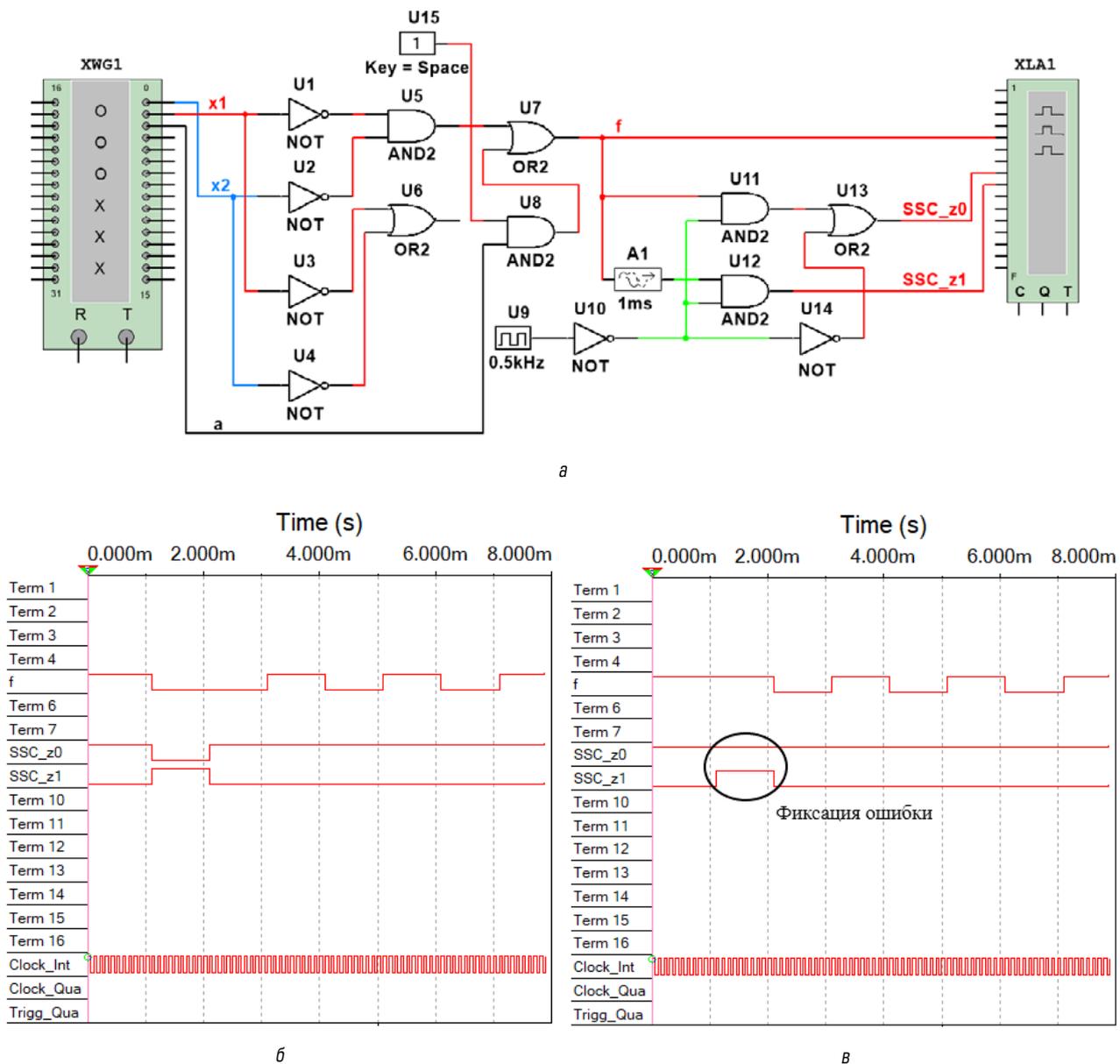


Рис. 7. Схема контроля вычислений на выходе самодвойственного функционального элемента ИЛИ-НЕ: схема эксперимента (а), временная диаграмма работы в штатном режиме (б), временная диаграмма работы с неисправностью (в)<sup>3</sup>

элемента цветом выделены те пары входных комбинаций, на которых соответствующая неисправность тестируется и фиксируется с помощью SSC.

Анализ табл. 3 показывает, что:

- для каждого самодвойственного функционального элемента существует логический элемент во внутренней структуре, неисправности которого тестируются на любой паре входных комбинаций;

- для каждого самодвойственного функционального элемента ровно половина неисправностей элементов во внутренней структуре тестируется на любой паре входных комбинаций;
- для всех самодвойственных функциональных элементов, кроме аналогов элементов, реализующих функции  $x_1 \oplus x_2$  и  $x_1 \sim x_2$ , имеется по две неисправности, тестируемых только на одной паре входных комбинаций, и по две неисправности, тестируемых на двух парах входных комбинаций;

<sup>3</sup> Символами XWG1 и XLA1 на схеме обозначены генератор слов и логический анализатор.

**Таблица 3. Результаты тестирования самодвойственных функциональных элементов**

Элемент	Вид неисправности	Входные комбинации							
		000	111	001	110	010	101	011	100
$x_1 \& x_2$									
U1	константа 0	0	1	0	1	0	1	0(1→0)	0
	константа 1	1(0→1)	1	1(0→1)	1	1(0→1)	1	1	1(0→1)
U2	константа 0	0	1	0	0(1→0)	0	0(1→0)	1	0
	константа 1	0	1	0	1	0	1	1	1(0→1)
U3	константа 0	0	0(1→0)	0	0(1→0)	0	0(1→0)	0(1→0)	0
	константа 1	1(0→1)	1	1(0→1)	1	1(0→1)	1	1	1(0→1)
U4	константа 0	0	1	0	0(1→0)	0	0(1→0)	1	0
	константа 1	1(0→1)	1	1(0→1)	1	1(0→1)	1	1	1(0→1)
$x_1 \vee x_2$									
U1	константа 0	0	0(1→0)	1	0	1	0	1	0
	константа 1	1(0→1)	1	1	1(0→1)	1	1(0→1)	1	1(0→1)
U2	константа 0	0	1	0(1→0)	0	0(1→0)	0	1	0
	константа 1	1(0→1)	1	1	0	1	0	1	0
U3	константа 0	0	0(1→0)	0(1→0)	0	0(1→0)	0	0(1→0)	0
	константа 1	1(0→1)	1	1	1(0→1)	1	1(0→1)	1	1(0→1)
U4	константа 0	0	1	0(1→0)	0	0(1→0)	0	1	0
	константа 1	1(0→1)	1	1	1(0→1)	1	1(0→1)	1	1(0→1)
$x_1 \mapsto x_2$									
U3	константа 0	0	1	0(1→0)	0	0	1	0	1
	константа 1	1(0→1)	1	1	1(0→1)	1(0→1)	1	1(0→1)	1
U4	константа 0	0	0(1→0)	1	0	0	1	0	0(1→0)
	константа 1	0	1	1	1(0→1)	0	1	0	1
U5	константа 0	0	0(1→0)	0(1→0)	0	0	0(1→0)	0	0(1→0)
	константа 1	1(0→1)	1	1	1(0→1)	1(0→1)	1	1(0→1)	1
U6	константа 0	0	0(1→0)	1	0	0	1	0	0(1→0)
	константа 1	1(0→1)	1	1	1(0→1)	1(0→1)	1	1(0→1)	1
$x_2 \rightarrow x_1$									
U4	константа 0	1	0	1	0	0	0(1→0)	1	0
	константа 1	1	1(0→1)	1	1(0→1)	1(0→1)	1	1	1(0→1)
U5	константа 0	0(1→0)	0	1	0	0	1	0(1→0)	0
	константа 1	1	0	1	0	1(0→1)	1	1	0
U6	константа 0	0(1→0)	0	0(1→0)	0	0	0(1→0)	0(1→0)	0
	константа 1	1	1(0→1)	1	1(0→1)	1(0→1)	1	1	1(0→1)
U7	константа 0	0(1→0)	0	1	0	0	1	0(1→0)	0
	константа 1	1	1(0→1)	1	1(0→1)	1(0→1)	1	1	1(0→1)
$x_2 \mapsto x_1$									
U3	константа 0	0	1	0	1	0(1→0)	0	0	1
	константа 1	1(0→1)	1	1(0→1)	1	1	1(0→1)	1(0→1)	1
U4	константа 0	0	0(1→0)	0	1	1	0	0	0(1→0)
	константа 1	0	1	0	1	1	1(0→1)	0	1
U5	константа 0	0	0(1→0)	0	0(1→0)	0(1→0)	0	0	0(1→0)
	константа 1	1(0→1)	1	1(0→1)	1	1	1(0→1)	1(0→1)	1
U6	константа 0	0	0(1→0)	0	1	1	0	0	0(1→0)
	константа 1	1(0→1)	1	1(0→1)	1	1	1(0→1)	1(0→1)	1

Элемент	Вид неисправности	Входные комбинации							
		000	111	001	110	010	101	011	100
$x_1 \rightarrow x_2$									
U4	константа 0	1	0	0	0(1→0)	1	0	1	0
	константа 1	1	1(0→1)	1(0→1)	1	1	1(0→1)	1	1(0→1)
U5	константа 0	0(1→0)	0	0	1	1	0	0(1→0)	0
	константа 1	1	0	1(0→1)	1	1	0	1	0
U6	константа 0	0(1→0)	0	0	0(1→0)	0(1→0)	0	0(1→0)	0
	константа 1	1	1(0→1)	1(0→1)	1	1	1(0→1)	1	1(0→1)
U7	константа 0	0(1→0)	0	0	1	1	0	0(1→0)	0
	константа 1	1	1(0→1)	1(0→1)	1	1	1(0→1)	1	1(0→1)
$x_1 \oplus x_2$									
U1	константа 0	0	1	0(1→0)	1(0→1)	0(1→0)	1(0→1)	0	1
	константа 1	1(0→1)	0(1→0)	1	0	1	0	1(0→1)	0(1→0)
U2	константа 0	0	0(1→0)	0(1→0)	0	0(1→0)	0	0	0(1→0)
	константа 1	1(0→1)	1	1	1(0→1)	1	1(0→1)	1(0→1)	1
$x_1 \sim x_2$									
U1	константа 0	1	0	1(0→1)	0(1→0)	1(0→1)	0(1→0)	1	0
	константа 1	0(1→0)	1(0→1)	0	1	0	1	0(1→0)	1(0→1)
U3	константа 0	0(1→0)	0	0	0(1→0)	0	0(1→0)	0(1→0)	0
	константа 1	1	1(0→1)	1(0→1)	1	1(0→1)	1	1	1(0→1)
$x_1 \downarrow x_2$									
U5	константа 0	0(1→0)	0	0	1	0	1	0	1
	константа 1	1	1(0→1)	1(0→1)	1	1(0→1)	1	1(0→1)	1
U6	константа 0	1	0	0	0(1→0)	0	0(1→0)	0	1
	константа 1	1	1(0→1)	0	1	0	1	0	1
U7	константа 0	0(1→0)	0	0	0(1→0)	0	0(1→0)	0	0(1→0)
	константа 1	1	1(0→1)	1(0→1)	1	1(0→1)	1	1(0→1)	1
U8	константа 0	1	0	0	0(1→0)	0	0(1→0)	0	1
	константа 1	1	1(0→1)	1(0→1)	1	1(0→1)	1	1(0→1)	1
$x_1   x_2$									
U6	константа 0	1	0	1	0	1	0	0	0(1→0)
	константа 1	1	1(0→1)	1	1(0→1)	1	1(0→1)	1(0→1)	1
U7	константа 0	1	0	0(1→0)	0	0(1→0)	0	0	1
	константа 1	1	0	1	0	1	0	1(0→1)	1
U8	константа 0	0(1→0)	0	0(1→0)	0	0(1→0)	0	0	0(1→0)
	константа 1	1	1(0→1)	1	1(0→1)	1	1(0→1)	1(0→1)	1
U9	константа 0	1	0	0(1→0)	0	0(1→0)	0	0	1
	константа 1	1	1(0→1)	1	1(0→1)	1	1(0→1)	1(0→1)	1

— неисправности элементов U1 в самодвойственных аналогах элементов, реализующих функции  $x_1 \oplus x_2$  и  $x_1 \sim x_2$ , не тестируются при самодвойственном контроле ни на одной паре входных комбинаций.

Таким образом, все самодвойственные функциональные элементы, кроме элементов,

реализующих функции  $x_1 \oplus x_2$  и  $x_1 \sim x_2$ , являются полностью самопроверяемыми относительно одиночных константных неисправностей при контроле вычислений на основе принадлежности формируемых функций классу самодвойственных булевых функций. Элементы же, реализующие функции  $x_1 \oplus x_2$  и

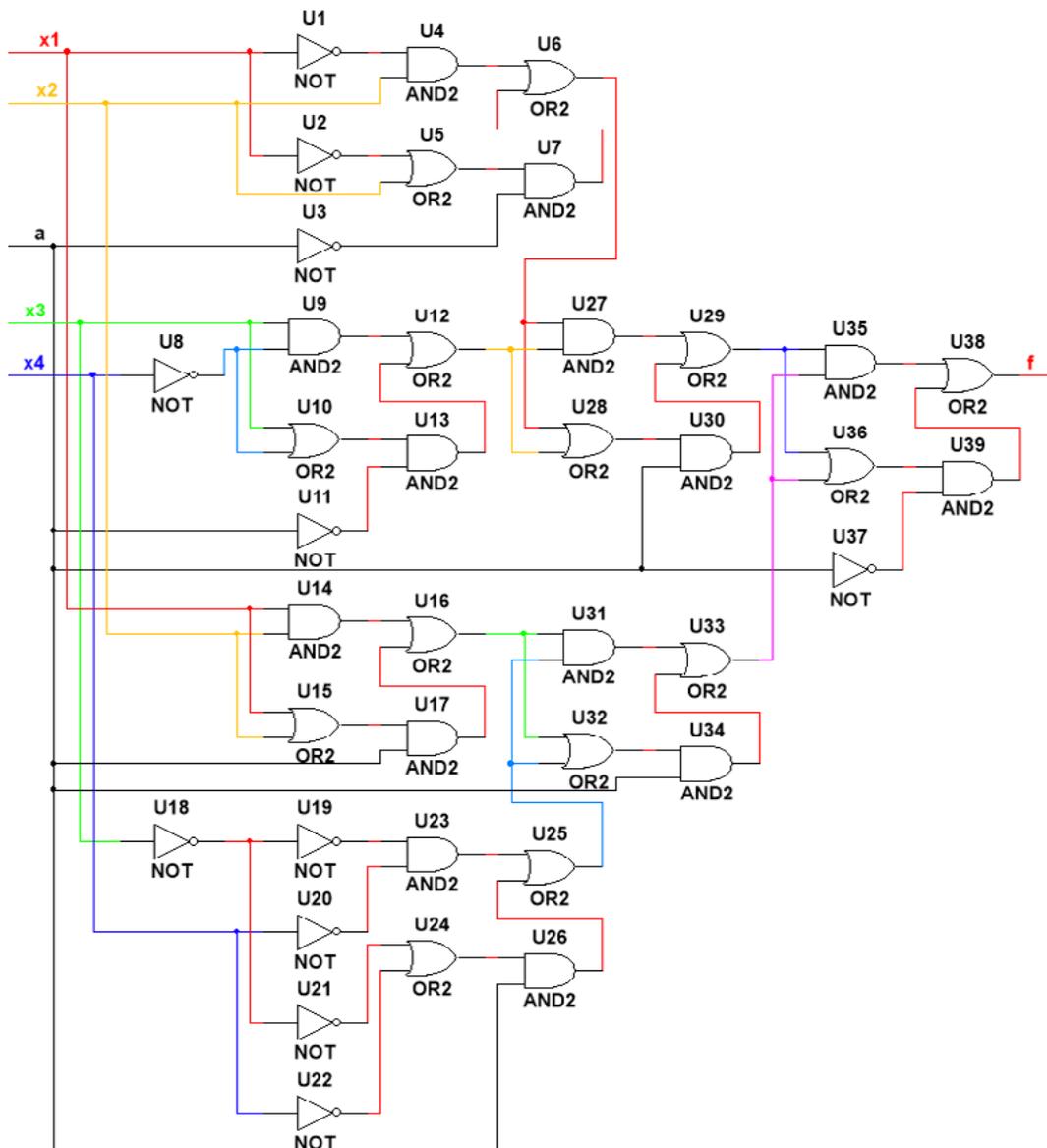


Рис. 8. Самодвойственная схема, полученная по алгоритму 1

$x_1 \sim x_2$ , требуется дополнительно контролировать. Для них маскировка ошибки происходит из-за одновременного искажения сигналов на обеих комбинациях в паре. Для констант 0 элемента U1 это пары (001, 110) и (010, 101); для констант 1 элемента U1 это пары (000, 111) и (011, 100). Данную особенность упомянутых самодвойственных функциональных элементов следует учитывать при разработке контролепригодных самопроверяемых цифровых вычислительных устройств и систем. И осуществлять дополнительный контроль вычислений на элементе U1, например, путем сравнения эталонных значений и вычисленных по методу дублирования [32, 33].

### 3. Алгоритмы синтеза самодвойственных логических схем

Рассмотрим алгоритмы синтеза самодвойственных логических схем на примере. Дана булева функция:

$$f = (x_1 \rightarrow x_2)(x_3 \vee \bar{x}_4) \vee x_1 x_2 (\bar{x}_3 \downarrow x_4).$$

Требуется синтезировать самодвойственную схему, реализующую функцию  $f$  — самодвойственный аналог  $f^\sigma$ .

Это можно сделать несколькими способами.

**Алгоритм 1.** Последовательность синтеза самодвойственной схемы с использованием самодвойственных функциональных элементов:

**Таблица 4. Таблица истинности для получения самодвойственной функции по примеру**

$a$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_1 \rightarrow x_2$	$x_3 \vee \bar{x}_4$	$(x_1 \rightarrow x_2)(x_3 \vee \bar{x}_4)$	$\bar{x}_3 \downarrow x_4$	$x_1 x_2 (\bar{x}_3 \downarrow x_4)$	$f^\sigma$
0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1
0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1
0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1
0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1
0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0
0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0
0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1
0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
1	0	0	0	0						0
1	0	0	0	1						0
1	0	0	1	0						1
1	0	0	1	1						0
1	0	1	0	0						1
1	0	1	0	1						1
1	0	1	1	0						1
1	0	1	1	1						1
1	1	0	0	0						0
1	1	0	0	1						0
1	1	0	1	0						1
1	1	0	1	1						0
1	1	1	0	0						0
1	1	1	0	1						0
1	1	1	1	0						1
1	1	1	1	1						0

1. Реализуется схема с использованием традиционных функциональных элементов, приведенных на рис. 1–5.
2. Производится замена традиционных функциональных элементов на самодвойственные.

На рис. 8 изображена самодвойственная схема в Multisim.

**Алгоритм 2.** Последовательность синтеза самодвойственной схемы с использованием таблиц истинности:

1. По заданной формуле составляется таблица истинности.
2. В таблицу истинности добавляется старший разряд, соответствующий переменной  $a$ .

3. Доопределяется вторая половина таблицы истинности с учетом условия (2) путем антисимметричного заполнения ее относительно середины.
4. Полученная функция оптимизируется в выбранном базисе.
5. Схема синтезируется по полученной формуле.

В табл. 4 представлены шаги получения функции  $f^\sigma$ .

Оптимизация в основном базисе по карте Карно дает следующий результат:

$$f^\sigma = \bar{a} \bar{x}_1 \bar{x}_4 \vee \bar{a} \bar{x}_1 x_3 \vee \bar{a} x_2 \bar{x}_4 \vee \bar{a} x_2 x_3 \vee \bar{a} x_1 x_2 \vee \bar{a} x_3 x_4.$$

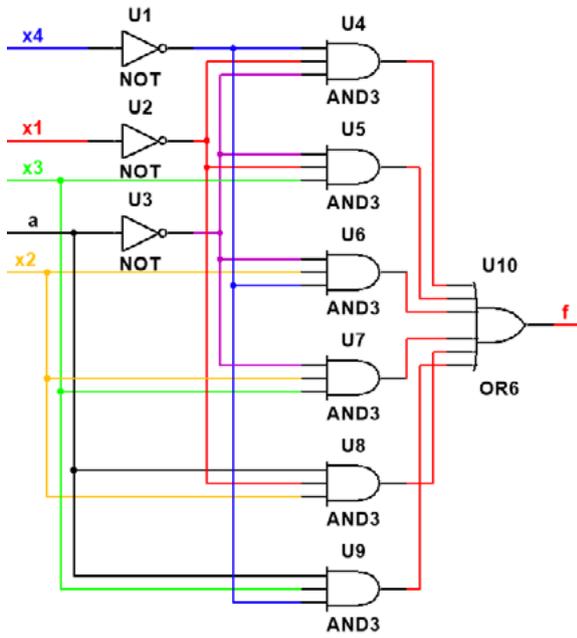


Рис. 9. Самодвойственная схема, полученная по алгоритму 2

На рис. 9 изображена самодвойственная схема в Multisim, полученная по оптимизированной функции.

Модификацией алгоритма 2 можно считать следующий алгоритм.

**Алгоритм 3.** Последовательность синтеза самодвойственной схемы с таблиц истинности и формулы Шеннона:

1. Выполняются шаги 1–3 алгоритма 2.

2. Функция  $f$  оптимизируется в выбранном базисе.
3. Полученная функция  $g$  оптимизируется в выбранном базисе.
4. Схема синтезируется по формуле (3):  $f^\sigma = \bar{a}f \vee ag$ .

Следуя за шагами алгоритма 3 и используя полученный выше результат, перепишем функцию  $f^\sigma$  в виде:

$$\begin{aligned} f^\sigma &= \bar{a}f \vee ag = \\ &= \bar{a}(\bar{x}_1 \bar{x}_4 \vee \bar{x}_1 x_3 \vee x_2 \bar{x}_4 \vee x_2 x_3) \vee a(\bar{x}_1 x_2 \vee x_3 \bar{x}_4) = \\ &= \bar{a}(\bar{x}_1 (\bar{x}_4 \vee x_3) \vee x_2 (\bar{x}_4 \vee x_3)) \vee a(\bar{x}_1 x_2 \vee x_3 \bar{x}_4). \end{aligned}$$

Самодвойственная схема приведена на рис. 10. Для булевых функций с большим числом переменных построение таблиц истинности становится трудоемким. Может быть использован следующий алгоритм.

**Алгоритм 4.** Последовательность синтеза самодвойственной схемы с использованием предварительного преобразования:

1. Формула записывается в основном базисе.
2. Получается двойственная функция  $g$  к функции  $f$  по формуле:  $g = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_i)$ .
3. Схема реализуется по формуле (3):  $f^\sigma = \bar{a}f \vee ag$ .

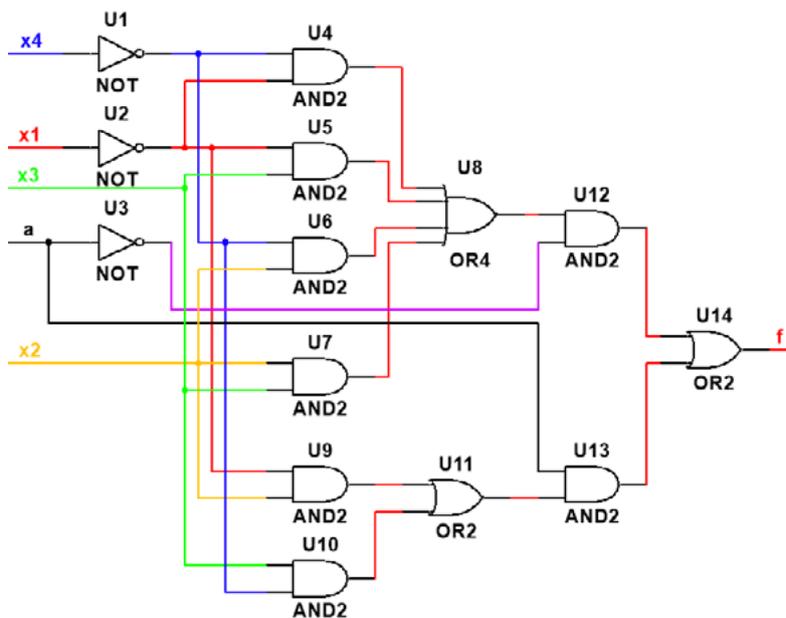


Рис. 10. Самодвойственная схема, полученная по алгоритму 3

Преобразуем исходную функцию с использованием элементарных функций в основном базисе:

$$\begin{aligned} f &= (x_1 \rightarrow x_2)(x_3 \vee \bar{x}_4) \vee x_1 x_2 (\bar{x}_3 \downarrow x_4) = \\ &= (\bar{x}_1 \vee x_2)(x_3 \vee \bar{x}_4) \vee x_1 x_2 (\overline{\bar{x}_3 \vee x_4}). \end{aligned}$$

Определим функцию  $g$ , двойственную к  $f$ :

$$\begin{aligned} g &= \overline{(x_1 \vee x_2)(x_3 \vee \bar{x}_4) \vee x_1 x_2 \overline{\bar{x}_3 \vee x_4}} = \\ &= \overline{(x_1 x_2 \vee x_3 \bar{x}_4)(x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee \bar{x}_4)} = \\ &= \bar{x}_1 \bar{x}_2 \vee x_3 \bar{x}_4. \end{aligned}$$

Самодвойственная схема, полученная по данному алгоритму, аналогична схеме, представленной на рис. 10.

### Заключение

В представленной работе рассмотрены все самодвойственные функциональные элементы, являющиеся аналогами элементов, реализующих простейшие несамодвойственные функции от двух переменных. Таких элементов 10. Они сгруппированы по парам элементов, реализующих двойственные булевы функции. В ходе моделирования одиночных константных неисправностей на выходах элементов внутренней структуры каждого самодвойственного функционального элемента установлено, что все элементы, кроме тех, которые реализуют функции  $x_1 \oplus x_2$  и  $x_1 \sim x_2$ , являются полностью самопроверяемыми при контроле вычислений на основе принадлежности формируемых функций классу самодвойственных булевых функций. Неисправности одного из двух элементов *XOR* в структурах самодвойственных функциональных элементов, которые реализуют функции  $x_1 \oplus x_2$  и  $x_1 \sim x_2$ , не тестируются при самодвойственном контроле. Для тестирования неисправностей требуется дополнительный контроль вычислений на данном элементе. Для остальных же элементов имеется достаточно высокое покрытие неисправностей тестовыми комбинациями: 50 % неисправностей тестируются на любой паре входных комбинаций, по 25 % неисправностей

тестируются на двух парах из четырех и еще 25 % неисправностей тестируются только на одной паре входных комбинаций.

Приведенные в статье самодвойственные аналоги элементарных булевых функций могут быть использованы при синтезе самодвойственных цифровых устройств с обнаружением неисправностей.

### Библиографический список

1. Стемпковский А. Л. Методы проектирования помехозащищенных комбинационных КМОП-схем, обеспечивающие автоматическое исправление ошибок / А. Л. Стемпковский, С. В. Гаврилов, С. И. Гуров и др. // Информационные технологии. — 2017. — Т. 23. — № 10. — С. 728–735.
2. Бестемьянов П. Ф. Методы обеспечения безопасности аппаратных средств микропроцессорных систем управления движением поездов / П. Ф. Бестемьянов // Электротехника. — 2020. — № 9. — С. 2–8.
3. Тельпухов Д. В. Алгоритм логического синтеза сбоеустойчивых схем в технологическом базисе / Д. В. Тельпухов, В. В. Надоленко // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). — 2021. — № 4. — С. 52–58. — DOI: 10.31114/2078-7707-2021-4-52-58.
4. Lala P.K. An Introduction to Logic Circuit Testing / P.K. Lala. — Morgan & Claypool, Texas A&M University-Texarkana, 2009. — 99 p. — DOI: 10.2200/S00149ED1V01Y200808DCS017.
5. Дрозд А. В. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем / А. В. Дрозд, В. С. Харченко, С. Г. Антошук и др.; под ред. А. В. Дрозда и В. С. Харченко. — Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2012. — 614 с.
6. Dubrova E. Fault-Tolerant Design / E. Dubrova. — Springer Science + Business Media New York 2013, 2013, XV + 185 p. — doi: 10.1007/978-1-4614-2113-9.
7. Ярмолик В. Н. Контроль и диагностика вычислительных систем / В. Н. Ярмолик. — Минск: Бестпринт, 2019. — 387 с.
8. Согомоян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомоян, Е. В. Слабаков. — М.: Радио и связь, 1989. — 208 с.
9. Сапожников В. В. Основы теории надежности и технической диагностики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. — СПб.: Лань, 2019. — 588 с.
10. Lala P. K. Self-Checking and Fault-Tolerant Digital Design / P. K. Lala. — San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001. — 216 p.
11. Göessel M. New Methods of Concurrent Checking: Edition 1 / M. Göessel, V. Ocheretny, E. Sogomonyan et al. —

- Dordrecht: Springer Science + Business Media B. V., 2008. — 184 p.
12. Reynolds D. Optimal NOR Networks for Self-Dual Functions of Four Variables / D. Reynolds, G. Metzger. — Technical Report, Illinois University, Urbana-Champaign, Coordinated Science Lab., May 1976, 19 p.
  13. Reynolds D. A. The Design of Alternating Logic Systems with Fault Detection Capabilities / D. A. Reynolds. — M. S. Thesis Illinois University, Urbana-Champaign, Coordinated Science Lab., August 1976.
  14. Reynolds D. A. Fault Detection Capabilities of Alternating Logic / D. A. Reynolds, G. Meize // IEEE Transactions on Computers. — 1978. — Vol. C-27. — Iss. 12. — Pp. 1093–1098. — DOI: 10.1109/TC.1978.1675011.
  15. Biernat J. Self-Dual Modules in Design of Dependable Digital Devices / J. Biernat // International Conference on Dependability of Computer Systems, 25–27 May 2006, Szklarska Poreba, Poland. — doi: 10.1109/DEPCOS-RELCOMEX.2006.50.
  16. Rai S. DiSCERN: Distilling Standard-Cells for Emerging Reconfigurable Nanotechnologies / S. Rai, M. Raitza, S. S. Sahoo et al. // Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), 09–13 March 2020, Grenoble, France. — doi: 10.23919/DATE48585.2020.9116216.
  17. Аксенова Г. П. Восстановление в дублированных устройствах методом инвертирования данных / Г. П. Аксенова // Автоматика и телемеханика. — 1987. — № 10. — С. 144–153.
  18. Saposhnikov V. V. Self-Dual Parity Checking — a New Method for on Line Testing / V. V. Saposhnikov, A. Dmitriev, M. Goessel et al. // Proceedings of 14th IEEE VLSI Test Symposium, USA, Princeton, 1996. — Pp. 162–168.
  19. Гессель М. Само тестируемая структура для функционального обнаружения отказов в комбинационных схемах / М. Гессель, А. В. Дмитриев, В. В. Сапожников и др. // Автоматика и телемеханика. — 1999. — № 11. — С. 162–174.
  20. Saposhnikov V. V. Experimental Results for Self-Dual Multi-Output Combinational Circuits / V. V. Saposhnikov, V. Moshanin, V. V. Saposhnikov et al. // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. — 1999. — Vol. 14. — Iss. 3. — Pp. 295–300. — DOI: 10.1023/A:1008370405607.
  21. Гессель М. Обнаружение неисправностей в комбинационных схемах с помощью самодвойственного контроля / М. Гессель, А. В. Дмитриев, В. В. Сапожников и др. // Автоматика и телемеханика. — 2000. — № 7. — С. 140–149.
  22. Сапожников В. В. О синтезе самодвойственных логических схем с памятью / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Р. Ш. Валиев // Электронное моделирование. — 2004. — Т. 26. — № 2. — С. 39–56.
  23. Сапожников В. В. Самодвойственные дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, М. Гессель. — СПб.: Энергоатомиздат (Санкт-Петербургское отделение), 2001. — 331 с.
  24. Сапожников В. В. Синтез самодвойственных дискретных систем / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Р. Ш. Валиев. — СПб.: Элмор, 2006. — 220 с.
  25. Ефанов Д. В. Обнаружение неисправностей в комбинационных схемах на основе самодвойственного дополнения до равновесных кодов / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников и др. // Труды Института системного программирования РАН. — 2019. — Т. 31. — № 1. — С. 115–132. — DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(1)-8.
  26. Efanov D. Self-Dual Complement Method up to Constant-Weight Codes for Arrangement of Combinational Logical Circuits Concurrent Error-Detection Systems / D. Efanov, V. Sapozhnikov, V. Sapozhnikov et al. // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, Georgia, September 13–16, 2019, pp. 136–143. — doi: 10.1109/EWDTS.2019.8884398.
  27. Ефанов Д. В. Самодвойственный контроль комбинационных схем с применением кодов Хэмминга / Д. В. Ефанов, Т. С. Погодина // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). — 2022. — № 3. — С. 113–122. — DOI: 10.31114/2078-7707-2022-3-113-122.
  28. Efanov D. V. Self-Dual Digital Devices with Calculations Testing by Modified Hamming Code / D. V. Efanov, T. S. Pogodina // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 24–27 January 2023, St. Petersburg, Russia. — Pp. 72–77.
  29. Ефанов Д. В. Построение самопроверяемых цифровых устройств на основе модифицированных кодов Хэмминга с контролем самодвойственности вычисляемых функций / Д. В. Ефанов, Т. С. Погодина // Автоматика на транспорте. — 2023. — Т. 9. — № 1. — С. 99–123. — DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-99-123.
  30. Ефанов Д. В. Исследование свойств самодвойственных комбинационных устройств с контролем вычислений на основе кодов Хэмминга / Д. В. Ефанов, Т. С. Погодина // Информатика и автоматизация. — 2023. — Т. 22. — № 2. — С. 349–392. — DOI: 10.15622/ia.22.2.5.
  31. Chen Y. The Circuit Design of Voltage-controlled Color Changing Lamp Based on Multisim / Y. Chen, M. Zhang, J. Hao // 2020 IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS), 28–30 July 2020, Shenyang, China. — doi: 10.1109/ICPICS50287.2020.9202148.
  32. Пархоменко П. П. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомоян. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 320 с.
  33. Микони С. В. Общие диагностические базы знаний вычислительных систем / С. В. Микони. — СПб.: Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации, 1992. — 234 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 2, pp. 205–221  
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-205-221

## Self-Dual Functional Gates for the Synthesis of Controllable Digital Systems

### Information about authors

**Efanov D. V.**, Doctor in Engineering, Professor, IEEE Member, Full-member of International Transport Academy, General Director Deputy on Scientific Research Work<sup>1</sup>, Professor<sup>2,3,4</sup>.

E-mail: TrES-4b@yandex.ru

**Pogodina T. S.**, Student<sup>3</sup>. E-mail: pogodina-ts@mail.ru

<sup>1</sup>Scientific Research and Design Institute "Transport and Construction Safety" LLC, Saint Petersburg

<sup>2</sup>Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Higher School of Transport, Mechanical Engineering, Material and Transport Institute, Saint Petersburg

<sup>3</sup>Russian Transport University (MIIT), Department of Automation, Remote Control and Communication on Railway Transport, Moscow

<sup>4</sup>Tashkent State Transport University, Department of Automation and Remote Control, Tashkent

**Abstract:** All self-dual analogs of elementary functional gates have been considered, the use of which allows for the synthesis of self-dual circuit implementations of arbitrary Boolean functions. In this case, two synthesis methods can be used, each one based on the property of any Boolean function to be transformed into a self-dual function using one additional variable. The first method involves replacing all non-self-dual functional gates in the device structure with self-dual analogs. The second one involves obtaining a self-dual function from the original formula. The study conducted modeling of self-dual functional gates in pulse mode of operation. It has been shown that all self-dual functional gates, except for those implementing equivalence and nonequivalence functions (modulo-2 addition), are fully self-checkable with respect to stuck-at faults when checking computations based on the belonging of the generated functions to the class of self-dual Boolean functions. However, the gates that implement the mentioned functions require additional monitoring. For them, error masking occurs due to the simultaneous distortion of signals on both combinations in a pair. This feature of these self-dual functional gates should be taken into account when developing controllable self-checking digital computing devices and systems. The article provides an example of using methods for constructing self-dual circuit implementations. The obtained results can be used in the synthesis of controllable self-dual computing devices and systems.

**Keywords:** self-dual Boolean function, calculation checking, controllable device, self-duality testing, self-checking circuit

### References

1. Stempkovskii A. L., Gavrilov S. V., Gurov S. I. et al. Metody proektirovaniya pomekhozashchishchennykh kombinatsionnykh KMOP-skhem, obespechivayushchie avtomaticheskoe ispravlenie oshibok [Methods of designing noise-immune combinational CMOS circuits ensuring automatic error correction]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies]. 2017, vol. 23, Iss. 10, pp. 728–735. (In Russian)
2. Bestemyanov P. F. Metody obespecheniya bezopasnosti apparatnykh sredstv mikropro-tsessornykh sistem upravleniya dvizheniem poezdov [Methods for ensuring the safety of hardware of microprocessor-based systems for train management]. *Elektrotekhnika* [Electrical Engineering]. 2020, Iss. 9, pp. 2–8. (In Russian)

3. Telpukhov D. V., Nadolenko V. V. Algoritm logicheskogo sinteza sbostoichivnykh skhem v tekhnologicheskoy bazise [Algorithm of Logical Synthesis of Fault-Tolerant Circuits in a Technological Basis]. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES)* [Problems of developing advanced micro- and nanoelectronic systems]. 2021, Iss. 4, pp. 52–58. DOI: 10.31114/2078-7707-2021-4-52-58. (In Russian)
4. Lala P. K. An Introduction to Logic Circuit Testing. Morgan & Claypool, 2009. DOI: 10.2200/S00149ED1V01Y200808DCS017.
5. Drozd A. V., Kharchenko V. S., Antoshchuk S. G. et al. *Rabocheye diagnostirovaniye bezopasnykh informatsionno-upravlyayushchikh sistem* [Working diagnostics of safe information management systems]. Natsional'nyy aerokosmicheskiy universitet im. N. E. Zhukovskogo "Khair", 2012, 614 p. (In Russian)
6. Dubrova E. Fault-Tolerant Design. Springer Science + Business Media New York 2013, 2013, XV + 185 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-2113-9.
7. Yarmolik V. N. *Kontrol' i diagnostika vychislitel'nykh sistem* [Control and diagnostics of computing systems]. Bestprint, 2019. (In Russian)
8. Sogomonyan E. S., Slabakov E. V. *Samoproveryaemye ustroystva i otkazostoychivyye sistemy* [Self-checking devices and fault-tolerant systems]. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1989. (In Russian)
9. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V. *Osnovy teorii nadezhnosti i tekhnicheskoy diagnostiki* [Fundamentals of reliability theory and technical diagnostics]. Saint Petersburg: Lan' Publ., 2019. (In Russian)
10. Lala P. K. Self-Checking and Fault-Tolerant Digital Design. Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
11. Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E. et al. New Methods of Concurrent Checking: Edition 1. Springer Science + Business Media B. V., 2008.
12. Reynolds D., Metz G. Optimal NOR Networks for Self-Dual Functions of Four Variables. Technical Report, Illinois University, Urbana-Champaign, Coordinated Science Lab., May 1976.
13. Reynolds D. A. The Design of Alternating Logic Systems with Fault Detection Capabilities. M.S. Thesis, Illinois University, Urbana-Champaign, Coordinated Science Lab., August 1976.
14. Reynolds D. A., Meize G. Fault Detection Capabilities of Alternating Logic. IEEE Transactions on Computers, 1978, vol. C-27, Iss. 12, pp. 1093–1098, DOI: 10.1109/TC.1978.1675011.
15. Biernat J. Self-Dual Modules in Design of Dependable Digital Devices. International Conference on Dependability of Computer Systems, May 25–27, 2006, Szklarska Poręba, Poland. DOI: 10.1109/DEPCOS-RELCOMEX.2006.50.
16. Rai S., Raita M., Sahoo S. S. et al. DISCERN: Distilling Standard-Cells for Emerging Reconfigurable Nanotechnologies. Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), March 9–13, 2020, Grenoble, France, DOI: 10.23919/DATE48585.2020.9116216.
17. Aksenova G. P. Vosstanovlenie v dublirovannykh ustroystvakh metodom invertirovaniya dannykh [Restoration in duplicated devices by data inversion]. *Avtomatika i Telemekhanika* [Automation and Telemechanics]. 1987, Iss. 10, pp. 144–153. (In Russian)
18. Sapozhnikov V. I., Dmitriev A., Goessel M. et al. Self-Dual Parity Checking — a New Method for on Line Testing. Proceedings of 14th IEEE VLSI Test Symposium, USA, Princeton, 1996, pp. 162–168.
19. Gessel M. Samotestiruemaya struktura dlya funktsional'nogo obnaruzheniya otkazov v kombinatsionnykh skhemakh [Self-testing structure for functional failure detection in combinational circuits]. *Avtomatika i Telemekhanika* [Automation and Telemechanics]. 1999, Iss. 11, pp. 162–174. (In Russian)
20. Sapozhnikov V. I., Moshanin V., Sapozhnikov V. V. et al. Experimental Results for Self-Dual Multi-Output Combinational Circuits. Journal of Electronic Testing: Theory and Applications, 1999, vol. 14, Iss. 3, pp. 295–300. DOI: 10.1023/A:1008370405607.

21. Gessel M. Obnaruzhenie neispravnostey v kombinatsionnykh skhemakh s pomoshch'yu samodvoystvennogo kontrolya [Fault detection in combinational circuits using self-dual control]. *Avtomatika i Telemekhanika* [Automation and Telemechanics]. 2000, Iss. 7, pp. 140–149. (In Russian)
22. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V., Valiev R. Sh. O sinteze samodvoystvennykh logicheskikh skhem s pamyat'yu [On the synthesis of self-dual logic circuits with memory]. *Elektronnoe modelirovanie* [Electronic modeling]. 2004, vol. 26, Iss. 2, pp. 39–56. (In Russian)
23. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V., Gessel' M. *Samodvoystvennye diskretnye ustroystva* [Self-dual discrete devices]. St. Petersburg: Energoatomizdat Publ. (Sankt-Peterburgskoe otdelenie), 2001, 331 p. (In Russian)
24. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V., Valiev R. Sh. *Sintez samodvoystvennykh dikretnykh sistem* [Synthesis of self-dual discrete systems]. St. Petersburg: Elmor Publ., 2006, 220 p. (In Russian)
25. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V. et al. Obnaruzhenie neispravnostey v kombinatsionnykh skhemakh na osnove samodvoystvennogo dopolneniya do ravnovesnykh kodov [Fault detection in combinational circuits based on self-dual complement to equilibrium codes]. *Trudy Instituta sistemnogo programirovaniya RAN* [Proceedings of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences]. 2019, vol. 31, Iss. 1, pp. 115–132. DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(1)-8. (In Russian)
26. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov VI. et al. Self-Dual Complement Method up to Constant-Weight Codes for Arrangement of Combinational Logical Circuits Concurrent Error-Detection Systems. Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, Georgia, 13–16 Sept. 2019, pp. 136–143. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884398.
27. Efanov D. V., Pogodina T. S. Samodvoystvennyy kontrol' kombinatsionnykh skhem s primeneniem kodov Khehminga [Self-dual control of combinational circuits using Hamming codes]. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES)* [Problems of development of promising micro- and nanoelectronic systems (MES)]. 2022, Iss. 3, pp. 113–122. DOI: 10.31114/2078-7707-2022-3-113-122. (In Russian)
28. Efanov D. V., Pogodina T. S. Self-Dual Digital Devices with Calculations Testing by Modified Hamming Code. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 24–27 Jan. 2023, St. Petersburg, Russia, pp. 72–77.
29. Efanov D. V., Pogodina T. S. Postroenie samoproveryaemykh tsifrovyykh ustroystv na osnove modifitsirovannykh kodov Khehminga s kontrol'em samodvoystvennosti vychislaemykh funktsiy [Construction of self-checking digital devices based on modified Hamming codes with self-duality control of calculated functions]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2023, vol. 9, Iss. 1, pp. 99–123. DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-99-123. (In Russian)
30. Efanov D. V., Pogodina T. S. Issledovanie svoystv samodvoystvennykh kombinatsionnykh ustroystv s kontrol'em vychisleniy na osnove kodov Khehminga [Investigation of the properties of self-dual combinational devices with control of calculations based on Hamming codes]. *Informatika i avtomatizatsiya* [Informatics and Automation]. 2023, vol. 22, Iss. 2, pp. 349–392. DOI: 10.15622/ia.22.2.5. (In Russian)
31. Chen Y., Zhang M., Hao J. The Circuit Design of Voltage-controlled Color Changing Lamp Based on Multisim. 2020 IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS), 28–30 July 2020, Shenyang, China. DOI: 10.1109/ICPICS50287.2020.9202148.
32. Parkhomenko P. P., Sogomonyan E. S. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki (optimizatsiya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnye sredstva)* [Fundamentals of technical diagnostics (optimization of diagnostic algorithms, hardware)]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1981, 320 p. (In Russian)
33. Mikoni S. V. *Obshchie diagnosticheskie bazy znaniy vychislitel'nykh sistem* [General diagnostic knowledge bases of computing systems]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy institut informatiki i avtomatizatsii Publ., 1992, 234 p. (In Russian)