



*Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»*

# **АВТОМАТИКА НА ТРАНСПОРТЕ**

## **TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH**

**Том 10 Март 2024 № 1**



Журнал «Автоматика на транспорте» (город 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://atjournal.ru/">http://atjournal.ru/</a>	

Подписано в печать **XX.03.2024**. Формат: 60 × 84, 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 10,5. Тираж: 200 экз. Заказ **0000**.

Отпечатано в типографии ООО «Типографский комплекс «Девиз»

190020, Санкт-Петербург, Вн. тер. г. МО Екатерингофский,

наб. Обводного канала, д. 138, к. 1, литера В, пом. 4-Н-6-часть, ком. 311-часть.

## 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, Суючжоу, 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>ЖИВУЧЕСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ</b>  <i>Баранов Л. А., Иванова Н. Д., Михалевич И. Ф.</i> Нечеткая система оценки рисков информационной безопасности интеллектуальных систем водного транспорта..... 7
<b>Издатель</b> ООО «Медиа-Сервис» по договору № ЭА00271 от 19.12.2023	<b>ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ</b>  <i>Никищенков С. А., Гаранин А. В.</i> Технология автоматизированной корректировки нормативных графиков движения поездов с применением программных роботов ..... 18
<b>Главный редактор</b>  А. Б. Никитин, д-р техн. наук, профессор ПГУПС, заведующий кафедрой	<b>СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ</b>  <i>Горев А. Э., Попова О. В., Плотников Д. Г., Олещенко Е. М.</i> Эффективность автоматизированного управления транспортными средствами в трамвайных системах ..... 32
<b>Редакция журнала</b>  Научный редактор — И. В. Кушпиль, канд. техн. наук Перевод — И. М. Насыров Литературный редактор и корректор — А. В. Соколова Верстка — М. В. Цыбульская	<b>ЭЛЕКТРОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ</b>  <i>Кокурин И. М., Пушкин И. А.</i> Тяговые расчеты с учетом дополнительных данных ..... 52
<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>ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ СИСТЕМЫ</b>  <i>Бушуев С. В., Ковалев И. А.</i> Восстановление движения после отказов с применением виртуальной сцепки поездов ..... 64
<b>Адрес издателя</b>  111116, г. Москва, ул. Энергетическая, д. 16, корп. 2, пом. 67, комн. 1	<b>В ПОРЯДКЕ ДИСКУССИИ</b>  <i>Тришин Н. А.</i> Цифровизация процесса проведения предсменного инструктажа в дистанции сигнализации, централизации и блокировки ..... 100
<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, 2024	

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>VIABILITY, RELIABILITY, SAFETY</b>  <i>Baranov L. A., Ivanova N. D., Mikhalevich I. F.</i> Fuzzy system for assessing the information security risk of intelligent water transport systems ..... 7
<b>PUBLISHER</b> Media Service LLC № ЭА00271, 19.12.2023	<b>INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS</b>  <i>Nikishchenkov S. A., Garanin A. V.</i> Automated adjustment technology standard train schedules using software robots ..... 18
<b>EDITOR-IN-CHIEF</b> Nikitin A. B., Doctor in Engineering, Professor, Head of Department	<b>TRANSPORT CONTROL SYSTEMS</b>  <i>Gorev A. E., Popova O. V., Plotnikov D. G., Oleshchenko E. M.</i> Efficiency of automated vehicle control in tram systems ..... 32
<b>JOURNAL STAFF</b> Science editor: Igor V. Kushpil, Ph. D. English translation: Ildar M. Nasyrov Editing and proofreading: Anna V. Sokolova Layout: Margarita V. Tsybul'skaya	<b>ELECTRONIC SIMULATION</b>  <i>Kokurin J. M., Pushkin I. A.</i> Traction calculations taking into account additional data ..... 52  <i>Bushuev S. V., Kovalev I. A.</i> Restoration of traffic after failures using a virtual train coupling ..... 64
<b>FOUNDER'S ADDRESS</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	<b>TECHNICAL DIAGNOSTICS AND CONTROLLABLE SYSTEMS</b>  <i>Efanov D. V., Yelina Y. I.</i> Study of algorithms for synthesis of self-checking digital devices based on Boolean correction of signals using weighted Bose – Lin codes ..... 74
<b>PUBLISHER'S ADDRESS</b> 111116, Moscow, Energeticheskaya str., 16/2, building 67, room 1	<b>DISCUSSION</b>  <i>Trishin N. A.</i> Process digitalization of providing pre-shift briefing in signals and interlocking division ..... 100
<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, 2024	

# НЕЧЕТКАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ РИСКОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

**БАРАНОВ Леонид Аврамович**, д-р техн. наук, зав. кафедрой; e-mail: baranov.miit@gmail.com

**ИВАНОВА Нина Дмитриевна**, аспирант; e-mail: ivanovand.nina@yandex.ru

**МИХАЛЕВИЧ Игорь Феодосьевич**, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник;  
e-mail: mif-orelf@mail.ru

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

Интеллектуализация водного транспорта сопровождается расширением ландшафта угроз транспортной безопасности, обусловленных особенностями и слабостями внедряемых технологий, являющихся конвергенцией информационных и телекоммуникационных технологий, технологий автоматизированного и автоматического управления и искусственного интеллекта. Особенностями указанных технологий является работа с большими объемами информации. Нарушение безопасности информации, обрабатываемой в интеллектуальных системах водного транспорта (неправомерный доступ, модификация, удаление и тому подобное несанкционированное воздействие) вызывает нарушение транспортной безопасности и, как следствие, безопасности критической информационной инфраструктуры и критической инфраструктуры страны, национальной безопасности. Для конвергентных технологий, используемых в интеллектуальных транспортных системах, характерен множественный и слабо формализуемый характер проявления последствий реализации угроз. В статье представлена модель оценки рисков информационной безопасности интеллектуальных систем водного транспорта, основанная на методах теории нечетких множеств и нечеткой логики, применение которых позволяет учесть вышеизложенные особенности внедряемых технологий. Иерархическая структура модели и применение методов теории нечетких множеств и нечеткой логики позволяет адаптировать модель под различные критерии рисков, типы входных данных и уровень детализации анализа рисков. Для представленной модели разработана методика оценки рисков информационной безопасности и приведен пример расчета риска. Разработанные модель и методика предназначены для построения системы управления рисками информационной безопасности автономного судоходства, реализующей технологии гибридного (дополненного, расширенного) интеллекта, предусматривающих управляемое людьми применение искусственного интеллекта.

**Ключевые слова:** информационная безопасность, водный транспорт, транспортная безопасность, естественный интеллект, искусственный интеллект, интеллектуальные системы, лингвистические переменные, системы агрегирования информации.

DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-01-7-17

## ▼ Введение

Интеллектуализация водного транспорта сопровождается расширением ландшафта угроз транспортной безопасности, обусловленных особенностями и слабостями внедряемых технологий, являющихся конвергенцией информационных и телекоммуникационных технологий, технологий автоматизированного и автоматического управления и искусственного интеллекта<sup>1</sup>. Особенностями указанных технологий является работа с большими объе-

мами информации. Нарушение безопасности информации, обрабатываемой в интеллектуальных системах водного транспорта (неправомерный доступ, модификация, удаление и тому подобное несанкционированное воздействие) вызывает нарушение транспортной безопасности и, как следствие, безопасности критической информационной инфраструктуры и критической инфраструктуры страны, национальной безопасности [1, 2].

Функционирование интеллектуальных систем водного транспорта (далее — ИСВТ) обеспечивается с использованием информации глобальных навигационных спутниковых систем, автоматических идентификационных

<sup>1</sup> Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 года № 3363-р).

систем, систем радиолокационного наблюдения и технического зрения, электронных навигационно-картографических систем, сайтов и множества других источников. Для указанных источников информации и конвергентных технологий, используемых в ИСВТ, характерен множественный [3–6] и слабо формализуемый характер проявления последствий реализации угроз, о чем свидетельствуют результаты исследований, опубликованных, в частности, в<sup>2,3</sup>.

Необходимым условием обеспечения транспортной безопасности и эффективности функционирования ИСВТ является управление рисками информационной безопасности (далее — ИБ) [7].

В статье представлена модель оценки рисков ИБ ИСВТ, основанная на методах теории нечетких множеств и нечеткой логики, применение которых позволяет учесть вышеизложенные особенности внедряемых технологий.

### **1. Методика оценки рисков информационной безопасности на основе теории нечетких множеств и нечеткой логики**

Система управления рисками ИБ ИСВТ предложена в [8]. Ее общая схема представлена на рис. 1. Схема отражает следующие сущности и процессы. Нарушители реализуют угрозы ИБ с использованием особенностей и слабостей (уязвимостей) ИСВТ, вследствие чего возникают риски нарушения свойств безопасности информации. Система оценки рисков ИБ ИСВТ формирует информационные свидетельства, достаточные для принятия решения о выборе мер обеспечения ИБ и снижения рисков. Используя результаты оценки рисков, система принятия мер обеспечения ИБ ИСВТ формирует и реализует меры, необходимые для поддержания требуемого уровня ИБ. Система мониторинга ИБ ИСВТ и базы данных уязвимостей и угроз безопасности информации (далее — УБИ) являются источни-

ками входных данных для системы управления рисками ИБ.

Для автоматизации оценки рисков ИБ активно используются технологии искусственного интеллекта (далее — ИИ) [9, 10]. Однако их применение сдерживается, в частности, фактором недоверия, основанном на риске неконтролируемого функционирования ИИ. В связи с этим активно рассматривается вопрос применения технологий гибридного (дополненного, расширенного) интеллекта, основанных на сочетании возможностей человеческого (естественного) и искусственного интеллекта [11, 12], создания гибридных интеллектуальных систем [13]. Под гибридными интеллектуальными системами будем понимать системы, построенные с использованием технологий гибридного интеллекта. Гибридные интеллектуальные системы, для описания которых используется аппарат нечетких множеств и нечеткой логики, далее будем называть нечеткими системами.

Традиционно оценка рисков ИБ производится преимущественно с использованием методов экспертной оценки. Результат экспертной оценки представляет собой нечеткое знание, так как решение, принимаемое на основе мнений экспертов, почти всегда является компромиссом между противоречивыми требованиями, стремлением к широким возможностям создаваемой системы и низкой стоимостью. Для обоснования выбора лучшего решения используются следующие критерии качества результатов экспертной оценки (по методике, изложенной в [14]):

- коэффициент согласия (конкордации);
- коэффициент важности (предпочтительности) варианта решения.

Представим систему оценки рисков ИБ ИСВТ как иерархическую структуру, так как величина риска ИБ зависит от многих характеристик, таких как состояние защищенности системы от УБИ, возможности нарушителя ИБ, негативные последствия от успешной реализации УБИ и другие. Эти характеристики могут иметь как четкие, так и нечеткие оценки, выполненные экспертами с использованием различных шкал и критериев.

В [11, 12, 15, 16] заложена теоретическая основа для построения иерархических чело-

<sup>2</sup> Threat Landscape Transport Sector. ENISA, March 21, 2023. URL: <https://www.enisa.europa.eu/publications/enisa-transport-threat-landscape>.

<sup>3</sup> Threat landscape for industrial automation systems. First half of 2023. URL: <https://ics-cert.kaspersky.ru/publications/reports/2023/09/13/threat-landscape-for-industrial-automation-systems-statistics-for-h1-2023/>.





Рис. 1. Схема системы управления рисками ИБ ИСВТ

веко-компьютерных систем агрегирования информации, предлагаются соответствующие решения для объектов критической информационной инфраструктуры [11, 12] и социотехнических систем [16]. В [17] для оценки рисков ИБ технологий интернета вещей разработаны две нечеткие системы: оценки вероятности реализации УБИ и оценки вероятного ущерба.

В настоящей работе предлагается представить систему оценки рисков ИБ ИСВТ как нечеткую иерархическую систему агрегирования информации, входными данными для которой являются результаты экспертной оценки характеристик рисков, а в качестве инструмента для обработки и обобщения экспертных знаний использовать аппарат теории нечетких множеств и нечеткой логики.

Риск может быть определен лингвистической переменной (ЛП), представляющей кортеж вида (1):

$$\langle R, X, T^R \rangle, \quad (1)$$

где  $R$  — «Риск» (имя ЛП);

$X$  — множество действительных чисел из интервала  $[0;1]$ ;

$T^R$  — нечеткое терм-множество, определенное на  $X$ .

$T^R$  определяет множество всех возможных значений  $R$ . Согласно<sup>4</sup> риск ИБ может принимать одно из пяти лингвистических значений: «Очень низкий», «Низкий», «Средний», «Высокий», «Очень высокий». То есть:  $T^R = \{t_i^R\}_{i=1}^5 = \{VL, L, M, H, VH\}$ .

Каждый терм  $t_i^R$  нечеткого терм-множества  $T^R$  является нечетким множеством на множестве  $X$  и задается посредством функции принадлежности (ФП)  $\mu^{t_i^R} : X \rightarrow [0;1]$ . Значение  $\mu^{t_i^R}(x)$  определяет степень принадлежности элемента  $x$  нечеткому множеству  $t_i^R$  на отрезке  $[0;1]$ .

ФП может задаваться различными способами, одним из видов ФП является треугольная ФП, которая определяется в виде треугольника на графике, с возвышением в точке максимальной принадлежности. Треугольные ФП широко используются, особенно в приложениях реального времени, благодаря своей простоте, что обеспечивает высокую скорость вычислений [18]. Треугольная ФП задается

<sup>4</sup> ISO/IEC 27005:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection. Guidance on managing information security risks.

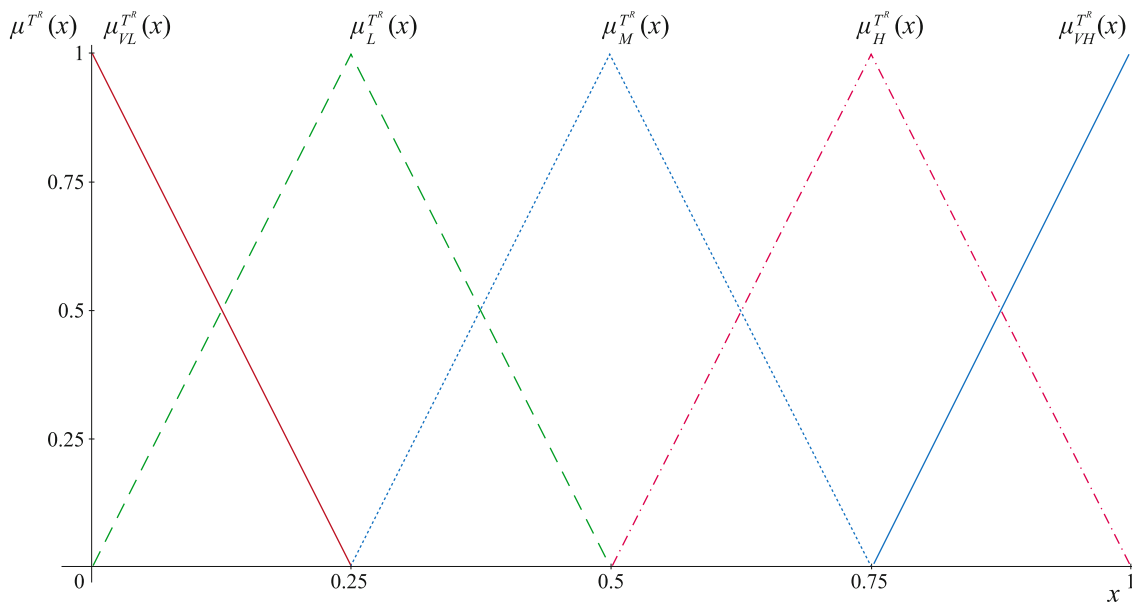
нечетким треугольным числом, представляющим собой тройку действительных чисел  $\langle a, b, c \rangle$  ( $a \leq b \leq c$ ) (2):

$$\mu^{t^R}(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & x \in [a, b] \\ \frac{x-c}{b-c}, & x \in [b, c] \\ 0, & x \notin [a, c] \end{cases} \quad (2)$$

При  $b - a = c - b$  такая ФП называется симметричной треугольной ФП. Для ЛП «Риск», представимой терм-множеством  $T^R = \{t_i^R\}_{i=1}^5 = \{VL, L, M, H, VH\}$  на  $X = [0, 1]$ , термы могут характеризоваться следующими симметричными треугольными ФП (рис. 2):  $\mu_{VL}^{T^R}(x)$ ,  $\mu_L^{T^R}(x)$ ,  $\mu_M^{T^R}(x)$ ,  $\mu_H^{T^R}(x)$ ,  $\mu_{VH}^{T^R}(x)$ .

Если  $A, B$  — нечеткие множества, то операции пересечения (логическое И) и объединения (логическое ИЛИ) задаются для них следующим образом (3):

$$\begin{aligned} \mu^{A \cap B}(x) &= \min(\mu^A(x), \mu^B(x)) \\ \mu^{A \cup B}(x) &= \max(\mu^A(x), \mu^B(x)) \end{aligned} \quad (3)$$



**Рис. 2.** Треугольные ФП термов ЛП «Риск»

Существуют множество методов и средств нечеткого логического вывода [19], которые используются для обработки нечеткой информации и принятия решений на основе нечетких данных. Для нечетких систем, в качестве входных данных использующих экспертное знание, наиболее распространенным методом нечеткого логического вывода являются продукционные правила. Примером таких правил в сфере обеспечения ИБ и оценки рисков ИБ являются матрицы риска<sup>5</sup>.

Основными компонентами нечеткой системы являются [18, 20, 21]:

- фаззификатор, реализующий процедуру фаззификации исходных данных (четких или нечетких), то есть нахождения значений ФП нечеткому терм-множеству;
- машина вывода, которая с использованием операторов агрегирования информации генерирует нечеткие выходные данные на основе нечетких входных данных;
- дефаззификатор, реализующий процедуру, обратную фаззификации, для нахождения четкого значения величины риска.

<sup>5</sup> ISO/IEC 27005:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection. Guidance on managing information security risks.

В результате методика оценки рисков ИБ ИСВТ на основе теории нечетких множеств и нечеткой логики включает в себя следующую совокупность последовательных действий:

- построение модели системы оценки рисков ИБ ИСВТ как нечеткой иерархической системы агрегирования информации, в том числе определение характеристик рисков, оцениваемых экспертами;
- получение экспертных оценок характеристик рисков;
- фазсификация экспертных оценок характеристик рисков;
- применение операторов агрегирования информации (продукционных таблиц и операций (3) и получение нечетких выходных данных;
- дефазсификация полученного нечеткого значения величины риска.

## 2. Модель нечеткой системы оценки рисков информационной безопасности интеллектуальных систем водного транспорта

Модель нечеткой системы оценки рисков ИБ ИСВТ (рис. 3) представляет собой дерево, где каждая некорневая вершина — ЛП характеристики рисков ИБ ИСВТ, которой поставлено в соответствие некоторое терм-множество ее всевозможных значений. Назовем индикаторами концевые вершины дерева, для которых эксперты задают значения (на рис. 3 обозначены пунктирной линией). Каждой неконцевой вершине приписан некоторый оператор агрегирования информации, позволяющий на основе оценок состояния подчиненных вершин вычислять ее состояние.

В табл. 1 приведен перечень обозначений для рис. 3.

Основываясь на определениях международных и государственных стандартов в области менеджмента риска ИБ<sup>6,7</sup> в предлагаемой модели в качестве основных характеристик

<sup>6</sup> ISO/IEC 27005:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection. Guidance on managing information security risks.

<sup>7</sup> ГОСТ Р 27005-2010. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент риска информационной безопасности.

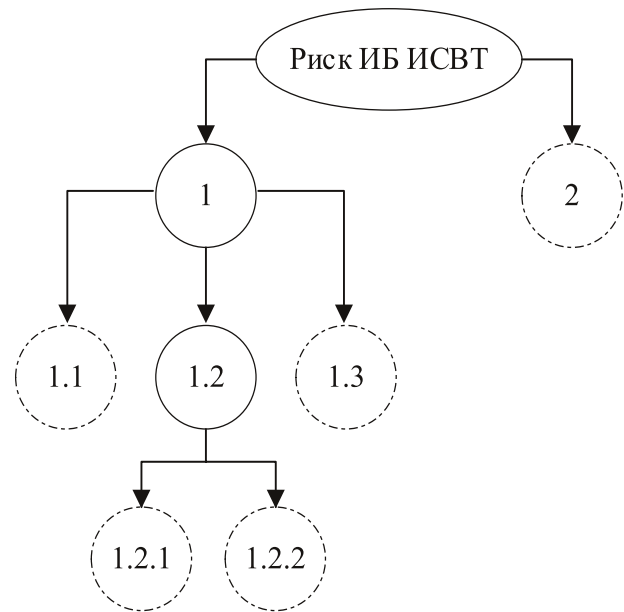


Рис. 3. Модель нечеткой системы оценки рисков ИБ ИСВТ

Таблица 1. Перечень характеристик рисков ИБ ИСВТ

Код показателя	Наименование показателя
1	Вероятность реализации УБИ
1.1	Возможности нарушителя, достаточные для использования уязвимости
1.2	Серьезность используемой уязвимости
1.2.1	Оценка уязвимости CVSS (Common Vulnerability Scoring System)
1.2.2	Статистика использования уязвимости
1.3	Защищенность системы
2	Негативные последствия реализации УБИ

для расчета рисков ИБ ИСВТ выбраны следующие два показателя:

- вероятность реализации УБИ;
- негативные последствия реализации УБИ.

Показатель характеризуется субпоказателями (подчиненными вершинами), которые вносят вклад в значение соответствующего показателя. Для показателя «Возможность реализации УБИ» применимы следующие субпоказатели:

- возможности нарушителя, достаточные для использования уязвимости;
- серьезность используемой уязвимости;
- защищенность системы.

**Таблица 2. Индикаторы модели нечеткой системы оценки рисков ИБ ИСВТ**

Наименование индикатора	Используемые для оценки данные или соответствующий методический документ	Методика определения числового значения индикатора
Возможности нарушителя, достаточные для использования уязвимости	Оценка возможностей нарушителя (ВН) в соответствии с методикой <sup>8</sup>	$x^{ВН} = \begin{cases} 0,0 - \text{если базовые возможности;} \\ 0,33 - \text{если базовые повышенные возможности;} \\ 0,66 - \text{если средние возможности;} \\ 1,0 - \text{если высокие возможности.} \end{cases}$
Оценка уязвимости CVSS	Оценка CVSS в соответствии с методикой <sup>9</sup>	$x^{CVSS} = \frac{CVSS}{10}, \text{ где } CVSS \in [0;10] \text{ — оценка CVSS}$
Статистика использования уязвимости	Оценка на основе данных годовых отчетов и рейтингов уязвимостей	$x^{stat} = \begin{cases} 0,0 - \text{если очень редко;} \\ 0,25 - \text{если редко;} \\ 0,5 - \text{если достаточно часто;} \\ 0,75 - \text{если часто;} \\ 1,0 - \text{если очень часто.} \end{cases}$
Защищенность системы	Оценка реализованных мер защиты (МЗ) согласно требованиям ФСТЭК России <sup>10</sup>	$x^{МЗ} = \begin{cases} 0,0 - \text{если очень низкий уровень защищенности;} \\ 0,25 - \text{если низкий уровень защищенности;} \\ 0,5 - \text{если средний уровень защищенности;} \\ 0,75 - \text{если высокий уровень защищенности;} \\ 1,0 - \text{если очень высокий уровень защищенности.} \end{cases}$
Негативные последствия реализации УБИ	Оценка негативных последствий (НП) в соответствии с методикой <sup>11</sup>	$x^{НП} = \begin{cases} 0,0 - \text{если незначительные негативные последствия;} \\ 0,25 - \text{если значительные негативные последствия;} \\ 0,5 - \text{если серьезные негативные последствия;} \\ 0,75 - \text{если критические негативные последствия;} \\ 1,0 - \text{если катастрофические негативные последствия.} \end{cases}$

В свою очередь, серьезность используемой уязвимости характеризуется оценкой уязвимости CVSS и статистикой использования уязвимости.

Индикаторы нечеткой модели системы оценки рисков ИБ ИСВТ и способы их оценки представлены в табл. 2.

Значения индикаторов определяются методом экспертной оценки. Для обоснования оценок экспертов могут быть приняты критерии качества, оговоренные ранее.

<sup>8</sup> Методический документ. Методика оценки угроз безопасности информации: утверждена ФСТЭК России 05.02.2021.

<sup>9</sup> Common Vulnerability Scoring System version 4.0: Specification Document / Forum of Incident Response and Security Teams (FIRST).

<sup>10</sup> Требования по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации (утверждены Приказом ФСТЭК России от 25.12.2017. № 239).

<sup>11</sup> Проект национального стандарта ГОСТ Р ИСО/МЭК 27005. Информационная безопасность, кибербезопасность и защита частной жизни. Руководство по управлению рисками информационной безопасности. Требования и руководства. URL: <https://fstec.ru/tk-362/standarty/proekty/proekt-natsionalnogo-standarta-gost-r-iso-mek-27005?ysclid=lsakd3b9i41408646>.

### 3. Пример оценки риска информационной безопасности

Пусть на вход нечеткой системы поступают следующие утверждения (значения индикаторов):

- возможности нарушителя: базовые повышенные;
- оценка уязвимости CVSS: 6;
- статистика использования уязвимости: часто;
- защищенность системы: средняя;
- негативные последствия реализации УБИ: значительные.

Операция агрегирования информации реализуется с использованием продукционных таблиц, составленных экспертами, и операций логического И и логического ИЛИ (3). Исходные данные оцениваются и нормализуются согласно табл. 2 при  $X = [0;1]$ . В качестве ФП выбраны симметричные треугольные ФП (см. рис. 2),  $T = \{VL; L; M; H; VH\}$  для всех ЛП.

Соответствующие числовые значения исходных данных на отрезке  $[0;1]$ :

- переменная «Возможности нарушителя, достаточные для использования уязвимости»:  $x^{BH} = 0,33$ ;
- переменная «Оценка уязвимости CVSS»:  $x^{CVSS} = 0,6$ ;
- переменная «Статистика использования уязвимости»:  $x^{ctam} = 0,75$ ;
- переменная «Защищенность системы»:  $x^{M3} = 0,5$ ;
- переменная «Последствия успешной реализации УБИ»:  $x^{HII} = 0,25$ .

Ниже приведены результаты фаззификации для каждой ЛП с использованием ФП, представленных на рис. 2:

$$\begin{aligned}
 \mu_{VL}^{T^{BH}}(0,33) = 0; \mu_L^{T^{BH}}(0,33) = 0,68; \mu_M^{T^{BH}}(0,33) = 0,32; \\
 \mu_H^{T^{BH}}(0,33) = 0; \mu_{VH}^{T^{BH}}(0,33) = 0 \\
 \mu_{VL}^{T^{CVSS}}(0,6) = 0; \mu_L^{T^{CVSS}}(0,6) = 0; \mu_M^{T^{CVSS}}(0,6) = 0,65; \\
 \mu_H^{T^{CVSS}}(0,6) = 0,35; \mu_{VH}^{T^{CVSS}}(0,6) = 0 \\
 \mu_{VL}^{T^{ctam}}(0,75) = 0; \mu_L^{T^{ctam}}(0,75) = 0; \mu_M^{T^{ctam}}(0,75) = 0; \\
 \mu_H^{T^{ctam}}(0,75) = 1; \mu_{VH}^{T^{ctam}}(0,75) = 0 \\
 \mu_{VL}^{T^{M3}}(0,5) = 0; \mu_L^{T^{M3}}(0,5) = 0; \mu_M^{T^{M3}}(0,5) = 1; \\
 \mu_H^{T^{M3}}(0,5) = 0; \mu_{VH}^{T^{M3}}(0,5) = 0 \\
 \mu_{VL}^{T^{HII}}(0,25) = 0; \mu_L^{T^{HII}}(0,25) = 1; \mu_M^{T^{HII}}(0,25) = 0; \\
 \mu_H^{T^{HII}}(0,25) = 0; \mu_{VH}^{T^{HII}}(0,25) = 0
 \end{aligned} \tag{4}$$

В (4)  $\mu_H^{T^{CVSS}}(0,6) = 0,35$  означает, что значение ЛП «Оценка уязвимости CVSS»  $t^{CVSS} = H$  («Высокая») соответствует  $x^{CVSS} = 0,6$  со степенью уверенности, определяемой значением ФП  $\mu_H^{T^{CVSS}}(0,6) = 0,35$  на отрезке  $[0;1]$ .

Значение ЛП «Серьезность уязвимости»  $t^{CV}$  определяется ЛП «Оценка уязвимости CVSS» и «Статистика использования уязвимости» с помощью продукционных правил (табл. 3).

**Таблица 3. Продукционные правила для определения значения  $t^{CV}$  (фрагмент)**

№ правила	$t^{CVSS}$	$t^{ctam}$	$t^{CV}$
		...	
14	M	H	M
		...	
19	H	H	H
		...	

Согласно базе продукционных правил (табл. 3) и с применением операции логического И получают следующие значения ФП для соответствующих значений  $t^{CV}$ :

- правило 14:  
 $t^{CV} = M : \mu_M^{T^{CV}} = \min(0,65; 1) = 0,65$ ;
- правило 19:  
 $t^{CV} = H : \mu_H^{T^{CV}} = \min(0,35; 1) = 0,35$ .

Значение ЛП «Вероятность реализации УБИ»  $t^{VUBI}$  определяется ЛП «Возможности нарушителя, достаточные для использования уязвимости», «Серьезность уязвимости» и «Защищенность системы» с помощью продукционных правил (табл. 4).

**Таблица 4. Продукционные правила для определения значения  $t^{VUBI}$  (фрагмент)**

№ правила	$t^{BH}$	$t^{CV}$	$t^{M3}$	$t^{VUBI}$
		...		
38	L	M	M	H
		...		
43	L	H	M	H
		..		
63	M	M	M	M
		...		
68	M	H	M	M
		...		

Аналогично получают следующие значения  $t^{VUBI}$ :

- правило 38:  
 $t^{VUBI} = H : \mu_{H38}^{T^{VUBI}} = \min(0,68; 0,65; 1) = 0,65$ ;
- правило 43:  
 $t^{VUBI} = H : \mu_{H43}^{T^{VUBI}} = \min(0,68; 0,35; 1) = 0,35$ ;
- правило 63:  
 $t^{VUBI} = M : \mu_{M63}^{T^{VUBI}} = \min(0,32; 0,65; 1) = 0,32$ ;
- правило 68:  
 $t^{VUBI} = M : \mu_{M68}^{T^{VUBI}} = \min(0,32; 0,35; 1) = 0,32$ .

Правила 38, 43 и 63, 68 дают одинаковые значения  $t^{VUBI} = H$  и  $t^{VUBI} = M$  соответственно. Очевидно, что  $\mu_M^{T^{VUBI}} = \mu_{M63}^{T^{VUBI}} = \mu_{M68}^{T^{VUBI}} = 0,32$ . Итоговое значение  $\mu_H^{T^{VUBI}}$  определяется с использованием операции логического ИЛИ (5):

$$t^{VUBI} = H : \mu_H^{T^{VUBI}} = \max(0,65; 0,35) = 0,65. \tag{5}$$

Значение ЛП «Риск»  $t^R$  определяется ЛП «Вероятность реализации УБИ» и «Негативные последствия реализации УБИ» с помощью

продукционных правил (табл. 5), заданных на основе матрицы риска, предложенной в 12.

**Таблица 5. Продукционные правила для определения значения  $t^R$  (фрагмент)**

№ правила	$t^{ВУБИ}$	$t^{НП}$	$t^R$
	...		
12	М	L	L
	...		
17	Н	L	М
	...		

Согласно базе продукционных правил (табл. 5) и с применением операции логического И получают следующие значения ФП для соответствующих значений  $t^R$ :

– правило 12:

$$t^R = L : \mu_L^{T^R} = \min(0,32; 1) = 0,32;$$

– правило 17:

$$t^R = M : \mu_M^{T^R} = \min(0,65; 1) = 0,65.$$

Выполненная нечеткая оценка риска (нахождение  $t^R$ ) означает, что искомый риск определяется как «Низкий» со степенью уверенности 0,32 и как «Средний» со степенью уверенности 0,65. Следует отметить, что понятие степени уверенности в принадлежности нечеткому множеству (значение ФП в нечеткой логике) не связано с понятием вероятности в теории вероятностей [22].

Дефазсификация производится путем вычисления средневзвешенного значения  $x^R$  [23]:

$$x^R = \frac{x_{\mu_L^{T^R}} \cdot \mu_L^{T^R} + x_{\mu_M^{T^R}} \cdot \mu_M^{T^R}}{\mu_L^{T^R} + \mu_M^{T^R}} = \frac{0,25 \cdot 0,32 + 0,5 \cdot 0,65}{0,32 + 0,65} = 0,42, \tag{6}$$

где  $x_{\mu_L^{T^R}} = 0,25$  — значение, при котором  $\mu_L^{T^R}(x)$  достигает максимума (см. рис. 2);

<sup>12</sup> Проект национального стандарта ГОСТ Р ИСО/МЭК 27005. Информационная безопасность, кибербезопасность и защита частной жизни. Руководство по управлению рисками информационной безопасности. Требования и руководства. URL: <https://fstec.ru/tk-362/standarty/proekty/proekt-natsionalnogo-standarta-gost-r-iso-mek-27005?ysclid=lsakd3b9i41408646>

$x_{\mu_M^{T^R}} = 0,5$  — значение, при котором  $\mu_M^{T^R}(x)$

достигает максимума (см. рис. 2).

В результате итоговое значение риска  $x^R$  при заданных исходных данных равно 0,42 на отрезке [0;1], где значение 0 соответствует минимальному значению риска, а 1 — максимальному.

Если, согласно действующей политике ИБ, риск  $x^R = 0,42$  признается приемлемым, система защиты остается в неизменном состоянии. В случае если риск признается неприемлемым, система принятия мер обеспечения ИБ ИСВТ вырабатывает и реализует защитные мероприятия. При этом предполагается, что внесение изменений в систему защиты может повлиять на функциональность ИСВТ, что также является риском. Кроме того, даже после введения соответствующих мер защиты может существовать остаточный риск. Остаточные риски и риски, признанные приемлемыми, должны отслеживаться и контролироваться системой мониторинга ИБ ИСВТ (см. рис. 1).

### Заключение

Оценка рисков ИБ является важным инструментом в обеспечении ИБ ИСВТ и предназначена для формирования полных и достоверных информационных свидетельств, достаточных для принятия решения о необходимости обработки выявленных рисков ИБ. В условиях непрерывного развития технологий ИСВТ и возникновения новых видов уязвимостей и угроз безопасности информации, автоматизация процесса оценки рисков ИБ ИСВТ является необходимой.

Разработанная модель нечеткой системы оценки рисков ИБ ИСВТ представляет собой иерархическую структуру в виде дерева, где каждая вершина соответствует лингвистической переменной, характеризующей риски ИБ ИСВТ. Значения лингвистических переменных концевых вершин дерева определяются методом экспертной оценки, а значения лингвистических переменных вершин более высокого уровня — методами нечетких множеств и нечеткой логики, что определяет разработанную модель системы оценки рисков как основанную на технологиях гибридного интеллекта.

Предложенный метод оценки рисков ИБ учитывает множество факторов, необходимых для рассмотрения при оценке рисков ИБ ИСВТ, среди которых:

- возможности нарушителя, достаточные для использования имеющихся в ИСВТ уязвимостей;
- применяемые в ИСВТ меры защиты информации;
- оценка уязвимостей CVSS;
- статистика использования уязвимостей;
- негативные последствия успешной реализации УБИ.

Преимуществом разработанной модели системы оценки рисков ИБ является ее адаптируемость под различные критерии рисков, типы входных данных и степень необходимой детализации анализа рисков.

Дальнейшее развитие этого метода предполагает интеграцию экспертной оценки рисков ИБ с методами машинного обучения для создания более эффективной системы оценки рисков ИБ. ▲

#### Библиографический список

1. Mikhalevich I. F. Problemic Issues of Deploying Cooperative Intelligent Transport Systems During of Digital Transformation. In 2021 International Conference "Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications". DOI: 10.1109/IEEECONF51389.2021.9415999.
2. Баранов Л. А. Иванова Н. Д., Михалевич И. Ф. и др. Информационная безопасность системы автономного судовождения в контексте специфических для интеллектуальных транспортных систем угроз // Сборник трудов международной научной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». Москва, 13 декабря 2023 г. (статья принята к публикации).
3. Andrej Androjna, Marko Perkovic. Impact of Spoofing of Navigation Systems on Maritime Situational Awareness. September 2021. Transactions on Maritime Science 10(2). DOI: 10.7225/toms.v10.n02.w08.
4. Goudosis A., Katsikas S. Secure Automatic Identification System (SecAIS): Proof-of-Concept Implementation // Journal of Marine Science and Engineering. 2022, 10, 805. J. Mar. Sci. Eng. 2022, 10, 805. DOI: 10.3390/jmse10060805.
5. Svilicic B., Brčić D., Žuškin S., et al. (2019, March). Raising Awareness on Cyber Security of ECDIS // TransNav, The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2019. Vol. 13, no. 1. P. 231–236. DOI: 10.12716/1001.13.01.24.
6. Karahalios H. Appraisal of a Ship's Cybersecurity efficiency: the case of piracy // J Transp Secur. 2020. Vol. 13. P. 179–201. DOI 10.1007/s12198-020-00223-1.
7. Kavallieratos G., Katsikas S. Managing Cyber Security Risks of the Cyber-Enabled Ship // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. No. 8 (768). 19 p. DOI: 10.3390/jmse8100768/.
8. Иванова Н. Д., Михалевич И. Ф., Якунчиков В. В. Управление рисками информационной безопасности интеллектуальных транспортных систем внутреннего водного транспорта // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Транспорт России: проблемы и перспективы». Санкт-Петербург, 14–15 ноября 2023 г.
9. Kharchenko V., Illiashenko O., Fesenko H., et al. AI Cybersecurity Assurance for Autonomous Transport Systems: Scenario, Model, and IMECA-Based Analysis. In: Dziech, A., Mees, W., Niemiec, M. (eds) Multimedia Communications, Services and Security. MCSS 2022. Communications in Computer and Information Science. 2022. Vol. 1689. Pp 66–79. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-20215-5\_6.
10. Kharbanda Varun. Journal: Application of Artificial Intelligence in Cyber security (IJSPPC). 2023. Vol. 15, no. 1. P. 1–13. DOI: org/10.4018/ijsppc.318676.
11. Ryjov A. P., Mikhalevich I. F. Hybrid intelligence framework for improvement of information security of critical infrastructures. In book: Handbook of Research on Cyber Crime and Information Privacy. Hershey, PA, US 2021. DOI: 10.4018/978-1-7998-5728-0.ch016.
12. Mikhalevich I. F., Ryjov A. P. Augmented Intelligence Framework for Protecting against Cyberattacks, 2018 // Engineering and Telecommunication (EnT-MIPT), Moscow, Russia, 2018. P. 143–145. DOI: 10.1109/EnT-MIPT.2018.00039.
13. Карякин В. В. Гибридные интеллектуальные системы как симбиоз естественного и искусственного интеллектов // Россия: тенденции и перспективы развития. 2022. № 17 (1). С. 652–655.
14. Лецкий Э. К., Панкратов В. И., Яковлев В. В. Информационные технологии на железнодорожном транспорте / под ред. Э. К. Лецкого, Э. С. Поддашкина, В. В. Яковлева. М.: УМК МПС России, 2000. 678 с.
15. Рыжов А. П. Об агрегировании информации в нечетких иерархических системах // Интеллектуальные системы. 2001. Т. 6, Вып. 1–4. С. 69–79.
16. Рыжов А. П. Оценка и мониторинг процессов в социотехнических системах и связанные с ними задачи // Интеллектуальные системы. 2001. Т. 22, Вып. 2. С. 129–140.
17. Kerimkhulle S., Dildebayeva Z., Tokhmetov F., et al. Fuzzy Logic and Its Application in the Assessment of Information Security Risk of Industrial Internet of

- Things, Symmetry. 2023. 15 (10). 1958. DOI: 10.3390/sym15101958.
18. Azam M. H., Hasan M. H., Hassan S., et al. Fuzzy Type-1 Triangular Membership Function Approximation Using Fuzzy C-Means, 2020 // International Conference on Computational Intelligence (ICCI), Bandar Seri Iskandar, Malaysia, 2020. P. 115–120. DOI: 10.1109/ICCI51257.2020.9247773.
  19. Карелин В. П. Методы и средства нечеткого логического вывода, представления и защиты данных в интеллектуальных системах управления и поддержки принятия решений // Вестник ТИ-УиЭ. 2016. № 2 (24). С. 5.
  20. Cahyaningrum Y., Suryono S., Warsito B. Fuzzy-Expert System for Indicator and Quality Evaluation of Teaching and Learning Processes Online Study Programs // The 6<sup>th</sup> International Conference on Energy, Environment, Epidemiology, and Information System (ICENIS 2021). 2021. Vol. 317. 11 p. DOI: 10.1051/e3sconf/202131705021.
  21. Rizvi S. S., Mitchell J., Razaque A., et al. A fuzzy inference system (FIS) to evaluate the security readiness of cloud service providers // Journal of Cloud Computing. 2020. № 9 (1). 17 p. DOI:10.1186/s13677-020-00192-9.
  22. Dubois D., Prade H. Fuzzy sets and probability: misunderstandings, bridges and gaps // 2<sup>nd</sup> IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZY 1993), IEEE, Mar 1993, San Francisco, United States. P. 1059–1068. DOI: ff10.1109/FUZZY.1993.327367ff.
  23. Jain D., Sharma S. K., Dhiman P. Comparative Analysis of Defuzzification Techniques for Fuzzy Output // Journal of algebraic statistics. 2022. Vol. 13, no. 13. P. 874–882.

*TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH. 2024. Vol. 10, no. 1. P. 7–17  
DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-01-7-17*

### Fuzzy system for assessing the information security risk of intelligent water transport systems

#### Information about authors

**Baranov L. A.**, Doctor in Engineering, Head of the Department.

E-mail: baranov.miit@gmail.com

**Ivanova N. D.**, Postgraduate Student. E-mail: ivanovand.nina@yandex.ru

**Mikhalevich I. F.**, PhD in Engineering, Associate Professor, Senior Researcher.

E-mail: mif-orelf@mail.ru

Russian University of Transport (MIIT), Department of Control and Protection of Information, Moscow

**Abstract.** The intellectualization of water transport is accompanied by an expansion of the landscape of threats to transport security, caused by the characteristics and weaknesses of the technologies being introduced, which are the convergence of information and telecommunication technologies, automated and automatic control technologies and artificial intelligence. The peculiarity of these technologies is working with large volumes of information. Violation of the security of information processed in intelligent systems of water transport (illegal access, modification, deletion and similar unauthorized influence) causes a violation of transport security and, as a consequence, the security of critical information infrastructure and the country's critical infrastructure, national security. Convergent technologies used in intelligent transport systems are characterized by multiple and poorly formalized manifestations of the consequences of threats. The article presents a model for assessing the risks of information security of intelligent water transport systems, based on the methods of the theory of fuzzy sets and fuzzy logic, the use of which makes it possible to take into account the above-mentioned features of the technologies being implemented. The hierarchical structure of the model and the use of fuzzy set theory and fuzzy logic methods make it possible to adapt the model to various risk criteria, types of input data and the level of detail of risk analysis. For the presented model, a methodology for assessing information security risks has been developed and an example of risk calculation is given. The developed model and methodology are intended to build an information security risk management system for autonomous shipping, implementing technologies of hybrid (augmented, extended) intelligence, providing for the use of artificial intelligence controlled by people.

**Keywords:** transport security; natural intelligence; artificial intelligence; intelligent systems; linguistic variables; information aggregation systems.

#### References

1. Mikhalevich I. F. Problemic Issues of Deploying Cooperative Intelligent Transport Systems During of Digital Transformation. In 2021 International Conference "Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications". DOI: 10.1109/IEEECONF51389.2021.9415999.
2. Baranov L. A., Mihalevich I. F., Ivanova N. D., Sokolov S. S. Informacionnaya bezopasnost' sistemy avtonomnogo sudovozhdeniya v kontekste specificheskikh dlya intellektual'nykh transportnykh sistem ugroz // Sbornik trudov mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Problemy upravleniya bezopasnost'yu slozhnykh sistem", Moscow, Russia, December 13, 2023 (accepted for publication) (In Russian)
3. Andrej Androjna, Marko Perkovic. Impact of Spoofing of Navigation Systems on Maritime Situational Awareness. September 2021. Transactions on Maritime Science 10(2). DOI: 10.7225/toms.v10.n02.w08.
4. Goudosis A., Katsikas S. Secure Automatic Identification System (SecAIS): Proof-of-Concept Implementation. Journal of Marine Science and Engineering. 2022. 10. 805. J. Mar. Sci. Eng. 2022. 10. 805. DOI: 10.3390/jmse10060805.
5. Svilicic B., Brčić D., Žuškin S., et al. (2019, March). Raising Awareness on Cyber Security of ECDIS. TransNav, The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 13 (1). 231–236. DOI: 10.12716/1001.13.01.24.
6. Karahalios H. Appraisal of a Ship's Cybersecurity efficiency: the case of piracy. J Transp Secur 13. 179–201 (2020). DOI: 10.1007/s12198-020-00223-1.
7. Kavallieratos G., Katsikas S. Managing Cyber Security Risks of the Cyber-Enabled Ship // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. № 8 (768). 19 c. DOI: 10.3390/jmse8100768/.
8. Ivanova N. D., Mihalevich I. F., Jakunchikov V. V. Upravlenie riskami informacionnoj bezopasnosti intellektual'nykh transportnykh sistem vnutrennego vodnogo transporta // Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Transport Rossii: problemy i perspektivy". Sankt-Peterburg, 14–15 nojabrja 2023 g. (In Russian)
9. Kharchenko V., Illiashenko O., Fesenko H., et al. (2022). AI Cybersecurity Assurance for Autonomous Transport Systems: Scenario, Model, and IMECA-Based Analysis. In: Dziech, A., Mees, W., Niemiec, M. (eds) Multimedia Communications, Services and Security. MCSS 2022. Communications in Computer and Information Science. Vol. 1689. P. 66–79. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-20215-5\_6.



10. Kharbanda Varun. "Journal: Application of Artificial Intelligence in Cyber security." IJSPPC. 2023. Vol. 15, no. 1. P. 1–13. DOI: org/10.4018/ijspcc.318676.
11. Ryjov A. P., Mikhalevich I. F., "Hybrid intelligence framework for improvement of information security of critical infrastructures". In book: Handbook of Research on Cyber Crime and Information Privacy. Hershey, PA, US. 2021. DOI: 10.4018/978-1-7998-5728-0.ch016.
12. Mikhalevich I. F., Ryjov A. P. "Augmented Intelligence Framework for Protecting against Cyberattacks". 2018 Engineering and Telecommunication (EnT-MIPT), Moscow, Russia. 2018. P. 143–145. DOI: 10.1109/EnT-MIPT.2018.00039.
13. Karyakin V. V. Gibridnye intellektual'nye sistemy kak simbioz estestvennogo i iskusstvennogo intellektov // Rossiya: tendencii i perspektivy razvitiya. 2022. № 17 (1). S. 652–655. (In Russian)
14. Leckij Je. K., Pankratov V. I., Jakovlev V. V. Informacionnye tehnologii na zheleznodorozhnom transporte / pod red. Je. K. Leckogo, Je. S. Poddavashkina, V. V. Jakovleva. M.: UMK MPS Rossii, 2000. 678 s. (In Russian)
15. Ryjov A. P. Ob agregirovaniy informacii v nechetkikh ierarhicheskikh sistemah // Intellektual'nye sistemy. 2001. T. 6, Issue. 1–4. S. 69–79. (In Russian)
16. Ryjov A. P. Ocenka i monitoring processov v sociotekhnicheskikh sistemah i svyazannye s nimi zadachi // Intellektual'nye sistemy. 2001. T. 22, Issue 2. S. 129–140. (In Russian)
17. Kerimkhulle S., Dildebayeva Z., Tokhmetov F., et al. "Fuzzy Logic and Its Application in the Assessment of Information Security Risk of Industrial Internet of Things", Symmetry 2023, 15 (10), 1958. DOI: 10.3390/sym15101958.
18. Azam M. H., Hasan M. H., Hassan S., et al. Fuzzy Type-1 Triangular Membership Function Approximation Using Fuzzy C–Means, 2020 International Conference on Computational Intelligence (ICCI), Bandar Seri Iskandar, Malaysia, 2020, P. 115–120. DOI: 10.1109/ICCI51257.2020.9247773.
19. Karelin V. P. Metody i sredstva nechyotkogo logicheskogo vyvoda, predstavleniya i zashchity dannyh v intellektual'nyh sistemah upravleniya i podderzhki prinyatiya reshenij // Vestnik TIUE. 2016. № 2 (24). 5 s. (In Russian)
20. Cahyaningrum Y., Suryono S., Warsito B. Fuzzy-Expert System for Indicator and Quality Evaluation of Teaching and Learning Processes Online Study Programs // The 6<sup>th</sup> International Conference on Energy, Environment, Epidemiology, and Information System (ICENIS 2021). 2021. Vol. 317. 11 p. DOI: 10.1051/e3sconf/202131705021.
21. Rizvi S. S., Mitchell J., Razaque A., et al. A fuzzy inference system (FIS) to evaluate the security readiness of cloud service providers // Journal of Cloud Computing. 2020. № 9 (1). 17 p. DOI:10.1186/s13677-020-00192-9.
22. Dubois D., Prade H. Fuzzy sets and probability: misunderstandings, bridges and gaps // 2<sup>nd</sup> IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZY 1993), IEEE, Mar 1993, San Francisco, United States. P. 1059–1068. DOI: 10.1109/FUZZY.1993.327367ff.
23. Jain D., Sharma S. K., Dhiman P. Comparative Analysis of Defuzzification Techniques for Fuzzy Output // JOURNAL OF ALGEBRAIC STATISTICS. 2022. Vol. 13, no. 13. P. 874–882.

# ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КОРРЕКТИРОВКИ НОРМАТИВНЫХ ГРАФИКОВ ДВИЖЕНИЯ ПЕЗДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНЫХ РОБОТОВ

**НИКИЩЕНКОВ Сергей Алексеевич**, д-р техн. наук, профессор; e-mail: nikishchenkovs@mail.ru

**ГАРАНИН Алексей Владимирович**, аспирант; e-mail: caraninaleks@mail.ru

Кафедра «Управление эксплуатационной работой», Самарский государственный университет путей сообщения

В статье рассматриваются технологические аспекты автоматизированной корректировки нормативных графиков движения поездов с применением программных роботов. Рассмотрена информационная среда и существующая технология ведения нормативных графиков движения грузовых поездов. Приведены сведения о внедрении роботизированной автоматизации процессов в корпоративных информационных системах, эксплуатируемых в дирекциях управления движением. Рассмотрены этапы и результаты автоматизированной корректировки нормативных графиков движения поездов с использованием программных роботов. Представлена обобщенная схема процесса корректировки нормативных графиков движения поездов с использованием программного робота и специального конвертера данных. Приведен фрагмент кода робота для выгрузки нормативного расписания в аппаратно-программный комплекс «Эльбрус» (АПК «Эльбрус»). Рассмотрены вопросы применения библиотек языка программирования Python для автоматизации процессов. Выполнена оценка эффективности применения программных роботов для корректировки нормативных графиков. Рассмотрены возможности совместной роботизированной и интеллектуальной автоматизации для корректировки графиков движения поездов.

**Ключевые слова:** нормативные графики движения поездов, корпоративные информационные системы, роботизированная автоматизация процессов, технология корректировки графиков, сценарий робота, эффективность, интеллектуальная автоматизация.

DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-01-18-31

## ▼ Введение

В рамках реализации долгосрочной программы развития ОАО «РЖД» до 2025 года реализуется ряд проектов, которые способствуют повышению уровня конкурентоспособности и эффективности деятельности путем применения цифровых и инновационных технологий [1–3].

Многие задачи, которые выполняют пользователи корпоративных информационных систем, связаны со значительным объемом повторяющихся (рутинных) операций и процедур обработки однотипных данных и формирования отчетных и аналитических документов. Широко используемые корпоративные системы, такие как автоматизированная система ведения графика исполненного движения поездов (АС ГИД), АСУ станций и т. д., обладают широчайшим спектром функций и решаемых задач и, как негативное следствие, большими длительностями ожидания исполнения запро-

сов и существенными затратами при обновлении программного обеспечения [4, 5].

Достаточно новым подходом к повышению эффективности при эксплуатации информационных систем является роботизированная автоматизация процессов (robotic process automation — RPA), зарекомендовавшим себя прежде всего к использованию для многократно повторяемых задач, связанных с ручным вводом и стандартизированной обработкой данных [6–8]. Принципиальными преимуществами RPA являются прозрачный режим, т. е. отсутствие влияния на работу информационных систем, существенное повышение скорости процессов, различные регламенты запуска и работы, уменьшение ошибок в обработке данных из-за человеческого фактора и другие.

Перспективным является внедрение RPA в корпоративное информационное пространство дирекций управления движением с целью

повышения производительности и качества процессов [9–12].

С учетом значения нормативных графиков движения поездов в эксплуатационной работе железной дороги их ведение (установление, обновление, корректировка, контроль) является важным и ответственным процессом и реализуется существующей, достаточно сложной технологией с участием подразделений дирекций управления движением и информационно-вычислительных центров.

В статье рассматриваются актуальная задача автоматизации корректировки нормативных графиков движения грузовых поездов и вопросы разработки соответствующей технологии с применением программных роботов и интеллектуальной автоматизации [13].

### 1. Корректировка нормативных графиков движения поездов

Фактически нормативный график движения поездов разрабатывается и вводится в действие в установленном регламенте технологами отдела разработки графиков движения поездов дирекций управления движением.

Сезонность в организации движения поездов (разные объемы пассажирских перевозок в летний и зимний периоды на участках и полигонах) находит отражение в том, что нормативные графики корректируются до начала

летних перевозок и по их окончании (на зимний период).

Основополагающим и директивным документом для корректировки нормативных графиков движения поездов служат телеграммы, поступающие причастным подразделениям на почту, через единую автоматизированную систему документооборота (ЕАСД) или единую систему поддержки пользователей (ЕСПП).

Типовыми причинами корректировок нормативных графиков являются следующие:

- указания Центральной дирекции управления движением;
- формирование новых и назначение резервных поездов;
- новые ресурсные и инфраструктурные характеристики участков и полигонов движения;
- смена назначений договорных поездов;
- запросы пассажирских компаний по изменению сообщений или отмене поездов;
- поэтапное внедрение в эксплуатацию интеллектуальной системы управления движением;
- изменение графика движения пригородных поездов.

На рис. 1 приведен пример телеграммы.

Изначально телеграммы формируются инженерами и технологами отделов графиков

#### ТЕЛЕГРАММА

ДЦС-3, ТЧЭ – Октябрьск, Кинель,  
ВЧДЭ – Октябрьск, Кинель  
ДС Сызрань-1, Жигулевское Море,  
Тольятти  
ДЦУП, ДВ, ДИ, Т, В, НКИ, ИВЦ,  
ТЦФТО КБШ жд

В связи с изменением графика движения пригородных поездов на участке Сызрань - Жигулевское Море - Тольятти с 1 октября 2022 г. частично изменяется расписание следующих контейнерных поездов:

**п. № 1021** своим расписанием далее измененным: Жигулевское Море 12.57-13.46 Химзаводская 14.19 Тольятти приб. 14.36;

**п. № 1028/1027** Химзаводская отпр. 07.11 Жигулевское Море 07.45-07.50 Пост 104 Км. 08.01 Жигулевск 08.15-08.35 Отвага 08.53-09.13 Снежные Валы 09.25 Услава 09.41 Переволоки 09.53 Рзд.-3 10.16 Рзд.-2 10.28 Рзд.-1 10.38 Сзр1-Рзд1саи 10.48 Сызр.-1 Новосызр 10.52-11.00 Сызрань-1 Центр. 11.10-13.45 далее своим расписанием;

**п. № 1036/1035** Тольятти отпр. 19.22 Химзаводская 19.42 Жигулевское Море 20.12 Пост 104 Км. 20.23 Жигулевск 20.37-20.55 Отвага 21.13-21.31 Снежные Валы 21.43 Услава 21.58 Переволоки 22.10 Рзд.-3 22.33 Рзд.-2 22.45 Рзд.-1 22.55 Сзр1-Рзд1саи 23.05 Сызр.-1 Новосызр 23.09-23.20 Сызрань-1 Центр. 23.32-01.36 далее своим расписанием;

**Рис. 1.** Пример телеграммы

движения поездов из автоматизированного рабочего места, входящего в АС ГИД. Для поездов международного направления и контейнерных формируются с подписями, остальные составляются в свободной форме. Специалисты по разработке графика движения поездов (графисты) составляют информацию вручную в формате doc и xlsx. Телеграммы из отдела графика движения поездов направляются в отдел организации технологического сопровождения информационных систем управления перевозочным процессом ИВЦ для ввода и корректировки файла формата NTR технологами. Затем полученный файл выгружается в АПК «Эльбрус». После проверки информации графистами происходит переадресация в отдел предоставления окон и взаимодействия с инфраструктурой и осуществляется выгрузка в базу данных АПК «Эльбрус». После этого данные нормативного и вариантного графика попадают напрямую в АС ГИД и обновляются ежедневно в центральной базе данных грузовых поездов (ЦБДГР) [14].

АПК «Эльбрус» предназначен для формирования прогнозных энергосберегающих графиков движения поездов для полигонов железных дорог и решает следующие задачи:

- построение прогнозного энергосберегающего графика на период от одних суток до двух недель;
- автоматизированная передача прогнозного энергосберегающего графика в АС ГИД;
- передача прогнозного энергосберегающего графика движения грузовых поездов в ЦБДГР;
- отображение информации на сетевом уровне о передаче графика в АС ГИД и выполнении технологии выгрузки в ЦБДГР.

Источниками расписаний для АПК «Эльбрус» являются:

- файл формата NTR, содержащий нормативный график, формируемый в АС ГИД и используемый для построения прогнозных графиков;
- центральная база пассажирских поездов (ЦБДПС);
- центральная база пригородных поездов (ЦБДПР).

Автоматическая выгрузка в ЦБДГР производится в регламентированное для каждой дороги время. В ЦБДГР выгружаются нитки графиков за предстоящие сутки из последнего графика, выгруженного в основной ГИД. В случае если до старта автоматической выгрузки актуальный график на предстоящие сутки выгружен не был, необходимо соблюдать следующий порядок: дождаться окончания автоматической выгрузки в ЦБДГР, выгрузить график в основной ГИД, выгрузить график в ЦБДГР в ручном режиме.

Ведение нормативного графика движения поездов включает в себя смену номера поезда, изменение даты и времени следования поезда, изменение станций на пути следования, а также добавление и удаление поездов. Корректировку графиков сотрудники осуществляют с помощью копирования, изменения и удаления данных, переноса информации в соответствующие места файла заданной структуры.

Пример файла расписания для выгрузки в АПК «Эльбрус» приведен на рис. 2.

До настоящего времени во всех дирекциях управления движением корректировки графиков движения грузовых поездов на основании полученных директив производятся в основном вручную. Анализ процессов обработки телеграмм показал, что самым трудозатратным и длительным этапом в данном процессе явля-

```
@I ID="1522 63680 64530" N="1522"
@N K="0" S=")" D1="30.04.2021" D2="29.05.2021" T="ЖигульвМоре - Цильна"
; ЖигульвМоре Б/п 104км Жигулевск Отвага СнежныВалы Услада Переволоки РздN3
@R 63680н 63673 63670 63660 63653 63651 64658 63565
@T 8888 1406 1417 1417 1430 1458 1516 1540 1551 1551 1606 1606 1616 1616 1641 1641
@W 1/2 1/1 1/1 1/1 1/1 1/1 1/1 1/1
@K Y="2021" M="04" D="0000000000000000000000000000100"
@K Y="2021" M="05" D="11111111111111111111111111111000"
```

**Рис. 2.** Файл расписания для выгрузки в АПК «Эльбрус» (экранная форма)

ется введение технологом новых или скорректированных данных в заданный файл с использованием текста телеграмм и других электронных документов, например справочников.

В связи с частым изменением расписания движения поездов эта работа является достаточно трудоемкой. С учетом разнообразия телеграмм и данных из справочников корректировки графиков требуют высокой ответственности со стороны работников, определенных навыков и постоянной сосредоточенности. Данный этап корректировки нормативного расписания поездов потенциально характеризуется возможными ошибками работников и искажением информации.

В зависимости от объема текста телеграммы, зависящего от количества поездов и других сведений, одну страницу технолог обрабатывает в среднем 30 минут, а всего на одну корректировку может быть затрачено до 1,5 часа рабочего времени.

Анализ потока поступающих телеграмм по корректировке нормативных графиков за первые три квартала 2023 года показал, что их было около 50 в квартал, с объемом от 1 до 2 страниц каждая.

Выполненные оценки трудозатрат по данной задаче показали, что в среднем за месяц один технолог тратит на корректировки графиков от 8 часов до одних суток.

Корректировка нормативных графиков является многоаспектным и сложным процессом, поскольку фактически имеются:

- множество причин изменения графиков;
- сочетание регламентной и оперативной корректировки;
- достаточно большое число подразделений и работников, иницирующих и обрабатывающих задачу и контролирующих результаты;
- многообразие и динамика развития информационного пространства (используемых корпоративных информационных систем и сервисов), в котором осуществляются ввод, обработка, хранение и передача данных разных форматов;
- высокие требования по оперативности, точности и качеству корректировки графиков и ответственности причастных работников.

При реализации корректировки с существенной долей ручного труда имеются очевидные недостатки и риски:

- низкая производительность и оперативность получения результата;
- влияние человеческого фактора и вероятность ошибок в обработке информации при практическом отсутствии автоматизированных средств по проверке ее релевантности.

Для исключения перечисленных рисков, вывода технологического процесса по корректировке нормативного расписания поездов на новый уровень производительности и качества для высвобождения времени технологов на решение других производственных задач было принято решение об автоматизации процесса с использованием программных роботов [11, 13].

## 2. Программные роботы в корпоративных информационных системах ОАО «РЖД»

РРА — это технология, осуществляющая замену выполнения этапов процесса обработки информации и действий персонала программным роботом с помощью специальной программной платформы и достаточно простых проблемно ориентированных модулей, которые могут прозрачно взаимодействовать с различными информационными системами и интерфейсами пользователей компьютеров [9, 10, 15, 16]. В роботизированном процессе повышаются скорость выполнения и точность операций, их надежность и качество. Освобождая сотрудника от повторяющихся однотипных операций и процедур, робот дает ему возможность использовать служебное время для более приоритетных функций и задач (контроль, анализ, принятие решений и т. д.). Применение этой технологии позволит сотрудникам сосредоточиться на приоритетных задачах и анализе получаемых данных.

Реализуемость роботизированной автоматизации имеет место в том случае, если обрабатываемые данные и объект автоматизации достаточно структурированы и есть потенциальная возможность алгоритмизации и построения общего сценария процесса обработки информации. Эффективность роботизации (снижение организационных и ресурсных затрат,

в первую очередь времени) особенно проявляется для сложных многосвязных процессов с большим количеством ответственных работников, источников информации и систем, вовлеченных в процесс.

В Департаменте корпоративной информатизации, Главном вычислительном центре (ГВЦ), дорожных информационно-вычислительных центрах (ИВЦ), дирекциях и их подразделениях работают более тысячи информационных систем и десятки тысяч пользователей. Поскольку информационные процессы в сфере организации и управления перевозками имеют повторяющийся типовой характер, масштабы применения RPA могут быть весьма значительными. То же самое можно сказать и о вспомогательных процессах, связанных с поддержкой пользователей и сервисным обслуживанием, а также о запросах руководства на формирование нестандартных аналитических справок и отчетов.

Опытное использование RPA в информационных системах на железных дорогах России началось в 2016 году, когда отдельные ИВЦ занялись проработкой этой новой технологии. В 2018 году была представлена отечественная платформа ROBIN RPA с официальной регистрацией в Едином реестре российских программ для ЭВМ [9]. В 2020 году ROBIN RPA улучшила свои позиции в части возможности применения практически на всех операционных системах, в том числе на Linux и на российских системах. В 2022 году была наконец добавлена поддержка языка программирования Python и режим Low-code для вставки раз-

работчиками собственного программного кода нижнего уровня внутрь библиотечного робота. Большим успехом в 2023 году стало включение в платформу модуля OCR, который позволил автоматизировать процессы распознавания, сопоставления и получения данных из документов разных форматов.

На рис. 3 показана архитектура платформы RPA.

С учетом конкретики автоматизируемой задачи роботы могут функционировать в разных режимах: реализовать заранее созданный сценарий, ожидать действий пользователя на виртуальном рабочем месте, работать автономно или вместе с пользователем.

В 2021 году были впервые подведены итоги программной роботизации информационных процессов в холдинге «РЖД»: внедрено 1150 роботов с существенным сокращением времени обработки данных, исключением ошибок и повышением надежности и качества [11, 12].

Например, с целью улучшения характеристик были роботизированы с использованием RPA процессы администрирования единой службы поддержки пользователей (ЕСПП), мониторинг утвержденных заявок в автоматизированной системе обработки заявок и другие корпоративные сервисные процессы. По статистике, с 15 до 4 минут уменьшилось время на формирование и редактирование точек доступа новых пользователей и более чем в 10 раз снизилось время обработки заявок с подключением администратора ЕСПП, при этом установленный программный робот обработал почти 25 000 обращений внутренних пользователей.

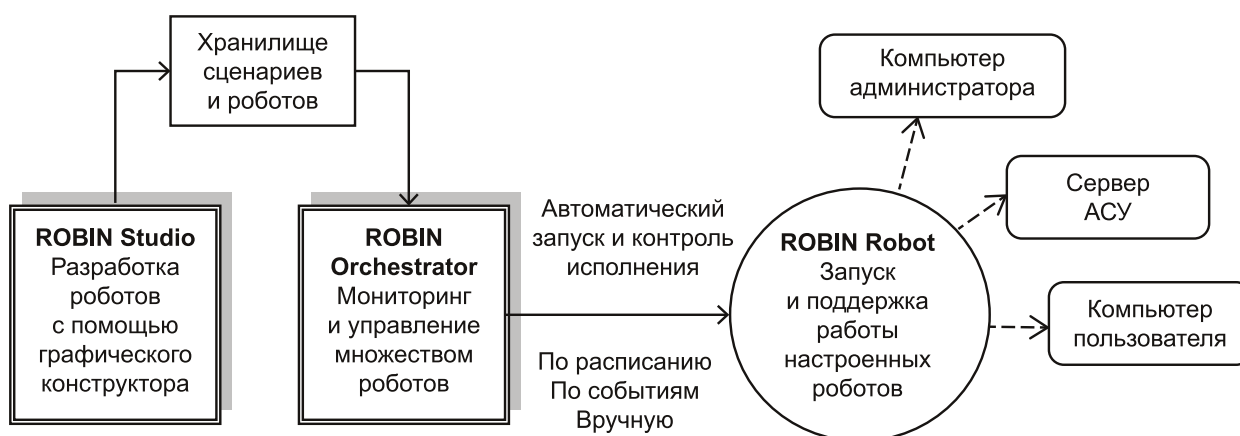


Рис. 3. Архитектура платформы RPA

Применение платформы ROBIN RPA в корпоративном информационном пространстве ОАО «РЖД» выгодно отличается от традиционных подходов к повышению эффективности процессов, заключающихся в доработке программного обеспечения эксплуатируемых информационных систем и выполнении трудоемких отладочных и приемо-сдаточных мероприятий.

На сегодняшний момент ГВЦ и дорожные ИВЦ ввели в эксплуатацию более 1600 программных роботов. Холдинг имеет 10 центров экспертизы, которые контролируют разработку, внедрение и соответствие программных роботов унифицированным требованиям по архитектуре и качеству.

Широкое использование разнообразных программных роботов позволяет существенно повысить оперативность выполнения запросов руководства центрального аппарата холдинга и руководителей дорожного уровня к отраслевым информационным системам и производительность труда сотрудников.

Весьма востребованными являются задачи повышения эффективности поездной и станционной эксплуатационной работы за счет роботизированной автоматизации однообразных, имеющих существенную долю ручного труда процессов в деятельности инженеров и технологов в дирекциях управления движением.

Примерами задач, в которых программные роботы, разработанные в последние годы на Самарском ИВЦ, показали высокую эффективность, являются следующие:

- тестирование и обнаружение ошибок в новой версии автоматизированной системы подготовки и оформления перевозочных документов ЭТРАН;
- контроль правильности передислокации вагонов на отладочном сервере в автоматизированной системе оперативного управления перевозочным процессом АСОУП;
- выполнение сервисных функций для баз данных корпоративных информационных систем после установки обновлений программного обеспечения.

Одной из значимых задач, решенных на Самарском ИВЦ совместно с Куйбышевской дирекцией управления движением с использованием RPA, явилось повышение оператив-

ности технологического документооборота по диспетчерскому контролю межпоездных интервалов по условиям электроснабжения [11, 12]. Отправной точкой явилось то, что доработка нормативно-справочной информации и программного обеспечения АС ГИД для выявления и аналитики нарушений заданных допустимых интервалов следования поездов по условиям электроснабжения было затруднено по ряду организационно-технических причин.

Автоматизация процессов расширенного контроля нарушений межпоездных интервалов тяжеловесных поездов для заданного полигона железной дороги, обеспечивающая существенное повышение производительности, была реализована разработкой программного робота с оригинальным сценарием [12, 17]. При этом были достигнуты высокие результаты, а именно: уменьшение времени на этапе сбора и обработки данных по диспетчерским участкам полигона более чем в 70 раз, а времени подготовки итогового отчета — почти в 14 раз. С помощью RPA удалось не только существенно укоротить процессы получения актуальной информации, но и сократить трудозатраты работников, практически свести к нулю возможные ошибки и тем самым повысить оперативность и обоснованность принятия решений по минимизации рисков перегрузки системы энергоснабжения полигона.

Достигнутые положительные результаты, опыт практических разработок и большие перспективы использования программных роботов, а также требования реализации Стратегии цифровой трансформации и запросы Центральной дирекции управления движением обусловили включение в планы текущего года Куйбышевской дирекции управления движением и Самарского ИВЦ работы по внедрению и паспортизации роботов, автоматизирующих процессы ускоренного получения следующих аналитических сведений и справок:

- справки по надежности доставки грузовой отправки (по дороге и на сети);
- справки по надежности проследования (по дороге и на сети);
- справки о выполнении скорости доставки грузеных отправок (по категориям отправок и по видам сообщений, по дороге и на сети);

- рейтинг по исполненной грузовой скорости доставки на сети;
- справка о подводе вагонов на станциях;
- справка о невыгруженных вагонах более 3 суток;
- справка по наличию вагонов с щебнем, простаивающих в ожидании выгрузки.

Полученный опыт разработки и внедрения программных роботов применительно к АС ГИД позволил решить ряд задач, востребованных в дирекции управления движением.

#### 4. Автоматизация корректировки нормативных графиков движения грузовых поездов с применением RPA

Для повышения общей эффективности процессов корректировки нормативных графиков движения грузовых поездов и устранения перечисленных выше недостатков (большая длительность, сложное взаимодействие, вероятность ошибок) была проработана автоматизация процессов с использованием программных роботов, охватывающая уровни и источники данных, используемые информационные системы и причастных работников [11, 13].

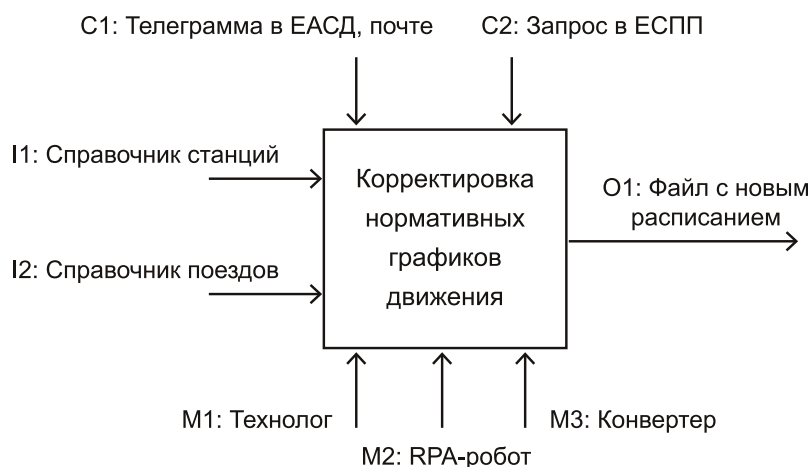
Методика разработки и внедрения программного робота для автоматизации корректировки нормативных графиков движения поездов включает этапы:

- комплексный анализ информационных объектов, причастных работников, регламентов их действий и логики взаимодействия;

- создание общей схемы получения и обработки информации;
  - проработка способов получения данных из корпоративного информационного пространства;
  - разработка сценария работы робота и графоаналитической модели процесса;
  - выбор базовых инструментальных средств;
  - разработка дополнительных программных модулей;
  - тестовая отладка технологии и отработка ошибок;
  - ввод в эксплуатацию и сопровождение.
- Обобщенная информационная схема задачи представлена на рис. 4.

Программный робот работает по следующей цепочке процедур (сценарию по терминологии RPA):

- получение телеграммы о корректировке графиков в файле из ЕАСД, ЕСПП или почты;
- передача файла телеграммы в специальный программный модуль (конвертер данных) для обработки текста и распознавания содержания;
- внесение данных в файл формата NTP;
- загрузка файла в АПК «Эльбрус» и получение подтверждения о соответствии корректировки и точности введенных данных;
- перенос итогового файла в папку с общим доступом для дальнейшей передачи в АС ГИД.



**Рис. 4.** Информационная схема задачи корректировки нормативных графиков движения поездов



При проработке технологии автоматизированной корректировки нормативных графиков движения грузовых поездов особое внимание уделялось существующим регламентам и логике взаимодействия участников процессов.

При отладке сценария была учтена необходимость отсутствия временного расхождения в нормативных расписаниях поездов между АС ГИД и информационным хранилищем анализа выполнения графика движения (ИХ АВГД), в котором расписание соответствует состоянию ЦБДГР.

Программный робот, разработанный средствами Low-code development platform (ROBIN Studio версии 1.3.8), состоит из двух модулей:

- обработка запросов в ЕСПП по корректировке графика;
- выгрузка нормативного графика в АПК «Эльбрус».

Первый модуль робота ожидает запрос с определенной категорией в ЕСПП в состоянии «Направлен в группу». При поступлении запроса робот берет его в работу и сохраняет вложенный файл в определенную папку. Запрос остается в работе до момента выполнения всех предусмотренных операций. Модуль выполняет последовательность операций: поиск

запроса по корректировке, ожидание запроса, открытие запроса, поиск вложения, ожидание перехода во вложение.

Второй модуль обеспечивает вход в АПК «Эльбрус» с последующей авторизацией. Далее выполняется ряд операций по выгрузке итогового файла формата NTP нормативного расписания в АПК «Эльбрус». После окончания выгрузки файла робот завершает работу в АПК «Эльбрус» и дополнительно сохраняет файл на сервере. Такое сохранение предусмотрено для анализа и выверки информации в случае отсутствия данных о поезде в нормативном графике движения поездов. Реализуемая последовательность операций следующая: открытие АПК «Эльбрус», ожидание загрузки, авторизация, переход на строку пароля, ввод пароля, вход в АПК «Эльбрус», выбор загрузки данных, ожидание, загрузка данных, загрузка графика из файла, выбор формата файла NTP, ожидание открытия, выбор папки, переход к файлу, подтверждение перехода, загрузка из файла, ожидание, выбор файла, загрузка файла, выбор даты, ожидание, использование по умолчанию, выгрузка графика в АПК «Эльбрус».

Ниже представлен фрагмент программного модуля по выгрузке нормативного графика в АПК «Эльбрус».

```
public string __ReturnVariables {get; set;} = «»;
public void Main(string _args)
{
    this.ActionGuid(«77fab170–6933–4803–b095–15ec58def712»,«»);
    this.ActionGuid(«92049568–4bbf–4e67–9282–636829def06c»,@»Выгрузка нормативного расписания»);
    this.ActionGuid(«760bd5b2–6184–4a16–8355–7f9eaf2029e8»,@»Вход»);
    Standard.Sleep(1000);
    KeyboardInput.NumberOfKeystrokes(new List<int>() {13},(int)(1),10);
    this.ActionGuid(«c991ffa1–3263–4c0e–80dc–a34c084e8708»,@»Выбор загрузки данных»);
    Standard.Sleep(1500);
    Загрузка_данных = VisualOperations.FromFile($@»C:\Users\GaraninA\Desktop\Загрузка данных.PNG»);
    this.ActionGuid(«db603e89–d998–413a–ad0b–9ddcf51ab255»,@»Ожидание»);
    Standard.Sleep(1000);
    Ожидание_открытия = VisualActions.WaitFor(Выбор_файла,0.85m,true,-1m);
    this.ActionGuid(«b6352748–c7ea–4487–8ee5–a6e6faffcb52»,@»Загрузка файла»);
    Standard.Sleep(1000);
    KeyboardInput.NumberOfKeystrokes(new List<int>() {13},(int)(1),10);
    this.ActionGuid(«7cfa78b5–abe3–4044–9f18–412e8e936103»,@»Выбор даты»);
    Standard.Sleep(1500);
    Выбор_даты = VisualOperations.FromFile($@»C:\Users\GaraninA\Desktop\Использовать по умолчанию.PNG»);
    this.ActionGuid(«1f38c1b5–3906–49e1–81af–e18f0b1ed736»,@»Ожидание»);
    Standard.Sleep(1500);
    Использовать_по_умолчанию = VisualActions.WaitFor(Выбор_даты,0.85m,true,-1m);
    this.ActionGuid(«acdd7966–f2f4–41d3–9a78–0e9a222b6cb9»,@»Использовать по умолчанию»);
    Standard.Sleep(2000);
    MouseClick.ClickLeftMouseButton((int)(0),(int)(0),Использовать по умолчанию);
}
```

На рис. 5 представлена временная диаграмма, которая описывает взаимодействие между пользователями, автоматизированными системами и информационными объектами.

Программный конвертер, осуществляющий получение достоверных данных из телеграммы с использованием отраслевых справочников и преобразования их в файл, выгружаемый в АПК «Эльбрус», был разработан в ходе практической реализации задачи, когда выяснилось, что с применением инструментария ROBIN RPA невозможно автоматизировать весь процесс введения нормативного графика движения поездов. Конвертер был реализован средствами языка программирования Python, поскольку он имеет встроенные функции (библиотеки модулей) для распознавания символов оптическими методами и семантического интеллектуального анализа текста документов [18, 19].

Существенная технологическая проблема автоматизации процесса корректировки нормативных графиков состоит в точном определении измененных дат и времени следования поездов по участку движения, поскольку эти данные поступают в файлах различных форматов, а текст телеграммы допускает достаточно свободную форму (структуру), в отличие, например, от сообщений АСОУП.

Для идентификации данных из файлов форматов pdf, docx и xlsx, а также на изображениях форматов jpg и png целесообразно использовать способы адаптивно-оптического распознавания текста, с разбивкой его на кластеры и сопоставлением с отраслевой нормативно-справочной информацией. Последующая обработка данных из телеграммы может осуществляться с помощью специальных программных модулей или стандартных библиотек.

В состав ROBIN RPA входит библиотека Tesseract OCR, предназначенная для распознавания символов на изображениях, однако ее недостатком является возможность работы только со структурированными данными, что ограничивает ее применение для решения поставленной задачи.

Инструментальная среда PyCharm для разработки программ на языке Python обладает широкими функциональными возможностями, в том числе обработкой неструктурированных данных из телеграмм [20].

В таблице представлены библиотеки Python, которые целесообразно использовать для автоматизации обработки телеграмм.

### Используемые библиотеки Python

№	Имя	Функциональность
1	PyTesseract	Оптическое распознавание символов, извлечение текста из изображений и документов Word
2	OpenCV	Реализация методов машинного зрения с открытым кодом для обработки изображений и видео, обнаружения объектов и их сопоставления
3	Pdf2docx	Преобразование документа из pdf в docx
4	PyPDF2	Извлечение текста и изображений, объединение и разделение PDF-файлов
5	Openpyxl	Чтение и запись файлов электронных таблиц

Создание программы для преобразования файлов на языке программирования Python с элементами интеллектуальной автоматизации распознавания документов с помощью компьютерного зрения и технологии оптического распознавания символов позволит повысить производительность, существенно сократить время обработки для своевременного обновления данных в системах.

Разработка и использование RPA-робота и программы-конвертера на языке Python для автоматизации корректировки нормативных графиков движения поездов позволяет существенно сократить трудозатраты, повысить производительность и качество работы технологов. При этом ожидаемые показатели повышения эффективности следующие: уменьшение времени корректировки графика — не менее чем в 10 раз, снижение количества ошибок — в 3 раза.

В связи с высокой занятостью технологов обработкой обращений первой линии поддержки АС ГИД время принятия в работу объектов ЕСПП не всегда совпадает с поступлением в группу сотрудников ИВЦ, где ведется корректировка нормативных графиков движения поездов во взаимодействии с региональной службой развития пассажирских сообщений и дирекцией управления движением.

Анализ трудозатрат по операциям у технологов показывает, что на принятие одного об-

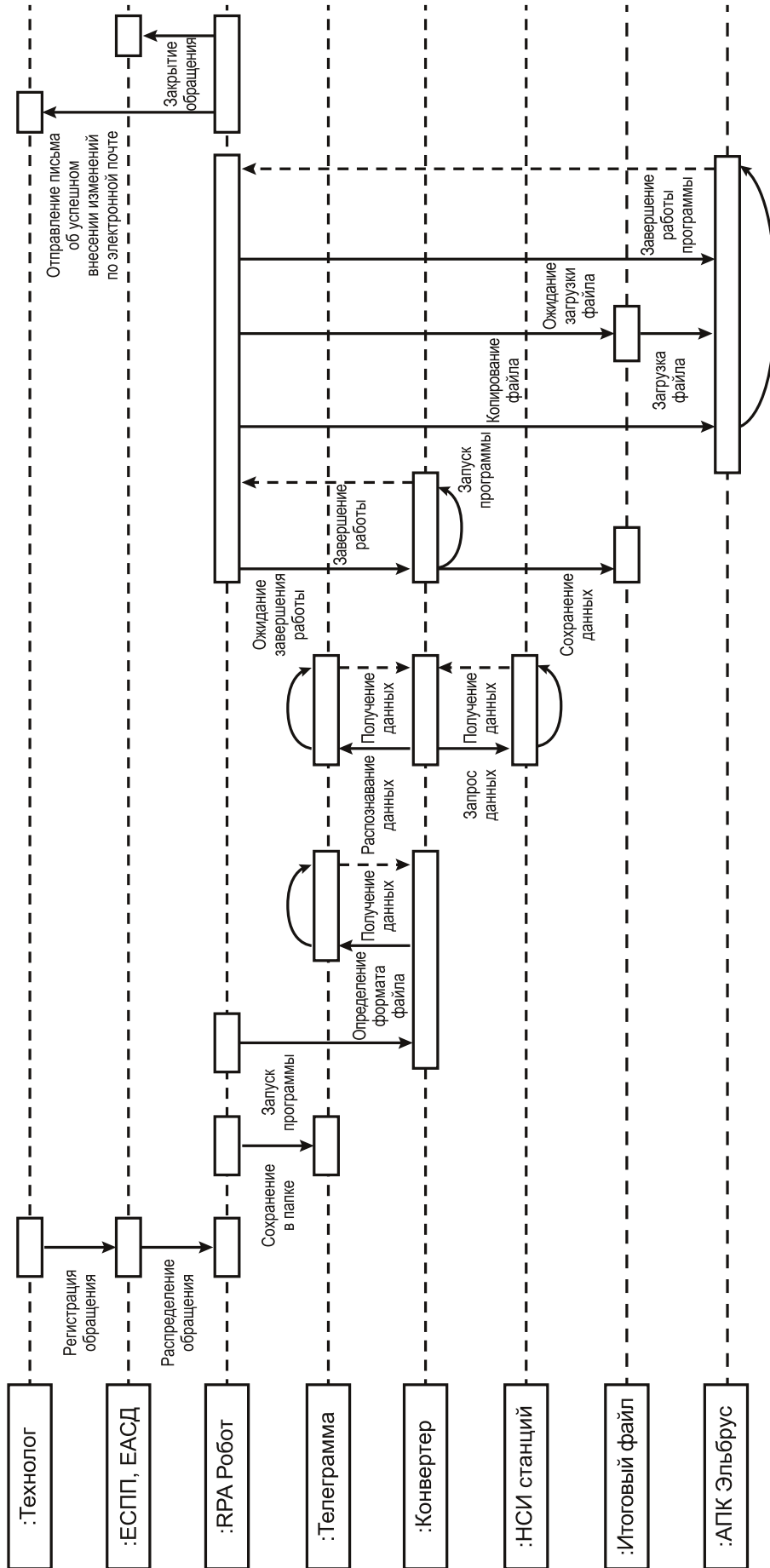


Рис. 5. Диаграмма процесса корректировки нормативных графиков движения поездов

ращения в работу, анализ информации в тексте обращения, дозвон инициатору обращения, сохранение файла телеграммы уходит в среднем от 4 до 10 минут.

При использовании программного робота выполняется сокращение времени принятия в работу запросов ЕСПП по корректировке нормативного графика с последующей выгрузкой файла формата NTP в АПК «Эльбрус» для актуализации данных. Время программного робота по ожиданию запроса, регистрации в ЕСПП (принятие в работу) и сохранение файла телеграммы занимает в среднем от 30 до 40 секунд.

Подготовка и выгрузка отредактированного нормативного расписания в АПК «Эльбрус» включает в себя ряд операций (запуск АПК «Эльбрус», авторизация в программе, выбор подготовленного файла формата NTP, выгрузка расписания в АПК «Эльбрус», сохранение резервной копии файла в папке за текущую дату на сервере) и занимает у технолога от 2 до 3 минут рабочего времени.

Время программного робота по выгрузке нормативного расписания в АПК «Эльбрус» занимает от 45 секунд до 1 минуты.

Сокращение времени при использовании программного робота на принятие запроса в работу и с последующей выгрузкой файла формата NTP нормативного расписания в АПК «Эльбрус» составляет от 5 до 10 минут на одно обращение.

Таким образом, программный робот с конвертером выполняет задачу автоматизированной корректировки нормативных графиков движения грузовых поездов, взаимодействуя с ЕСПП, ЕАСД, АС ГИД, АПК «Эльбрус», минимизируя время и повышая качество работы.

Перспективой для развития технологии корректировки нормативного расписания движения поездов является применение интеллектуальной автоматизации (intelligent process automation — IPA). Ее внедрение в процессы эксплуатации информационных систем в дирекциях управления движением соответствует отраслевым планам научно-технологического развития и Национальной стратегии развития искусственного интеллекта на период до 2030 года [1, 2].

Современным трендом является совместное применение RPA и IPA с целью дальнейшего повышения качественных и количественных параметров технологических и бизнес-процессов [21, 22].

IPA позволяет работать с неструктурированными данными, при этом реализуется:

- распознавание документов и видеоаналитика с помощью компьютерного зрения и оптического анализа текста;
- использование голосовой аналитики с инструментами обработки естественного языка;
- применение чат-ботов с самообучением и генерацией естественного языка как средства общения с пользователями.

Известные высокоэффективные программы распознавания текста, как правило, являются платными и предполагают удаленный доступ через интернет, что не позволяет использовать их на рабочих местах сотрудников ОАО «РЖД».

В версии 2.0 платформы ROBIN RPA интеллектуальная автоматизация реализована в модуле Robin AI, который может выделять и сопоставлять неструктурированные данные при обработке текста, а также выполнять функции помощника-консультанта. Разработчики программного обеспечения ROBIN RPA совместно с российским предприятием Konica Minolta Business Solutions Russia создали модуль распознавания и потоковой обработки документов Robin OCR [23].

Представителями IPA являются чат-боты, которые позволяют классифицировать получаемое сообщение, понимать конкретику вопроса, используя наработанную ранее базу знаний, и выдавать ответ. Примером служит уже функционирующая на железных дорогах система виртуального консультанта (отраслевая аббревиатура — ВиКо), представляющая собой чат-бот, автоматически формирующий запросы в группы ЕСПП по заданным вопросам пользователей в ответ на представленные скриншоты экрана и контексты событий. ВиКо взаимодействует с корпоративными информационными системами, службой каталогов и почтовыми сервисами и ускоряет процесс принятия решения, позволяя в кратчайшие сроки провести анализ информации по заданной ситуации.

В перспективе при регистрации обращений на корректировку нормативных графиков движения поездов через ВиКо можно предусмотреть автоматизированный запуск программного робота, отвечающего за реализацию этой задачи.

### Заключение

Приведенный реальный пример технологии показывает, что автоматизация рутинных, многоаспектных и сложных процессов, связанных с эксплуатацией диспетчерами и технологами корпоративных информационных систем, в результате разработки и внедрения программных роботов повышает эффективность деятельности указанных работников, а именно существенно сокращает время отработки задач, повышает производительность и качество процессов. Основные технологические решения, принятые для автоматизированной корректировки нормативных графиков движения грузовых поездов, являются обоснованными и состоятельными.

С учетом 100%-ного охвата полигонов железных дорог АПК «Эльбрус» предложенный подход, разработанные программы и полученный опыт в целом найдут применение в дирекциях управления движением и дорожных ИВЦ.

Применение технологии RPA, инструментальных средств Python и элементов искусственного интеллекта, а также методики комплексного анализа задачи имеет большие перспективы для использования в проблемных областях, имеющих большую долю рутинных процессов обработки данных или связанных с обработкой запросов руководства на проблемно ориентированные аналитические отчеты [24].

Вместе с тем бурное развитие цифровых технологий и появление новых продуктов влечет за собой необходимость выбора оптимальных вариантов сочетаний инструментальных средств автоматизации задач. Так, например, постоянно совершенствуется набор функций платформы RPA ROBIN, появляются новые программы с оптическим распознаванием текста и т. д. Это необходимо учитывать для адаптации описанной технологии к изменяющимся условиям.

К существующим актуальным вопросам и проблемам использования, тиражирования, развития и повышения эффективности представленной технологии корректировки нормативных графиков движения поездов относятся следующие:

- в связи с массовым переходом на отечественные программные платформы разработчиками и технологами производится анализ и пересмотр функций существующих информационных систем, в том числе по взаимодействию со смежными системами;
- развитие отраслевых информационных систем, реализация Стратегии цифровой трансформации, ввод в эксплуатацию цифровых сервисов с искусственным интеллектом (например, указанный выше ВиКо) создают новые условия работы и возможности.

Особо следует отметить грядущие изменения в АС ГИД, которые могут повлиять на технологию корректировки графиков. В настоящее время реализуется проект внедрения системы нового поколения (АС ГИД НП) взамен существующей [3, 25]. АС ГИД НП, сохраняя существующий интерфейс, позволит формировать единый сетевой график со сквозным планированием движения поездов на основании вариантного графика и плана окон, с автоматической фиксацией причин произошедших сбоев в эксплуатационной работе, в том числе с использованием речевых технологий, а также получать необходимые аналитические данные по допущенным потерям в целях принятия мер по их минимизации. Как отмечено разработчиками, эффективность АС ГИД НП достигается за счет обеспечения полноты, достоверности, качества и скорости оформления графика исполненного движения, увеличения скорости принятия решений во внештатных ситуациях, повышения требований к качеству планирования.

Изменения в АС ГИД, переход от ЕСПП к ВиКо повлекут за собой необходимость адаптации разработанной технологии ведения нормативных графиков движения, что уже предусмотрено в текущих планах работ. ▲

**Библиографический список**

1. Долгосрочная программа развития ОАО «Российские железные дороги» до 2025 года. Распоряжение Правительства от 19 марта 2019 года № 466-р.
2. О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации. Указ Президента Российской Федерации от 10.10.2019 года № 490.
3. Глазков М. О. Обеспечивать устойчивость и эффективность перевозочного процесса // Железнодорожный транспорт. 2023. № 3. С. 24–28. EDN FGCTXB.
4. ГИД «Урал-ВНИИЖТ» [Электронный ресурс]. URL: <http://gidural.ru/doku.php?id=start> (дата обращения: 17.01.2024).
5. Программные комплексы РЖД: АСУТ, ГИД «Урал-ВНИИЖТ», АСУ «Экспресс» [Электронный ресурс]. URL: <https://dvizhenie24.ru/railway/programmnye-kompleksy-asut-gid-ural-vniizht-asu-ekspress/> (дата обращения: 17.01.2024).
6. Hofmann P., Samp C., Urbach N. Robotic process automation // *Electronic Markets*. 2020. Vol. 30. P. 99–106. DOI: 10.1007/s12525-019-00365-8.
7. Khan S., Tailor R. K., Uygun H., Gujrati R. Application of robotic process automation (RPA) for supply chain management, smart transportation and logistics // *International Journal of Health Sciences*. 2022. Vol. 6 (S3). P. 11051–11063. DOI: 10.53730/ijhs.v6ns3.8554.
8. Karthikeya S., Meenakshi N. Pending Receipts RPA Bot. *Proceedings of the 2nd International Conference on Cognitive and Intelligent Computing*. 2023. P. 577–585. DOI: 10.1007/978-981-99-2742-5\_59.
9. ROBIN RPA – платформа для роботизации бизнеса [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rpa-robin.ru/programmnye-roboty> (дата обращения: 08.02.2024).
10. Использование платформы Robin RPA в процессе цифровой трансформации транспортных компаний / Ермаков С. Г., Баталов Д. И., Мельников И. С. // *Интеллектуальные технологии на транспорте*. 2023. № 1 (33). С. 5–14. DOI: 10.24412/2413-2527-2023-133-5-14. EDN YVWRCE.
11. Никищенков С. А., Гаранин А. В. Использование программных роботов для автоматизации бизнес-процессов на железной дороге // *Транспортное дело России*. 2023. № 4. С. 163–165. DOI: 10.52375/20728689\_2023\_4\_163. EDN MULSDT.
12. Гаранин А. В., Никищенков С. А. Контроль нарушений межпоездных интервалов тяжеловесных поездов с применением технологии программных роботов // *Вестник транспорта Поволжья*. 2023. № 1. С. 56–62. EDN NWXEZT.
13. Гаранин А. В., Никищенков С. А. Автоматизация процессов корректировки нормативного расписания движения поездов в ГИД «Урал-ВНИИЖТ» с применением программных роботов // *Мехатроника, автоматизация и управление на транспорте*. 2023. С. 24–27. EDN TBJPDJ.
14. «Эльбрус». Инновации: уверенное движение [Электронный ресурс]. URL: <https://elbrus-r.ru/razrabotki> (дата обращения: 01.02.2024).
15. Treacy S., Adyanthaya A., Kearny Ch., Anand J., O’Sullivan K., Xu Y. From Hype to Reality: Navigating the Challenges of RPA Implementation. *European Conference on Innovation and Entrepreneurship*. 2023. Vol. 18 (2). P. 875–882. DOI: 10.34190/ecie.18.2.1721.
16. Sajquin M., Dueñas G. The Inclusion of RPA in the Digital Transformation. *International journal of mathematics and computer research*. 2023. Vol. 11 (02). P. 3248–3249. DOI: 10.47191/ijmcr/v11i2.04.
17. Никищенков С. А., Гаранин А. В. Программа для контроля нарушений межпоездных интервалов тяжеловесных поездов // *Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2023669997 от 25.09.2023*.
18. Solem J. E. *Programming Computer Vision with Python: Techniques and Libraries for Imaging and Retrieving Information*. Hoboken: Wiley. 2012. 256 p.
19. Heineman G., Pollice G., Selkow S. *Algorithms in a Nutshell. A practical guide*. Sebastopol: O’Reilly. 2009. 389 p.
20. Sweigart A. *Automate the Boring Stuff with Python*. San Francisco: No Starch Press. 2019. 500 p.
21. Shidaganti G., Karthik K. N., Anvith, Kantikar N. A. Integration of RPA and AI in Industry 4.0. *Confluence of Artificial Intelligence and Robotic Process Automation*. 2023. P. 267–288. DOI: 10.1007/978-981-19-8296-5\_11.
22. Siderska J., Suesse Th., Aunimo L. A. Towards Intelligent Automation (IA): Literature Review on the Evolution of Robotic Process Automation (RPA), its Challenges, and Future Trends. *Engineering Management in Production and Services*. 2023. Vol. 15(4). P. 90–103. DOI: 10.2478/emj-2023-0030.
23. Konica Minolta и ROBIN выпустили новое решение для распознавания документов Robin OCR [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rpa-robin.ru/osrkonica> (дата обращения 01.02.2024).
24. Дегтярева В. В., Панченко К. П. Оценка эффективности RPA-технологий для обоснования их внедрения в транспортно-логистическую отрасль // *Первый экономический журнал*. 2023. № 1 (331). С. 50–57. DOI:10.58551/20728115\_2023\_1\_50. EDN IROWWR.
25. Автоматизированная система ведения графика исполненного движения нового поколения (АС ГИД НП). Руководство пользователя / А. В. Калинин, М. В. Федяшин, А. Я. Нуриев. М. : АО «НИИАС». 2023. 199 с.

*TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH. 2024. Vol. 10. no. 1. P. 18–31*  
 DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-01-18-31

### Automated adjustment technology standard train schedules using software robots

#### Information about authors

**Nikishchenkov S. A.**, Doctor of Technical Sciences, Professor.

E-mail: nikishchenkovs@mail.ru

**Garanin A. V.**, Postgraduate Student. E-mail: caraninaleks@mail.ru

Department of Operational Work Management, Samara State Transport University

**Abstract:** The article discusses the technological aspects of automated adjustment of standard train schedules using software robots. The information environment and existing technology for maintaining standard freight train schedules are considered. Information is provided on the implementation of robotic process automation in corporate information systems operated in traffic control directorates. The stages and results of automating the adjustment of standard train schedules using software robots are considered. A generalized diagram of the process of adjusting standard train schedules using a software robot and a special data converter is presented. A fragment of the robot code for uploading the standard schedule into the Elbrus hardware and software complex is given. The issues of using Python programming language libraries to automate processes are considered. An assessment was made of the effectiveness of using software robots to adjust standard schedules. The possibilities of joint robotic and intelligent automation for adjusting train schedules are considered.

**Keywords:** standard train schedules, corporate information systems, robotic process automation, schedule adjustment technology, robot script, efficiency, intelligent automation.

#### References

- Long-term development program of JSC Russian Railways until 2025. Government Order dated March 19, 2019. No. 466-r. (In Russian)
- On the development of artificial intelligence in the Russian Federation. Decree of the President of the Russian Federation dated October 10, 2019. No. 490. (In Russian)
- Glazkov M. O. Ensure sustainability and efficiency of the transportation process // *Railway transport*. 2023. No. 3. P. 24–28. EDN FGCTXB. (In Russian)
- Guide “Ural-VNIIZHT” [Access mode: <http://gidural.ru/doku.php?id=start>]. Access date 01/17/2024. (In Russian)
- Russian Railways software systems: ASUT, GID “Ural-VNIIZHT”, ASU “Express” [Access mode: <https://dvizhenie24.ru/railway/programmnye-kompleksy-asut-gid-ural-vniizht-asu-ekspress/>]. Access date 01/17/2024. (In Russian)
- Hofmann P., Samp C., Urbach N. Robotic process automation // *Electronic Markets*. 2020. Vol. 30. P. 99–106. DOI: 10.1007/s12525-019-00365-8.
- Khan S., Tailor R. K., Uygun H., Gujrati R. Application of robotic process automation (RPA) for supply chain management, smart transportation and logistics. *International Journal of Health Sciences*. 2022. Vol. 6 (S3). P. 11051–11063. DOI: 10.53730/ijhs.v6ns3.8554.
- Karthikeya S., Meenakshi N. Pending Receipts RPA Bot. Proceedings of the 2nd International Conference on Cognitive and Intelligent Computing. 2023. P. 577–585. DOI: 10.1007/978-981-99-2742-5\_59. (In Russian)
- ROBIN RPA — platform for business robotization [Access mode: <https://www.rpa-robin.ru/programmnye-roboty/>]. Date of access: 02/08/2024. (In Russian)
- Using the Robin RPA platform in the process of digital transformation of transport companies / S. G. Ermakov, D. I. Batalov, I. S. Melnikov // *Intelligent technologies in transport*. 2023. No. 1 (33). P. 5–14. DOI: 10.24412/2413-2527-2023-133-5-14. EDN YVWRCE. (In Russian)
- Nikishchenkov S. A., Garanin A. V. Using software robots to automate business processes on the railway // *Transport business of Russia*. 2023. No. 4. P. 163–165. DOI: 10.52375/20728689\_2023\_4\_163. EDN MULSDT. (In Russian)
- Garanin A. V., Nikishchenkov S. A. Monitoring violations of inter-train intervals of heavy trains using software robot technology // *Bulletin of transport of the Volga region*. 2023. No. 1. P. 56–62. EDN NWXEZT. (In Russian)
- Garanin A. V., Nikishchenkov S. A. Automation of the processes of adjusting the standard train schedule in the Ural-VNIIZHT State Inspectorate with the use of software robots // *Mechatronics, automation and control in transport*. 2023. P. 24–27. EDN TBJPDJ. (In Russian)
- ELBRUS. Innovation: confident movement [Access mode: <https://elbrus-r.ru/razrabotki/>]. Date of access: 02/01/2024. (In Russian)
- Treacy S., Adyanthaya A., Kearny Ch., Anand J., O’Sullivan K., Xu Y. From Hype to Reality: Navigating the Challenges of RPA Implementation. *European Conference on Innovation and Entrepreneurship*. 2023. Vol. 18 (2). P. 875–882. DOI: 10.34190/ecie.18.2.1721.
- Sajquin M., Dueñas G. The Inclusion of RPA in the Digital Transformation. *International journal of mathematics and computer research*. 2023. Vol. 11 (02). P. 3248–3249. DOI: 10.47191/ijmcr/v11i2.04.
- Nikishchenkov S. A., Garanin A. V. Program for monitoring violations of inter-train intervals of heavy-duty trains // Certificate of official registration of the computer program No. 2023669997 dated September 25, 2023. (In Russian)
- Solem J. E. *Programming Computer Vision with Python: Techniques and Libraries for Imaging and Retrieving Information*. Hoboken: Wiley, 2012. 256 p.
- Heineman G., Pollice G., Selkow S. *Algorithms in a Nutshell. A practical guide*. Sebastopol: O’Reilly, 2009. 389 p.
- Sweigart A. *Automate the Boring Stuff with Python*. San Francisco: No Starch Press, 2019. 500 p.
- Shidaganti G., Karthik K. N., Anvith, Kantikar N. A. Integration of RPA and AI in Industry 4.0. Confluence of Artificial Intelligence and Robotic Process Automation. 2023. P. 267–288. DOI: 10.1007/978-981-19-8296-5\_11.
- Siderska J., Suesse Th., Aunimo L. A. Towards Intelligent Automation (IA): Literature Review on the Evolution of Robotic Process Automation (RPA), its Challenges, and Future Trends. *Engineering Management in Production and Services*. 2023. Vol. 15 (4). P. 90–103. DOI: 10.2478/emj-2023-0030.
- Konica Minolta and ROBIN have released a new solution for document recognition, Robin OCR [Access mode: <https://www.rpa-robin.ru/ocrkonica/>]. Date of access: 02/01/2024.
- Degtyareva V. V., Panchenko K. P. Assessing the effectiveness of RPA technologies to justify their implementation in the transport and logistics industry // *First Economic Journal*. 2023. No. 1 (331). P. 50–57. DOI: 10.58551/20728115\_2023\_1\_50. EDN IROWWR. (In Russian)
- Kalinin A. V., Fedyashin M. V., Nuriev A. Ya. Automated system for maintaining a schedule of executed movements of a new generation (AS GID NP). User’s Guide M.: JSC “NIAS”, 2023. 199 p. (In Russian)

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ СРЕДСТВАМИ В ТРАМВАЙНЫХ СИСТЕМАХ

**ГОРЕВ Андрей Эдливич**, д-р экон. наук, профессор; e-mail: a-gorev@mail.ru  
**ПОПОВА Ольга Валентиновна**, канд. техн. наук, доцент; e-mail: o-popova@mail.ru  
**ПЛОТНИКОВ Дмитрий Георгиевич**, канд. техн. наук, доцент; e-mail: dg-plotnikov@mail.ru  
**ОЛЕЩЕНКО Елена Михайловна**, канд. техн. наук, доцент; e-mail: oleshchenko.elena@mail.ru

Высшая школа транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

Описываются составляющие эффекта, который может быть получен при внедрении автономного управления подвижным составом в трамвайных системах городского транспорта. Составляющие эффекта рассматриваются в зависимости от уровня автоматизированного управления, принятого в отечественной и международной нормативной документации. В статье анализируются данные по времени движения между остановочными пунктами трамвайного маршрута в различные периоды времени. Уровень затрат рассчитывается по четырем сценариям: 1) трамвай не имеет систем автоматизированного управления; 2) трамвай оснащен системой автоматизированного управления с высоким уровнем автоматизации, путь максимально изолирован от автомобильного движения с приоритетом проезда светофоров и по-прежнему в нем присутствует водитель; 3) аналогично предыдущему, но трамвай оснащен системой автоматизированного управления с полным уровнем автоматизации (без водителя); 4) аналогично предыдущему, но без модернизации инфраструктуры. На основе проведенного исследования можно сделать вывод, что, используя трамвайные вагоны с автоматизированной системой управления, перевозчик может получить эффект от снижения эксплуатационных затрат за счет уменьшения времени проезда трамваями обратного рейса и, как следствие, сокращение требуемого количества трамваев для выполнения того же объема транспортной работы и от снижения эксплуатационных затрат, в связи с отсутствием необходимости использования водителя, даже при том, что стоимость приобретения трамваев, оборудованных средствами автоматизации, значительно повышается. Однако максимальный эффект от внедрения автоматизированного управления можно получить в синергии двух вышеперечисленных эффектов.

**Ключевые слова:** автономное управление, трамвайное движение, эффективность управления, автоматизированная система управления, автоведение, трамвайный маршрут

DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-01-32-51

### ▼ Введение

Все исследования последних лет констатируют, что для пассажира одним из важнейших показателей качества транспортного обслуживания является время поездки, которое складывается из следующих элементов:

- время на передвижение от места отправления до маршрута городского пассажирского транспорта (ГПТ) и от него до места назначения находится в прямой зависимости от плотности маршрутной сети;
- время на передвижение до остановочного пункта зависит от расстояния между ними;
- время ожидания транспортного средства (ТС) принимается равным половине интервала движения;

- время на посадку в ТС и выход из него зависит от конструктивных особенностей ТС и параметров остановочного пункта;
- время на пересадку складывается из времени перехода на остановочный пункт и ожидания ТС;
- время проезда на транспорте.

По различным оценкам доля времени проезда на транспорте во времени поездки составляет от 40 до 80 %. От проекта маршрутной сети зависит время пешеходных передвижений пассажира, а уровень организации движения по линиям ГПТ должны обеспечивать высокую скорость и стабильность сообщения [1].

Повышение скорости сообщения обеспечивается как за счет использования ТС с высокими динамическими характеристиками



в пределах уровня комфорта для пассажиров и устранения помех по трассе движения, так и методами по стабилизации режимов движения, среди которых все большее значение приобретают автоматизированные и автоматические системы [2].

Первая коммерческая система автоматического транспорта разработана фирмой Boeing и эксплуатируется с 1975 года в городе Morgantown в США, где связывает учебные здания местного университета с несколькими комплексами студенческих общежитий. Общая протяженность сети 13,9 км, на которой имеется 7 остановочных пунктов. В системе эксплуатируется 73 полностью автоматических вагонов. Вагоны системы вмещают 20 человек и передвигаются по подогреваемому в зимнее время бетонному полотну с направляющими со скоростью до 30 км/ч. Стоимость системы составила более 60 млн долл. Система бесплатно обслуживает 20 тыс. студентов, а для жителей города разовая поездка стоит 50 центов. Ввиду того, что система проектировалась в начале 70-х годов прошлого века, она не имеет полного централизованного компьютерного управления, что компенсируется работой трех диспетчеров.

Система автоматического транспорта, построенная на современных технологиях, введена в строй в 2009 году в лондонском аэропорту Хитроу, где она связывает пятый, наиболее современный терминал с удаленными автостоянками. Система протяженностью 3,9 км имеет 3

станции и обслуживается 21 вагоном, который может развивать скорость до 40 км/ч. Среднее время ожидания вагона после вызова составляет 12 с, а максимальное для 95 % пользователей не более 1 мин.

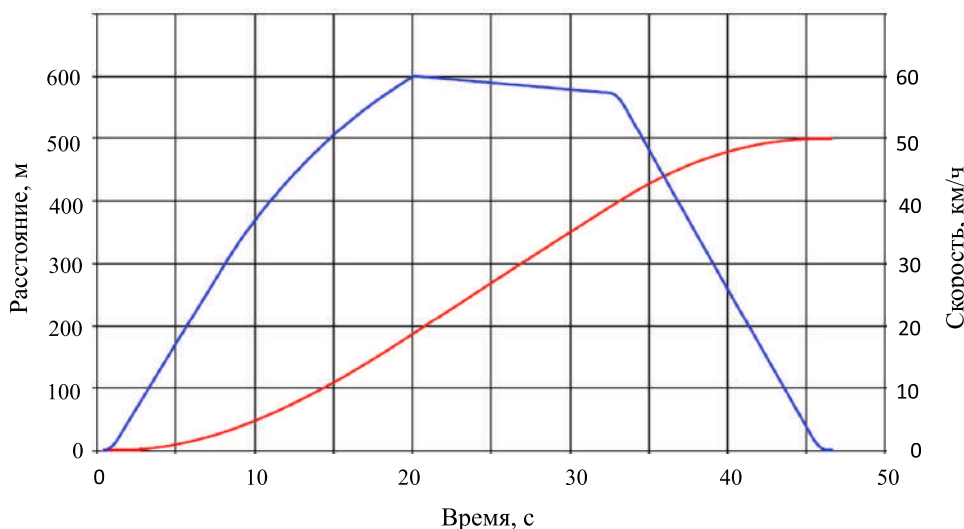
Аналогичные системы в настоящее время связывают выставочные комплексы или парки отдыха с ближайшими станциями массового транспорта в Нидерландах (ParkShuttle), Абу Даби (CyberCab) и Южной Корее (SkyCube). Полностью автоматическое управление реализовано на новых линиях метрополитена и монорельса в Китае, Канаде, Японии и в ряде других стран, в том числе в качестве эксперимента в трамвайных системах [3].

### 1. Автоматизированное управление в системах ГПТ

Функционально системы автоматизированного управления делятся на системы автоведения и системы обеспечения безопасности.

Системы автоведения традиционно распространены на рельсовом транспорте в связи с предопределенностью траектории движения. В настоящее время они используются на ряде зарубежных моделей трамваев, но практика использования трамвайных систем автоведения в РФ отсутствует, в основном уделяется внимание использованию систем обеспечения безопасности [4–6].

На рис. 1 приведены энергооптимизированные зависимости скорости движения и пройденного пути от времени на условном перегоне длиной 500 м при загрузке поезда 6 пасс./м<sup>2</sup>



**Рис. 1.** Зависимости скорости движения и пройденного пути от времени на условном перегоне длиной 500 м при загрузке поезда 6 пасс./м<sup>2</sup>

денного пути от времени на условном перегоне длиной 500 м при загрузке поезда 6 пасс./м<sup>2</sup> для двуправленных трамваев SIRIO итальянского концерна ANSALDOBREDA [7]. При длительности остановки 15 с поезд преодолевает условный перегон за 62 с с эксплуатационной скоростью 29 км/ч при максимальной скорости 60 км/ч.

Такие графики составляются на все перегоны маршрута и закладываются в систему управления трамваем. Функция водителя заключается в управлении дверями состава и включение начала движения трамвая. Система управления воздействует на тягу и тормозные системы в соответствии с заложенными параметрами. Водитель может вмешаться в управление в любой момент при возникновении нештатной ситуации.

Уровни автоматизации управления, согласно стандарту Society of Automotive Engineers (Общество автомобильных инженеров США) SAE J3016 [8], приведены в табл. 1.

Согласно стандарту SAE J3016 система автоматизации управления представляет собой комплекс аппаратных и программных средств, которые совместно реализуют частично или все функции управления динамикой ТС на устойчивой основе. В отличие от этого определения, которое охватывает все уровни, для уровней 3–5 используется определение системы автоматического управления, которая представляет собой комплекс аппаратных и программных средств, совместно реализующих все функции управления динамикой ТС на устойчивой основе независимо от наличия ограничений функционала конструктивных решений.

Для рельсового транспорта в городах основные принципы автоматизации управления изложены в стандарте IEC 62290–1 [9]. На его основе разработан ГОСТ Р 70059–2022<sup>1</sup>, в котором введены 4 уровня автоматизации (УА) системы управления, приведенные в табл. 2.

Таким образом, внедрение системы автоматизированного и автоматического управления трамваем должно учитывать, что трамвай, яв-

ляясь рельсовым транспортом и участником городского движения, подпадает под действие различных по направленности нормативных документов.

## 2. Структура затрат на эксплуатацию трамваев

Структура затрат на эксплуатацию трамваев представляет собой комплексную систему расходов, связанных с обеспечением их надлежащего функционирования и обслуживания. Эксплуатация трамваев включает в себя различные аспекты, начиная от осуществления технического обслуживания и ремонта, закупки необходимых запасных частей и материалов, оплаты труда персонала, включая водителей, кондукторов, технический персонал и административный персонал, и заканчивая оплатой электроэнергии, содержанием энергохозяйства и инфраструктуры. Кроме этого, затраты на эксплуатацию включают в себя амортизацию подвижного состава, необходимого для выполнения перевозок.

Структура эксплуатационных затрат включает в себя следующие статьи расходов перевозчика в соответствии с Приказом Минтранса № 351 [10]:

1. Расходы на оплату труда водителей трамвая ( $C_{зпв}$ ) определяются произведением средней стоимости одного часа работы водителя трамвая на планируемое количество часов работы трамваев, необходимых для выполнения перевозок, включая продолжительность подготовительно-заключительных операций, прохождения предрейсовых инструктажей и медицинских осмотров водителя.

2. Расходы на оплату труда кондукторов ( $C_{зпк}$ ), если они имеются. Даже при использовании автоматизированной системы оплаты проезда может потребоваться наличие кондуктора в салоне ТС.

3. Отчисления на социальные нужды от оплаты труда водителей и кондукторов трамвая ( $C_{сн}$ ).

4. Расходы на электроэнергию на движение трамваев ( $C_э$ ) учитывают стоимость электроэнергии и нормативное потребление электроэнергии, которое в свою очередь зависит от класса используемых трамвайных вагонов. Кроме этого, в затратах перевозчика учитыва-

<sup>1</sup> ГОСТ Р 70059–2022 Системы управления и контроля железнодорожного транспорта для перевозки пассажиров в пригородном сообщении. Принципы построения и основные функциональные требования. ФГБУ «РСТ», 2022. 12 с.

Таблица 1. Уровни автоматизации управления

Уровень SAE	Наименование	Описание	Рулевое управление, разгон или торможение	Наблюдение за обстановкой	Резервное управление динамикой	Режимы управления
Водитель самостоятельно следит за дорожной обстановкой						
0	Без автоматизации	Весь процесс вождения контролирует водитель, задача управления динамикой автомобиля лежит полностью на нем	B	B	B	Нет
1	Включающий помощь водителю	Помощь водителю в управлении рулевой системой или тормозами и педалью подачи топлива, используя информацию о внешней среде	B+C	B	B	Некоторые
2	Частично автоматизированный	Система способна, совместно функционируя, воздействовать и на рулевое управление, и на ускорение или торможение	C	C	B	Некоторые
Автоматизированная система управления наблюдает за дорожной обстановкой						
3	Условно	Система автоматизации вождения берет на себя контроль за динамикой ТС, но водитель может вмешаться	C	C	B	Некоторые
4	Высоко	Система автоматизации вождения берет на себя управление ТС, даже в том случае, если водитель не отреагировал на требование вмешательства в процесс управления. Решения принимает сама система управления динамикой ТС	C	C	C	Некоторые
5	Полностью	Система автоматизации вождения полностью берет на себя те же функции, что и водитель, при этом она может работать в любых условиях внешней среды	C	C	C	Все

Таблица 2. Уровни автоматизации системы по ГОСТ Р 70059-2022

Составная часть системы	Функция	Уровни автоматизации				
		Отсутствие УА0	Частичная УА1	Условная УА2	Высокая УА3	Полная УА4
		Ручной режим	Автоматизированный режим	Автоматический режим		
Бортовое и напольное оборудование	Интервальное регулирование движения поездов	–	+	+	+	+
	Обеспечение безопасной скорости движения поезда	–	+	+	+	+
	Маневровые работы	–	–	–	–	+
	Обнаружение нештатных ситуаций, обработка запросов от пассажиров	–	–	–	–	+
	Предотвращение столкновения	–	–	–	+	+
	Дистанционное управление тягой (моторвагоном)	–	–	–	–	+
	Управление дверьми	–	–	–	–	+
Бортовое оборудование	Контроль отсутствия людей между вагонами или между платформой и поездом	–	–	–	–	+
	Контроль состояния бортового оборудования	–	+	+	+	+
	Управление тягой и торможением	–	–	+	+	+

ется дополнительное производственное энергопотребление (потери в тяговых подстанциях, в системе энергоснабжения, расходы электроэнергии на вспомогательные производственные нужды).

5. Расходы на техническое обслуживание и ремонт трамваев ( $C_{\text{тор}}$ ) включают в себя сумму расходов на оплату труда ремонтных рабочих с отчислениями на социальные нужды и расходов на запасные части и материалы, используемые при техническом обслуживании и ремонте трамваев.

6. Расходы перевозчика на содержание контактно-кабельной сети ( $C_{\text{кк}}$ ) зависят от протяженности контактно-кабельной сети в однопутном исчислении.

7. Расходы перевозчика на содержание тяговых подстанций ( $C_{\text{тп}}$ ) зависят от установленной мощности тяговых подстанций и удельных расходов на их содержание.

8. Расходы перевозчика на содержание и ремонт трамвайного пути ( $C_{\text{п}}$ ) зависят от протяженности трамвайного пути в однопутном исчислении, с учетом всех путей (вспомогательные, служебные и пр.).

9. Расходы перевозчика на содержание собственной службы движения ( $C_{\text{сд}}$ ) зависят от количества используемых трамваев и удельных расходов на содержание службы движения.

10. Прочие расходы ( $C_{\text{пр}}$ ), которые несет перевозчик, включают сумму расходов на оплату труда прочего персонала предприятия с отчислениями и прочих расходов на эксплуатируемые трамваи.

11. Расходы на амортизацию всех ТС ( $A_{\text{пс}}$ ), используемых на перевозках.

Эксплуатационные затраты, которые несет перевозчик, могут быть посчитаны за период или на единицу транспортной продукции, например, 1 км. Таким образом, суммарные затраты на эксплуатацию трамваев с уровнем автоматизации управления в соответствии с SAE J3016–0, 1, 2 и 3, необходимых для выполнения перевозок за рассматриваемый период времени, могут быть рассчитаны следующим образом:

$$C_{\text{экспл}} = C_{\text{зпв}} + C_{\text{зпк}} + C_{\text{сн}} + C_{\text{э}} + C_{\text{тор}} + C_{\text{кк}} + C_{\text{тп}} + C_{\text{п}} + C_{\text{сд}} + C_{\text{пр}} + A_{\text{пс}}$$

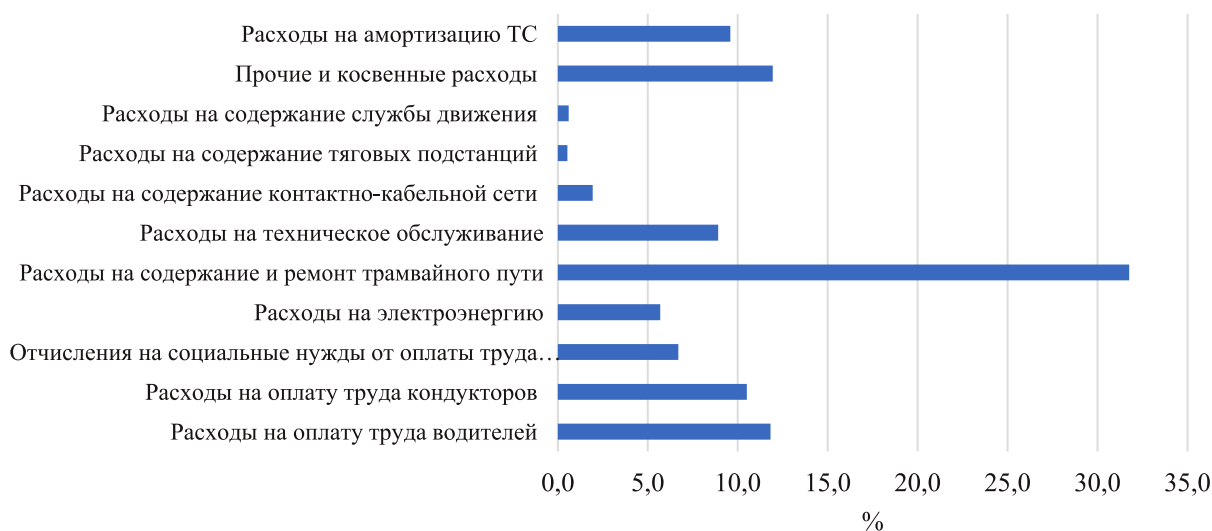
В случае эксплуатации трамваев с уровнем автоматизации управления в соответствии с SAE J3016–4 и 5 или UA3 и UA4 по ГОСТ Р 70059–2022, перевозчик может сократить часть эксплуатационных расходов за счет отсутствия водителя в ТС и, следовательно, отсутствия в статьях затрат оплаты его труда. Кроме этого, использование подобных трамваев предполагает наличие в них инфраструктуры для автоматизированного сбора провозной платы, а значит, и присутствия кондуктора в салоне ТС можно избежать, а значит, сократить еще одну статью эксплуатационных затрат. Однако исследования зарубежных авторов [11, 12] показывают, что даже полная автоматизация транспортных средств не дает возможности полностью сократить статью расходов на оплату труда водителей, поскольку нужен вспомогательный персонал, который будет обслуживать систему управления автоматизированным транспортом, а также может потребоваться дополнительный персонал, который будет следить за соблюдением порядка в ТС. Например, по оценкам, сделанным в Великобритании, при полной автоматизации ТС все равно закладывается порядка 40 % затрат на оплату труда дополнительного персонала.

В настоящей статье, в разделе 3, приведены результаты исследований возможной эффективности применения автоматизированных ТС, произведенных на примере одного из трамвайных маршрутов г. Санкт-Петербурга —

№ 19. Поскольку одним из параметров эффективности применения трамваев без управления водителем, о котором упоминалось выше, является сокращение статьи расходов на оплату труда водителей, представляется целесообразным оценить размер этой статьи расходов перевозчика в общей структуре эксплуатационных затрат.

В исследованиях зарубежных авторов отмечается, что статья расходов на заработную плату водителей пассажирского транспорта является самой крупной статьей расходов и составляет по разным оценкам от 40 до 70 % от общих затрат на перевозки: в Швеции — порядка 42 % [13], в Сингапуре [14] и в Австралии [15], в зависимости от типа используемых ТС — от 40 до 70 % соответственно, в Японии [16] расходы на заработную плату водителей составляют порядка 53 %.

В России заработная плата водителей значительно ниже западных коллег, однако совокупная статья расходов на заработную плату водителей и кондукторов с отчислениями составляет порядка 30 % от общих эксплуатационных расходов, что является определенным резервом для снижения затрат перевозчика при внедрении в эксплуатацию автоматизированных транспортных средств. Структура эксплуатационных расходов на примере трамвайного маршрута № 19 приведена на рис. 2. В расчете использовались существующие параметры для рассматриваемого трамвайного маршрута.



**Рис. 2.** Структура эксплуатационных затрат на примере трамвайного маршрута № 19 «Лахтинский Разлив» — «ж. д. станция Старая Деревня»

Основной составляющей структуры затрат на эксплуатацию трамваев на рассматриваемом маршруте являются расходы на содержание и ремонт трамвайного пути, чуть более 30%. Однако, как было сказано ранее, оплата труда персонала — вторая важная составляющая структуры затрат на эксплуатацию трамваев. Количество персонала, занятого в эксплуатационном процессе, может быть значительным. Кроме водителей и кондукторов, включенных в штат, также может требоваться персонал технических служб, административный персонал для управления и контроля за процессом эксплуатации, другие специалисты. Затраты на оплату труда водителей и кондукторов, включая все стандартные выплаты, связанные с официальным трудоустройством, а также премии и вознаграждения в совокупности составляют порядка 30%.

Таким образом, сократив значительную составляющую эксплуатационных затрат на оплату труда водителей и кондукторов пусть даже не полностью, а частично, за счет внедрения ТС с автоматизированным управлением, это позволит получить экономическую выгоду перевозчику, что будет показано в разделе 3 данной статьи.

Далее в статье будут рассмотрены и другие составляющие эффекта от внедрения автоматизированного управления в ТС.

Однако необходимо учитывать, что внедрение ТС с автоматизированным управлением, наряду с рядом экономических эффектов для перевозчика, потребует закупки дополнительного оборудования и программного обеспечения необходимого для полной автоматизации, например, высокоточные системы автоматического определения местоположения, видеокамеры, ультразвуковые датчики, карты высокого разрешения, центральные процессоры, устройства для связи с другими ТС (vehicle-to-vehicle V2V) и с инфраструктурой (vehicle-to-infrastructure V2I), датчики одометрии, экраны для взаимодействия человека и компьютера (human-machine interaction HMI) с пассажирами (внутренние экраны) и пешеходами (внешние экраны) [17].

В литературе имеется очень мало оценок, на сколько может увеличиться стоимость ТС, используемых для перевозки пассажиров,

с установкой на него оборудования для полной автоматизации. Например, [18] считает, что дополнительные затраты на автоматизацию автобуса для пассажирских перевозок, не являются значительными по сравнению с ценой покупки ТС, а значит, для ТС предполагается нулевое увеличение затрат. В работе [14] отмечается, что для 6-метрового электрического автобуса рост затрат на его автоматизацию составит 36% (на 2019 год), но ожидается, что к 2030 году это значение снизится до 7%. По оценкам российских производителей трамваев стоимость автоматизированного управления и систем помощи водителю, которыми в настоящее время оснащаются трамвайные вагоны, увеличит его закупочную стоимость ориентировочно на 7%.

Таким образом, при оценке эффективности автоматизированного управления, в разделе 3, будет учтено не только снижение эксплуатационных затрат, но и рост статьи затрат на приобретение и амортизацию ТС.

### **3. Оценка эффективности автоматизированного управления**

Поскольку в России опыт использования автоматизированных ТС еще пока невелик, стоит обратиться к зарубежному опыту. В 2019–2020 годы в ряде стран (Швеция, Франция, Сингапур) начались испытания автобусов с автоматизированным управлением [17]. В настоящее время до конца неизвестно, в каких городских условиях ТС с автоматизированным управлением могут свободно использоваться и на каких скоростях, учитывая соображения безопасности. Таким образом, параллельно с испытаниями среди экспертов велись дискуссии о возможности использования полностью автоматизированных ТС в условиях городов. Сейчас все зарубежные эксперты сходятся во мнении, что полностью автоматизированные ТС смогут работать только в определенных условиях, таких как изолированные дороги и низкоскоростная среда [19].

Зарубежные специалисты едины во мнении, что, помимо экономии эксплуатационных расходов, использование ТС с автоматизированным управлением сможет повлиять на эффективность функционирования системы ГПТ и другими способами. Например, в ав-

тобусы, трамваи или троллейбусы может быть внедрен ряд технологий автоматизации управления (системы помощи водителю), таких как предотвращение столкновений, удержание полосы движения, движение ТС в колонне, точное примыкание ТС ГПТ к остановочной платформе (наличие узкого и стабильного зазора между ТС и платформой на остановочных пунктах), адаптивный круиз-контроль, экстренное торможение и др. Ожидаемые преимущества подобных инноваций описаны в работе [20] и включают в себя: снижение количества столкновений, травм и расходов на связанную с этим ответственность; повышение качества услуг для маломобильных групп населения; увеличение пропускной способности транспорта, особенно на выделенных приоритетных полосах и коридорах для движения ГПТ.

В работе [16] оценивается общая экономия затрат за счет использования ТС с автоматизированным управлением в Японии, включая затраты перевозчика и время в пути для пассажиров. Автор предполагает, что время ожидания задается экзогенно, то есть зависит от внешних факторов и не зависит от того, используется ТС с автоматизированным управлением или под управлением человека, поэтому влияние автоматизации на оптимизацию параметров транспортного обслуживания (например, частоту движения ГПТ) не рассматривается.

В работе [17] проведено исследование, на примере Чили и Германии (развивающейся и развитой страны), в котором аналитически оценивается влияние автоматизированного управления на различные факторы, такие как вместимость ТС, частоту движения ТС, стоимость проезда и др. Авторы рассматривают и сравнивают эффекты от различных сценариев использования ТС с автоматизированным управлением, таких как, полная или частичная экономия на оплате труда водителей, увеличение или, напротив, снижение скорости движения ТС с автоматизированным управлением. В результате исследования авторами сделан вывод, что использование ТС с автоматизированным управлением выгодно как перевозчикам, за счет снижения эксплуатационных затрат, так и пользователям ГПТ, за счет снижения затрат времени и оптимального тарифа на перевозку.

Еще одним эффектом для перевозчика от использования ТС с автоматизированным управлением является экономия топлива за счет более сбалансированного стиля вождения. В работе [18] отмечается, что экономия топлива, при использовании автобусов с автоматизированным управлением, составляет 10 % по сравнению с затратами на топливо при использовании автобусов, управляемых человеком.

Таким образом, оценка влияния от внедрения ТС с автоматизированным управлением на эксплуатационные затраты перевозчика, время в пути пассажира, безопасность движения и энергопотребление представляет собой область исследований, которой в настоящее время уделяется большое внимание.

На основе анализа зарубежного опыта по определению эффективности внедрения ТС с автоматизированным управлением, представляется интересным провести подобное исследование для условий функционирования ГПТ в Санкт-Петербурге.

В данной статье мы сосредоточимся на механизмах влияния внедрения автоматизированных ТС на затраты перевозчика, а именно:

- экономия эксплуатационных расходов за счет сокращения затрат времени ТС в пути (на рейс или оборот) и, как следствие, сокращение потребного количества ТС, для выполнения того же количества рейсов;
- экономия эксплуатационных расходов, в связи с отсутствием необходимости использования водителя, даже при том, что стоимость приобретения ТС, оборудованных средствами автоматизации, значительно повышается.

В рамках проведенного нами исследования по определению эффективности использования ТС с автоматизированным управлением в качестве исходных данных был выбран трамвайный маршрут № 19. Маршрут проходит от конечной станции «Лахтинский Разлив» до конечной станции «ж. д. станция Старая Деревня». Протяженность маршрута в прямом и обратном направлениях 4,55 км. Перечень остановочных пунктов с расстояниями между ними в прямом и обратном направлениях приведен в табл. 3. В настоящее время на маршруте работает 5 трамваев большого класса вместимости.

**Таблица 3. Перечень остановочных пунктов и протяженности между ними на трамвайном маршруте № 19 «Лахтинский Разлив» – «ж. д. станция Старая Деревня»**

Расстояния в прямом направлении маршрута, м	Наименование остановок	Расстояния в обратном направлении маршрута, м
	Лахтинский Разлив	500
500	Школьная ул.	700
700	станция метро «Беговая»	700
700	Яхтенная ул.	550
550	ТК «Лента»	600
600	ул. Савушкина, 111	250
250	Стародеревенская ул.	250
	нет / Горохов пер.	550
800	Администрация Приморского района	450
450	ж. д. станция Старая Деревня	
<b>4550</b>		<b>4550</b>

Мы анализируем условия движения трамваев, на примере трамвайного маршрута № 19, под управлением водителя, его эксплуатационную скорость, время проезда между остановочными пунктами и сравниваем аналогичные параметры с вариантом, когда трамвайный маршрут будет обслуживаться трамваями с частично или полностью автоматизированным управлением. При этом при расчете эксплуатационных затрат на рассматриваемый трамвайный маршрут мы учитываем случаи, когда не все затраты на оплату труда водителей, благодаря автоматизации, сокращаются, а скорость движения ТС с автоматизированным управлением может быть даже ниже, чем у ТС, управляемых водителем, а также в расчетах учитываем увеличение стоимости трамваев за счет оборудования из средствами автоматизации и помощи водителю.

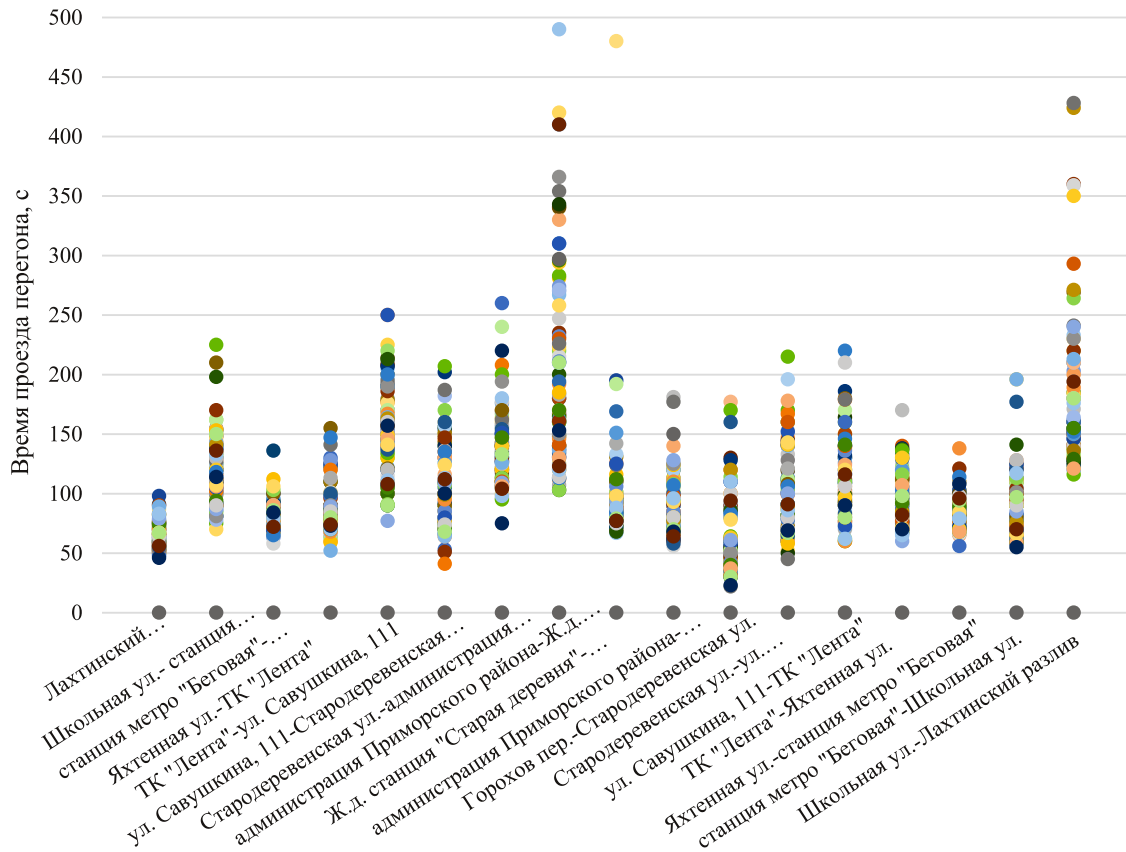
Для анализа условий движения трамваев, на рассматриваемом маршруте № 19, мы воспользовались данными бортового оборудования системы GPS/ГЛОНАСС, которым оснащено каждое ТС ГПТ в Санкт-Петербурге, при помощи которого осуществляется передача данных в автоматизированную систему управления городским пассажирским транспортом. С помощью подобной системы, на основе данных, предоставленных СПб ГКУ «Организатор перевозок», обрабатывался массив данных о фак-

тическом времени прохождения каждым (из 5 работающих по будним дням) трамваем расстояния между всеми остановочными пунктами в каждом рейсе в течение времени работы маршрута. Это исследование проводилось с целью определить разброс значений времени проезда трамвая, управляемого водителем, по одинаковым участкам маршрута в течение времени работы маршрута. Пример результатов проведенного исследования представлен на рис. 3.

Данные на рис. 3 показывают, что разброс времени прохождения трамваем, под управлением водителя, каждого перегона на маршруте достаточно велик (каждая вертикальная линия из точек над наименованием перегона), и разница между минимальным и максимальным временем проезда по перегону различается в среднем более чем в 4 раза. Это может быть связано со многими факторами, которые условно можно разделить на две категории:

- человеческие (водитель может в разное время по-разному управлять трамваем, в зависимости от настроения, усталости, дорожной обстановки и пр.). Тогда, устранив этот фактор, за счет использования трамваев с автоматизированным управлением, можно значительно сократить время проезда по маршруту.
- внешние (светофорное регулирование по пути следования трамвая по маршруту,





**Рис. 3.** Разброс времени прохождения трамваем, под управлением водителя, каждого перегона по маршруту № 19 в прямом и обратном направлениях во время работы маршрута (с 5:49 до 0:47)

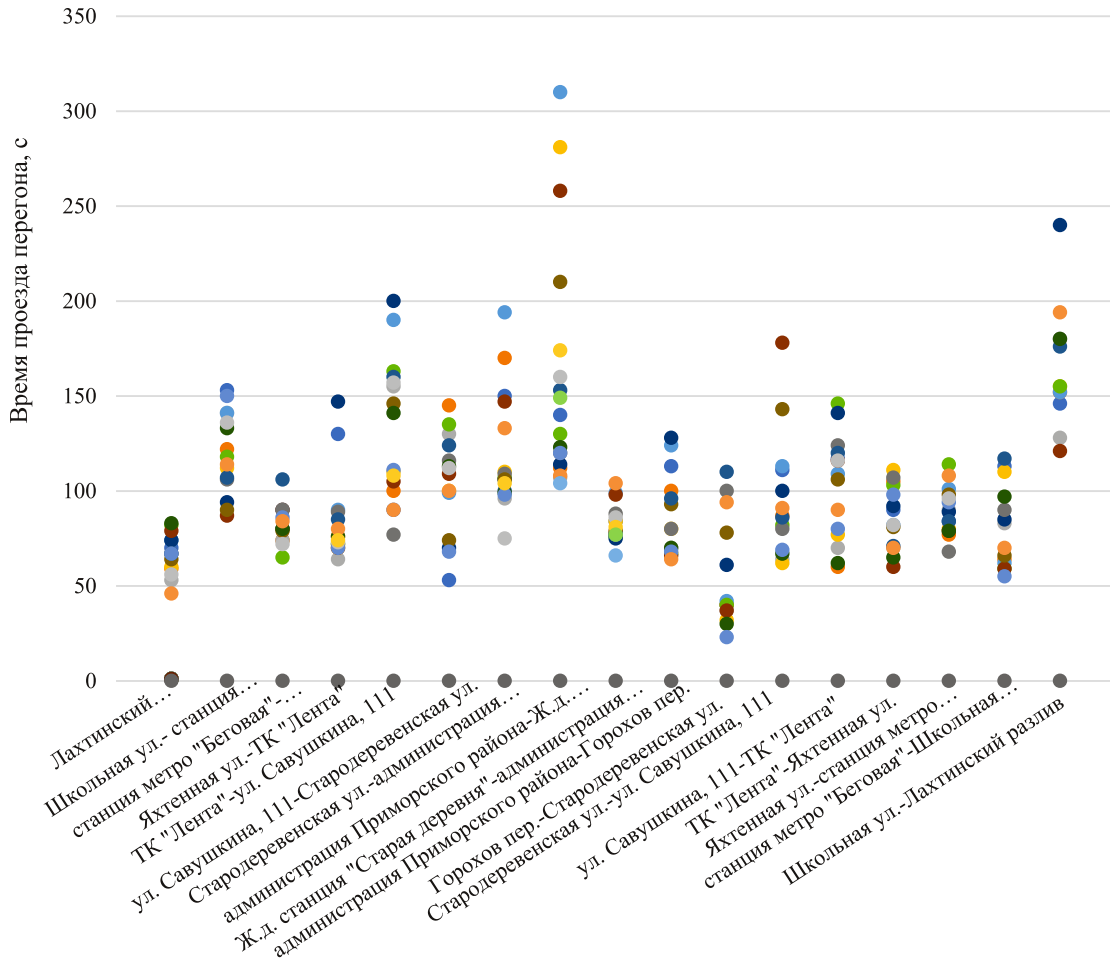
затрудненное движение трамвая в связи с заторами на дорогах, где трамвай следует в общем потоке с другими транспортными средствами). Нивелировать внешние факторы можно за счет физического обособления трамвайных путей на всем протяжении маршрута, а также обеспечения приоритета трамваю средствами светофорного регулирования.

Для понимания значимости (веса) второй категории факторов (внешних), влияющих на разброс времени проезда перегона, мы с некоторой степенью условности предположили, что если исследовать разброс времени проезда в раннее утреннее время (до 7:00) и позднее вечернее время (после 22:00), когда загруженность дорог не слишком велика, можно получить значения, на которые влияют в большей степени факторы из первой категории (человеческие). На рис. 4 приведены результаты исследования разброса времени проезда перегонов

трамваем, под управлением человека, в утреннее (до 7:00) и вечернее (после 22:00) время.

Данные на рис. 4 показывают, что разброс времени прохождения трамваем, под управлением водителя, каждого перегона на маршруте в утреннее и вечернее время (каждая вертикальная линия из точек над наименованием перегона) меньше, чем в случае исследования этого же времени в течение всего дня, и разница между минимальным и максимальным временем проезда по перегону различается в среднем в 2,6 раза. При этом необходимо отметить, что минимальные времена проезда перегонов в утреннее и вечернее время на большинстве из них больше, чем минимальное время проезда перегонов, исследуемое за целый рабочий день (рис. 5).

Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что внешние факторы, безусловно, влияют на разброс времени прохождения перегона, но преимущественное влияние оказывает именно человеческий фактор.



**Рис. 4.** Разброс времени прохождения трамваем, под управлением водителя, каждого перегона по маршруту № 19 в прямом и обратном направлениях во время работы маршрута (с 5:49 до 7:00 и с 22:00 до 0:47)



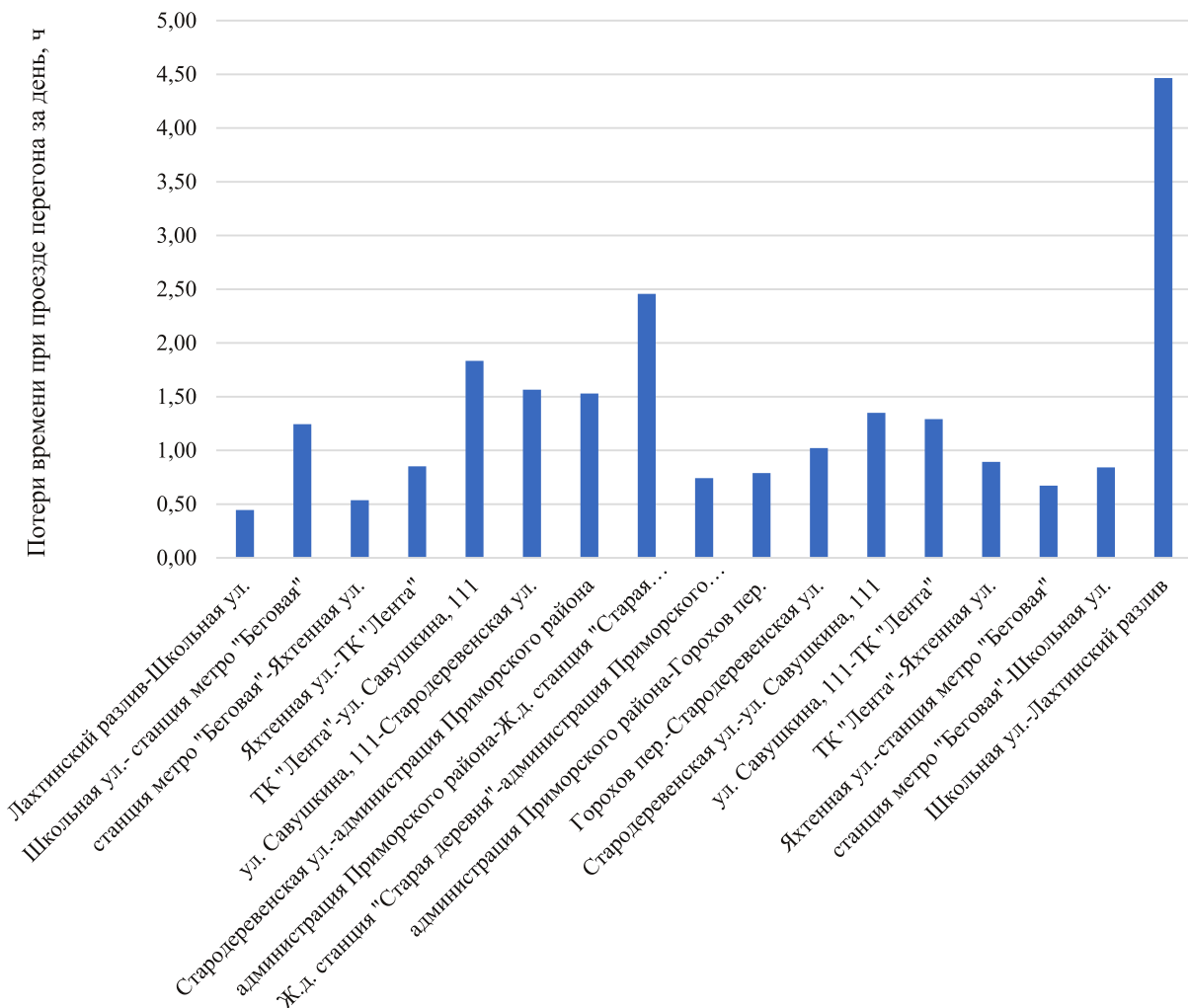
**Рис. 5.** Сравнение минимальных времен проезда перегонов по маршруту № 19 трамваем, под управлением водителя, в различное время работы маршрута

Можно предположить, что, исключив человеческий фактор, за счет использования трамвая с автоматизированным управлением вместо управления водителем, время проезда перегона трамваем с автоматизированным управлением может быть равно минимальному времени проезда перегона трамваем под управлением водителя.

Таким образом, на основе проведенного исследования разброса времени проезда трамваем перегонов на маршруте № 19 (рис. 3 и 4), исключив по возможности факторы, влияющие на разброс значений времени, реально посчитать эффект, который можно достичь, исключив потери времени от неравномерного движения трамваев, рассчитав сумму отклонений времени проезда перегона от минимального значения проезда в каждом рейсе (рис. 6).

Анализируя данные, приведенные на рис. 6, мы пришли к выводу, что если минимизировать разброс значений времени проезда каждого перегона трамваем, то можно получить эффект в размере порядка 22,5 ч ежедневно (суммарное значение потерь времени проезда по маршруту в прямом и обратном направлении в течение рабочего дня).

Возможно предположить, что подобный эффект может быть получен при использовании на маршруте трамваев с автоматизированной системой управления. Однако мы не можем быть уверены, что трамвай с автоматизированной системой управления будет проезжать перегон за то же время (нижняя граница разброса значений (см. рис. 3)), что и трамвай, управляемый водителем. Так, например, по оценкам зарубежных авторов, остается неяс-



**Рис. 6.** Ежедневные потери времени по перегонам маршрута № 19 от неравномерного движения трамваев, управляемых водителем

ным, сможет ли автоматизированное ТС двигаться быстрее в городах, в условиях движения в общем потоке с другими ТС, пешеходами и велосипедистами. Максимальная скорость автоматизированных ТС может быть намеренно ограничена, чтобы избежать риска для безопасности движения. В настоящее время, по опыту использования автоматизированных ТС в Швейцарии, Финляндии и Швеции, максимальная скорость движения для них установлена в диапазоне от 14 до 20 км/ч. В Стокгольме максимальная скорость движения автоматизированного ТС составляла 12 км/ч в первые четыре месяца, а затем была увеличена до 15 км/ч [21]. Такая тенденция — начинать с достаточно низкой скорости и постепенно увеличивать ее, вполне ожидаема, из соображений безопасности и изучения условий эксплуатации, в которых будут использоваться автоматизированные ТС. Однако в настоящее время неизвестно, в каких городских условиях автоматизированные ТС смогут работать на скорости, сопоставимой с ТС, управляемыми водителем. Таким образом, далее может быть рассмотрено два варианта развития событий:

1. Одинаковая средняя скорость движения автоматизированных ТС и управляемых водителем ТС. Тогда минимальное время проезда каждого перегона трамвая, следующим по маршруту № 19 под управлением водителя, может быть приравнено к времени проезда каждого перегона трамвая с автоматизированной системой управления. Этот вариант может быть реализован в случае, если сокращение времени в пути за счет технологий автоматизации, связи между транспортными средствами (V2V) и между инфраструктурой (V2I) полностью компенсируется снижением скорости движения, установленной для автоматизированных транспортных средств по соображениям безопасности движения.

2. Различная скорость (более высокая или, возможно, более низкая) автоматизированных ТС по сравнению с ТС, управляемыми водителем в городских условиях. Этот вариант используется практически во всех пилотных программах по внедрению автоматизированных ТС (преимущественно автобусов, которые работают совместно с другими, не автоматизированными ТС) в условиях, где по сообра-

жениям безопасности для автоматизированных ТС устанавливаются низкие ограничения скорости [26], чтобы компенсировать любое потенциальное сокращение времени в пути, обеспечиваемое технологиями автоматизации и коммуникаций V2V и V2I.

В этой связи представляется интересным сравнить прогнозные значения времени проезда перегонов трамвая с автоматизированной системой управления, рассчитанные на основе графика зависимости скорости движения и пройденного пути от времени на условном перегоне длиной 500 м (см. рис. 1), с минимальным временем проезда этих же перегонов трамвая, под управлением человека (табл. 4).

Сравнивая итоговые значения, приведенные в табл. 4, можно сделать вывод, что минимальное время проезда по маршруту № 19 трамвая, под управлением водителя, без учета посадки и высадки пассажиров, а также без учета отстоя на конечных станциях, составляет 17,7 мин. При этом время проезда по маршруту трамвая, с автоматизированной системой управления, также без учета времени на посадку и высадку пассажиров и отстоя на конечных станциях, составляет 13,9 мин, что в 1,3 раза меньше. Таким образом, среднетехническая скорость трамвая, работающего на маршруте № 19, под управлением человека и с автоматизированной системой управления составляет 30,9 км/ч и 39,3 км/ч соответственно.

В свою очередь, уменьшение времени рейса, за счет внедрения ТС с автоматизированной системой управления, приведет к снижению количества ТС, необходимых для выполнения заданного объема транспортной работы, ТС (табл. 5).

Определение потребного количества трамваев ( $A_{\text{тр}}$ ) для выполнения заданного объема транспортной работы определялось по формуле:

$$A_{\text{тр}} = (N_{\text{п}} t_{\text{об}}) / 2 T_{\text{м}},$$

где  $N_{\text{п}}$  — необходимое количество рейсов, ед.;  
 $t_{\text{об}}$  — время оборотного рейса, ч;  
 $T_{\text{м}}$  — время работы ТС на маршруте, ч.

Таким образом, произведенные расчеты показали, что для выполнения 172 рейсов в сутки

**Таблица 4. Времена проезда перегонов трамвайного маршрута № 19**

Наименование перегона	Протяженность перегона, км	Минимальное время проезда перегона трамваем под управлением водителя, с	Время проезда перегона трамваем с автоматизированной системой управления, с	Время проезда перегона трамваем с автоматизированной системой управления (с учетом времени на посадку и высадку пассажиров), с
Лахтинский Разлив – Школьная ул.	0,5	46	47	72
Школьная ул. – станция метро «Беговая»	0,7	70	59	84
станция метро «Беговая» – Яхтенная ул.	0,7	58	59	84
Яхтенная ул. – ТК «Лента»	0,55	52	50	75
ТК «Лента» – ул. Савушкина, 111	0,6	77	53	78
ул. Савушкина, 111 – Стародеревенская ул.	0,25	41	34	59
Стародеревенская ул. – Администрация Приморского района	0,8	75	65	90
Администрация Приморского района – ж. д. станция Старая Деревня	0,45	103	42	67
ж. д. станция Старая деревня – Администрация Приморского района	0,45	67	42	67
Администрация Приморского района – Горохов пер.	0,55	56	50	75
Горохов пер. – Стародеревенская ул.	0,25	22	34	59
Стародеревенская ул. – ул. Савушкина, 111	0,25	45	34	59
ул. Савушкина, 111 – ТК «Лента»	0,6	60	53	78
ТК «Лента» – Яхтенная ул.	0,55	60	50	75
Яхтенная ул. – станция метро «Беговая»	0,7	56	59	84
станция метро «Беговая» – Школьная ул.	0,7	55	59	84
Школьная ул. – Лахтинский Разлив	0,5	116	47	97
Итого в прямом направлении	4,55	522 (8,7 мин)	409 (6,8 мин)	609 (10,2 мин)
Итого в обратном направлении	4,55	537 (9,0 мин)	428 (7,1 мин)	678 (11,3 мин)
Итого за оборот	9,1	1059 (17,7 мин)	837 (13,9 мин)	1287 (21,5 мин)

**Таблица 5. Расчетные значения требуемого количества трамваев для сравниваемых вариантов**

Параметр	Трамвай под управлением человека (существующие значения параметров)	Трамвай с автоматизированной системой управления (прогнозные значения параметров)
Среднее время работы трамвая на маршруте, ч	16	16
Среднее время оборотного рейса, ч	0,83	0,37
Средняя эксплуатационная скорость, км/ч	11,0	24,6
Количество рейсов в день, ед.	172	172
Требуемое количество трамваев, ед.	5	2

**Таблица 6. Эффект от внедрения автоматизированного управления по рассматриваемым сценариям**

Параметр	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3	Сценарий 4
Годовые эксплуатационные затраты, млн руб.	137,2	96,1	87,5	116,5
Себестоимость 1 км пробега, руб./км	394,3	285,5	258,7	327,3

по маршруту № 19 достаточно двух трамваев с автоматизированной системой управления, что в 2,5 раза меньше, чем при использовании трамваев под управлением водителя.

Для количественной оценки снижения эксплуатационных затрат перевозчика от внедрения ТС с автоматизированной системой управления были произведены расчеты по методике, приведенной в разделе 2 данной статьи по следующим сценариям (табл. 6):

**Сценарий 1.** Эксплуатационные затраты перевозчика при существующем варианте организации движения на трамвайном маршруте № 19 (трамваи работают под управлением человека). При работе на маршруте 5 трамваев большого класса вместимости, средняя стоимость каждого из которых составляет 45 млн руб. Среднее время работы трамваев на маршруте 16 ч, годовой пробег 262 771,6 км.

**Сценарий 2.** Эксплуатационные затраты перевозчика при прогнозном варианте организации движения на трамвайном маршруте № 19 (работают трамваи с уровнем автоматизации управления согласно SAE — 3 или 4, когда водитель может вмешиваться в процесс или наблюдать за процессом движения). То есть при таком варианте затраты перевозчика снижаются за счет сокращения требуемого количества трамваев, при этом затраты на оплату

труда водителей остаются. На маршруте работает 2 трамвая большого класса вместимости, средняя стоимость каждого из которых составляет на 7 % больше, за счет оборудования для автоматизации, чем для трамвая без автоматизации (48,15 млн руб.). Среднее время работы трамваев на маршруте 16 ч, годовой пробег 262 771,6 км.

**Сценарий 3.** Эксплуатационные затраты перевозчика при прогнозном варианте организации движения на трамвайном маршруте № 19 (работают трамваи с уровнем автоматизации управления согласно SAE — 5, когда водитель не требуется). То есть при таком варианте затраты перевозчика снижаются за счет сокращения требуемого количества трамваев и за счет сокращения затрат на оплату труда водителей и кондукторов. Однако, следуя зарубежному опыту, в том числе описанному выше в данной статье, оставляем половину затрат на вспомогательный персонал, который может потребоваться для обслуживания автоматизированной системы управления и слежения за порядком в ТС. При этом на маршруте, как и в Сценарии 2, работает 2 трамвая большого класса вместимости, средняя стоимость каждого из которых составляет на 7 % больше, за счет оборудования для автоматизации, чем для трамвая без автоматизации (48,15 млн руб.).

Среднее время работы трамваев на маршруте 16 ч, годовой пробег 262 771,6 км.

Сценарий 4. Эксплуатационные затраты перевозчика при прогнозном варианте организации движения на трамвайном маршруте № 19 (работают трамваи с уровнем автоматизации управления согласно SAE — 5, когда водитель не требуется), при этом количество трамваев для работы на маршруте оставляем 5 трамваев большого класса вместимости, средняя стоимость каждого из которых составляет 48,15 млн руб. Среднее время работы трамваев на маршруте 16 ч, годовой пробег 262 771,6 км. При таком варианте затраты перевозчика снижаются только за счет сокращения затрат на оплату труда водителей и кондукторов, но с учетом оплаты труда вспомогательного персонала, который может потребоваться для обслуживания автоматизированной системы управления и слежения за порядком в ТС.

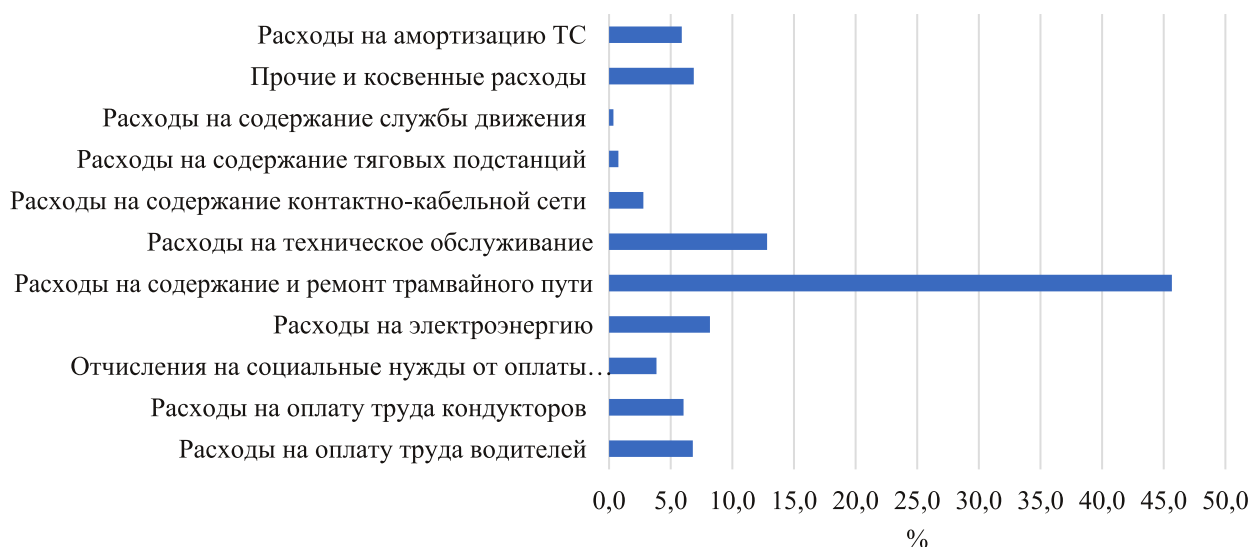
Из расчетов можно сделать вывод, что внедрение средств автоматизации уровня 3 или 4 согласно SAE, когда транспортное средство управляется системой автоматизации, но при необходимости водитель может вмешиваться в процесс управления, позволит снизить годовые эксплуатационные затраты перевозчика и себестоимость 1 км пробега на трамвайном маршруте № 19 на 30% и 27,6% соответственно. В свою очередь, внедрение средств автоматизации уровня 5 согласно SAE, когда

транспортное средство полностью управляется системой автоматизации, позволит снизить годовые эксплуатационные затраты перевозчика и себестоимость 1 км пробега на 36,2% и 34,4% соответственно.

Небольшая разница в эффекте между сценариями 1 и 4 (сокращение годовых эксплуатационных затрат перевозчика и себестоимости 1 км пробега составляют 15,1% и 17% соответственно) позволяет сделать вывод о том, что наибольшее влияние на снижение эксплуатационных затрат оказывает синергетический эффект в виде сокращения необходимого количества ТС в совокупности с сокращением оплаты труда водителей.

На рис. 7–9 приведена структура эксплуатационных затрат для рассматриваемых сценариев.

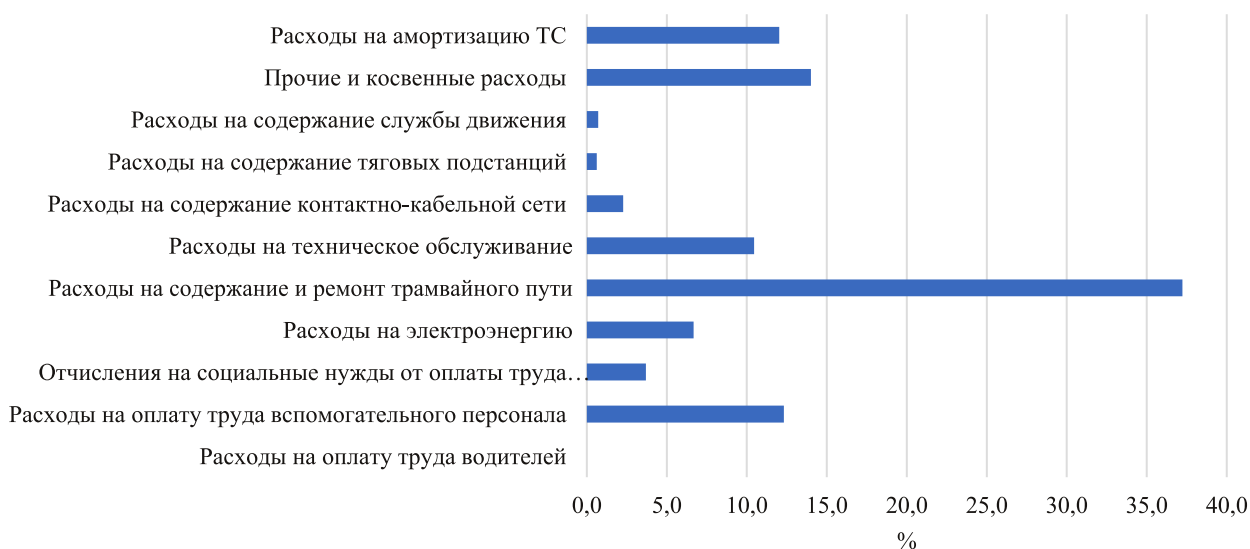
На рис. 7–9 видно перераспределение процентного соотношения статей затрат. По-прежнему во всех сценариях самой большой статьей затрат остаются затраты на содержание и ремонт трамвайного пути, размер которой в абсолютном выражении не изменяется и составляет постоянную величину, поскольку зависит от длины трамвайного пути, по которому проходит маршрут. При этом затраты на оплату труда персонала с отчислениями (водителей, кондукторов, вспомогательного персонала) от сценария к сценарию меняются. В Сценарии 2 они составляют 16,7%, в Сценарии 3 — 8,6%, а в Сценарии 4 — 16,0%.



**Рис. 7.** Структура эксплуатационных затрат для Сценария 2 (работают 2 трамвая, сохранена статья затрат на оплату труда водителей и кондукторов)



**Рис. 8.** Структура эксплуатационных затрат для Сценария 3 (работают 2 трамвая, отсутствует статья затрат на оплату труда водителей, но сохранена статья затрат на оплату труда вспомогательного персонала)



**Рис. 9.** Структура эксплуатационных затрат для Сценария 4 (работают 5 трамваев, отсутствует статья затрат на оплату труда водителей, но сохранена статья затрат на оплату труда вспомогательного персонала)

### Заключение

На основе проведенного исследования можно сделать вывод что, используя трамвайные вагоны с автоматизированной системой управления, перевозчик может получить эффекты:

- от снижения эксплуатационных затрат за счет уменьшения времени проезда трамваями оборотного рейса (на 55,4%) и, как следствие, сокращение потребно-

го количества трамваев (на 60%), для выполнения того же объема транспортной работы;

- от снижения эксплуатационных затрат, в связи с отсутствием необходимости использования водителя (в среднем на 15%), даже при том, что стоимость приобретения ТС, оборудованных средствами автоматизации, значительно повышается.



Однако максимальный эффект от внедрения автоматизированного управления можно получить в синергии двух вышеперечисленных эффектов.

В результате проведенного исследования влияния различных факторов на эффективность внедрения автоматизированных систем управления ТС ГПТ (на примере трамвайного маршрута № 19) можно сделать и ряд общих выводов:

1. Один из основных аргументов в пользу автоматизации управления ТС состоит в снижении потребного количества ТС, необходимого для выполнения заданной транспортной работы. В свою очередь, это позволяет снизить эксплуатационные затраты в целом, в том числе за счет снижения расходов на заработную плату водителей. При этом, внедряя полностью автоматизированные ТС и отказываясь от статьи затрат на оплату труда водителей, можно получить еще больший эффект от синергии этих эффектов.

2. В различных странах доля расходов на заработную плату водителей в общих затратах на обслуживание ТС составляет от 40 % до 70 %, в России это значение находится около 30 %.

3. Ожидается, что в ближайшее время в России процесс автоматизации ТС ГПТ сможет оказать достаточно сильное влияние на снижение эксплуатационных расходов перевозчика.

4. Внедрение ТС с автоматизированным управлением позволит получить потенциальные возможности не только для сокращения расходов на эксплуатацию ТС, но и оптимизировать требуемые ресурсы.

В будущих исследованиях оценки эффективности автоматизации управления ТС следует проанализировать и другие аспекты, такие как эффект для пользователя ГПТ, затраты на разработку и внедрение автоматизации, преимущества в плане безопасности, более детально учесть степень автономности. ▲

#### Библиографический список

- Gorev A., Solodkiy A., Popova O., et al. Formation of priority movement corridors of urban passenger transport // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 632, International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering 27 May to 1 June 2019, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia 10.1088/1757-899X/632/1/012013.
- Горев А. Э. Основные задачи развития пассажирского транспорта общего пользования в Санкт-Петербурге // Транспорт Российской Федерации. 2020. № 3–4 (88–89). С. 59–62. EDN RJLSKC.
- The Autonomous Siemens tram / Andrew W. Palmer; Albi Sema; Wolfram Martens; Peter Rudolph; Wolfgang Waizenegger // 2020 IEEE 23<sup>rd</sup> International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 20–23 September 2020. DOI: 10.1109/ITSC45102.2020.9294699.
- Городской транспорт. Система помощи машинисту на базе искусственного интеллекта COGNITIVE TRAM PILOT [Электронный ресурс]. URL: <https://cognitivepilot.com/products/cognitive-tram-pilot/?ysclid=Islajhtio9436736255> (дата обращения: 15.02.2024).
- Нормативное регулирование эксплуатации беспилотных транспортных средств: состояние и перспективы / С. В. Жанказиев, А. И. Воробьев, А. Ю. Забудский [и др.] // Информационные технологии и инновации на транспорте: Материалы 5-й Международной научно-практической конференции, Орел, 22–23 мая 2019 года / Под общей редакцией А. Н. Новикова. Орел: Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, 2020. С. 190–198. EDN CWQOSA.
- Pierre Verzat, Pierre Gosset. Automated and Autonomous Public Transport Possibilities, Challenges and Technologies. — SYSTRA, 20 p. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.systra.com/wp-content/uploads/2020/09/systra-automated\\_and\\_autonomous\\_public\\_transport\\_2018.pdf](https://www.systra.com/wp-content/uploads/2020/09/systra-automated_and_autonomous_public_transport_2018.pdf) (дата обращения: 20.02.2024).
- Technical Description of the SIRIO Platform Vehicle. AnsaldoBreda, 92 p.
- SAE J3016 2018 Taxonomy and Definitions for Terms Related to On Road Motor Vehicle Automated Driving Systems, SAE, 2021. 35 p.
- IEC 62290–1 Railway applications — Urban guided transport management and command/control systems — Part 1: System principles and fundamental concept. Edition 2.0, IEC, 2014. 13 p.
- Приказ Минтранса РФ от 20 октября 2021 г. № 351 «Об утверждении Порядка определения начальной (максимальной) цены контракта, а также цены контракта, заключаемого с единственным поставщиком (подрядчиком, исполнителем), при осуществлении закупок в сфере регулярных перевозок пассажиров и багажа автомобильным транспортом и городским наземным электрическим транспортом».
- Wadud Z. Fully automated vehicles: a cost of ownership analysis to inform early adoption // Transp. Res. A Policy Pract. 101. 2017. P. 163–176.

12. Wadud Z., MacKenzie D., Leiby P. Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles // *Transp. Res. A Policy Pract.* 86. 2016. P. 1–18.
13. Jansson J. O. A simple bus line model for optimization of service frequency and bus size // *J. Transp. Econ. Policy.* 1980. 14 (1). P. 53–80.
14. Ongel A., Loewer E., Roemer F., et al. Economic assessment of autonomous electric microtransit vehicles. *Sustainability* 11 (3), 2019 [Электронный ресурс]. URL: Sustainability | Free Full-Text | Economic Assessment of Autonomous Electric Microtransit Vehicles (mdpi.com) (дата обращения: 21.02.2024).
15. National Guidelines for Transport System Management in Australia, vol. 4. Urban Transport. Australian Transport Council, 2006 [Электронный ресурс]. URL: PPT — National Guidelines for Transport System Management in Australia PowerPoint Presentation — ID:7087241 (slideserve.com) (дата обращения: 22.02.2024).
16. Abe R. Introducing autonomous buses and taxis: quantifying the potential benefits in Japanese transportation systems // *Transp. Res. A Policy Pract.* 126. 2019. P. 94–113.
17. Tirachini A., Antoniou C. The economics of automated public transport: Effects on operator cost, travel time, fare and subsidy. *Economics of Transportation* 21 (2020) 100151.
18. Bosch P. M., Becker F., Becker H., et al. Cost-based analysis of autonomous mobility services // *Transp. Policy* 64. 2018. P. 76–91.
19. Kyriakidis M., de Winter J. C. F., Stanton N., et al. A human factors perspective on automated driving // *Theor. Issues Ergon. Sci.* 20 (3). 2019. P. 223–249.
20. Lazarus J., Shaheen S., Young S. E., et al. Shared Automated Mobility and Public Transport // *Road Vehicle Automation*. 2018. Vol. 4. P. 141–161.
21. Almlöf E., Nybacka M., Pernestål A., et al. Will leisure trips be more affected than work trips by autonomous technology? Modelling self-driving public transport and cars in Stockholm // *Transportation Research Part A Policy and Practice* 165. 2022. P. 1–19.

*TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH. 2024. Vol. 10, no. 1, P. 32–51*  
DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-01-32-51

### Effectiveness of automated vehicle control in tram systems

#### Information about authors

**Gorev A. E.**, Doctor of Economics, Professor. E-mail: a-gorev@mail.ru  
**Popova O. V.**, PhD in Engineering, Associate Professor. E-mail: o-popova@mail.ru  
**Plotnikov D. G.**, PhD in Engineering, Associate Professor.  
 E-mail: dg-plotnikov@mail.ru  
**Oleshchenko E. M.**, PhD in Engineering, Associate Professor.  
 E-mail: oleshchenko.elena@mail.ru

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

**Abstract.** The components of the effect that can be obtained by implementing autonomous control of rolling stock in tram systems of urban transport are described. The components of the effect are considered depending on the level of automated control adopted in domestic and international regulatory documentation. The article analyzes data on travel time between stopping points on the tram route in different periods of time. The cost level is calculated according to four scenarios: 1) the tram does not have automated control systems; 2) the tram is equipped with an automated control system with a high level of automation, the track is maximally isolated from automobile traffic with priority for traffic lights and the driver is still present on it; 3) similar to the previous one, but the tram is equipped with an automated control system with a full level of automation (without a driver); 4) similar to the previous one, but without infrastructure modernization. Based on the study, we can conclude that by using tram cars with an automated control system, a carrier can benefit from reduced operating costs by reducing the travel time of trams on a return trip and, as a consequence, reducing the required number of trams to perform the same volume of transport work and from reduction in operating costs, due to the absence of the need to use a driver, even though the cost of purchasing trams equipped with automation equipment increases significantly. However, the maximum effect from the introduction of automated control can be obtained in the synergy of the two above effects.

**Keywords:** autonomous control; tram traffic; management efficiency; automated control system; autonomous driving; tram route.

#### References

1. Gorev A., Solodkiy A., Popova O., Ospanov D. Formation of priority movement corridors of urban passenger transport // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 632, International Conference on Innovations in Automotive and Aerospace Engineering 27 May to 1 June 2019, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia 10.1088/1757-899X/632/1/012013.
2. Gorev A. E. Osnovnye zadachi razvitiya passazhirskogo transporta obshchego pol'zovaniya v Sankt-Peterburge // *Transport Rossijskoj Federacii*. 2020. № 3–4 (88–89). S. 59–62. EDN RJLSKC.
3. The Autonomous Siemens tram / Andrew W. Palmer; Albi Sema; Wolfram Martens; Peter Rudolph; Wolfgang Waizenegger // 2020 IEEE 23<sup>rd</sup> International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 20–23 September 2020. DOI: 10.1109/ITSC45102.2020.9294699.
4. Gorodskoj transport. Sistema pomoshchi mashinistu na baze iskusstvennogo intellekta COGNITIVE TRAM PILOT. URL: <https://cognitivepilot.com/products/cognitive-tram-pilot/?ysclid=Islajhtio9436736255> (data obrashcheniya: 15.02.2024).
5. Normativnoe regulirovanie ekspluatatsii bespilotnyh transportnyh sredstv: sostoyanie i perspektivy / S. V. ZHankaziev, A. I. Vorob'ev, A. YU. Zabudskij [i dr.] // *Infor-macionnye tekhnologii i innovacii na transporte: Materialy 5-oj Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Oryol, 22–23 maya 2019 goda / Pod obshchey redakciej A. N. Novikova. Oryol: Orlovskij gosudarstvennyj universitet im. I. S. Turgeneva*, 2020. S. 190–198. EDN CWQOSA.
6. Pierre Verzat, Pierre Gosset. Automated and Autonomous Public Transport Possibilities, Chal-lenges and Technologies. — SYSTRA, 20 p. URL: [https://www.systra.com/wp-content/uploads/2020/09/systra-automated\\_and\\_autonomous\\_public\\_transport\\_2018.pdf](https://www.systra.com/wp-content/uploads/2020/09/systra-automated_and_autonomous_public_transport_2018.pdf) (data obrashcheniya: 20.02.2024).
7. Technical Description of the SIRIO Platform Vehicle. AnsaldoBreda, 92 p.
8. SAE J3016 2018 Taxonomy and Definitions for Terms Related to On Road Motor Vehicle Au-tomated Driving Systems, SAE, 2021. 35 p.

9. IEC 62290–1 Railway applications — Urban guided transport management and command/control systems — Part 1: System principles and fundamental concept. Edition 2.0, IEC, 2014. 13 p.
10. Prikaz Mintransa RF ot 20 oktyabrya 2021 g. № 351 "Ob utverzhdenii Poryadka opredele-niya nachal'noj (maksimal'noj) ceny kontrakta, a takzhe ceny kontrakta, zaklyuchaemogo s edinstvennym postavshchikom (podryadchikom, ispolnitelem), pri osushchestvlenii zakupok v sfere regul'yarnyh perevozk pas-sazhirov i bagazha avtomobil'ny'm transportom i gorodskim nazemnym elek-tricheskim transportom".
11. Wadud Z. Fully automated vehicles: a cost of ownership analysis to inform early adoption // *Transp. Res. A Policy Pract.* 101. 2017. P. 163–176.
12. Wadud Z., MacKenzie D., Leiby P. Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles // *Transp. Res. A Policy Pract.* 86. 2016. P. 1–18.
13. Jansson J. O. A simple bus line model for optimization of service frequency and bus size // *J. Transp. Econ. Policy* 14 (1). 1980. P. 53–80.
14. Ongel A., Loewer E., Roemer F., et al. Economic as-sessment of autonomous electric microtransit vehicles. *Sustainability* 11 (3), 2019. URL: Sus-tainability | Free Full-Text | Economic Assessment of Autonomous Electric Microtransit Vehi-cles (mdpi.com) (data obrashcheniya: 21.02.2024).
15. National Guidelines for Transport System Management in Australia, vol. 4. Urban Transport. Australian Transport Council, 2006. URL: PPT — National Guidelines for Transport System Management in Australia PowerPoint Presentation — ID:7087241 (slideserve.com) (data obrashcheniya: 22.02.2024).
16. Abe R. Introducing autonomous buses and taxis: quantifying the potential ben-efits in Japanese transportation systems // *Transp. Res. A Policy Pract.* 126. 2019. P. 94–113.
17. Tirachini A., Antoniou C. The economics of automated public transport: Effects on operator cost, travel time, fare and subsidy // *Economics of Transportation* 21 (2020) 100151.
18. Bosch P.M., Becker F., Becker H., et al. Cost-based analysis of autonomous mo-bility services // *Transp. Policy* 64. 2018. P. 76–91.
19. Kyriakidis M., de Winter, J. C. F., Stanton N., et al. A human factors perspective on automated driving // *Theor. Issues Ergon. SCI.* 20 (3). 2019. P. 223–249.
20. Lazarus J., Shaheen S., Young S. E., et al. Shared Automated Mobility and Public Transport // *Road Vehicle Automation*. 2018. Vol. 4. P. 141–161.
21. Almlöf E., Nybacka M., Pernestål A., et al. Will leisure trips be more affected than work trips by autonomous technology? Modelling self-driving public transport and cars in Stockholm // *Transportation Research, Part A Policy and Practice* 165. 2022. P. 1–19.

## ТЯГОВЫЕ РАСЧЕТЫ С УЧЕТОМ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

**КОКУРИН Иосиф Михайлович**, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории проблем организации транспортных систем<sup>1</sup>; e-mail: kokyrinim@mail.ru

**ПУШКИН Илья Андреевич**, аспирант<sup>2</sup>; e-mail: usrobots@yandex.ru

<sup>1</sup> Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук

<sup>2</sup> Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах», Санкт-Петербург

В статье изложен метод повышения достоверности расчетов параметров движения поезда с учетом его длины при движении через место ограничения скорости. Предлагается развитие нормативной технологии тяговых расчетов, которая определяет по законам теоретической механики параметры движения поезда в выбираемом режиме снижения установленной скорости на расстоянии, определяемом методом пошагового приближения к искомой величине от заданного значения, с учетом длины поезда. При расчетах поезд представляется в виде материальной точки с массой, сосредоточенной в середине его длины, а расчет параметров движения выполняется только для центра массы. Расстояние движения по месту снижения скорости увеличивается на длину поезда и учитывается в формулах тяговых расчетов. Длина поезда используется для вычисления массы поезда, которая определяет действующие на него силы и создаваемое ускорение. Скорость и расстояние движения поезда на шаге расчета определяются по задаваемому малому интервалу времени. Разработан алгоритм нахождения места начала снижения скорости при движении через место ограничения скорости, согласующийся с предложенными в правилах тяговых расчетов формулами. Предлагаемая методика, в отличие от правил тяговых расчетов, учитывает эти данные. Доказана необходимость учета данных о длине поезда в расчетах межпоездных и станционных интервалов, используемых при разработке и корректировке нормативных графиков движения.

**Ключевые слова:** тяговые расчеты, параметры движения, ограничения скорости, режимы снижения скорости, расстояние снижения скорости, длина поезда, интервальное регулирование.

DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-01-52-63

### ▼ Введение

Правила тяговых расчетов<sup>1</sup> не требуют при определении параметров движения (скорости, времени и расстояния) учитывать длину поезда. Данные о длине поезда используются только для определения длин блок-участков [1–4]. В расчетах времени хода поезда по участку рассчитывается ускорение центра масс и на основе ускорения вычисляется итоговая скорость методом суммирования на малых интервалах времени [5]. Но такая методика непригодна в условиях расчета параметров движения по месту ограничения скорости поезда. Поезду требуется проследовать такое место не только центром массы (ЦМ), но и всей длиной, которая может быть намного больше места ограничения скорости. Не учитывание в расчетах длины поезда влечет недопустимое

отклонение результатов исследуемого процесса. В настоящее время задача моделирования движения поезда ставит своей целью не только расстановку светофоров, но и планирование движения [6–9]. Все это приводит к необходимости рассчитывать параметры движения с учетом всех особенностей технологической работы железной дороги, в том числе ограничений скорости, которые носят временный характер.

Проблема при расчете движения поезда по месту ограничения скорости заключается в необходимости оценки ординаты начала снижения скорости. Все формулы, которые предлагают правила тяговых расчетов<sup>1</sup>, учитывают движение времени только вперед и потому не позволяют вычислить ординату поезда до того как он проследует ее [10].

Актуальность исследования вытекает ввиду возросшего объема информации о поездной ситуации у поездных диспетчеров [11–13]

<sup>1</sup> Правила тяговых расчетов для поездной работы. Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р.

и несовершенства отечественных систем моделирования [5, 14]. В настоящее время оценка железнодорожных участков, технических станций, узлов и направлений выполняется без определения потребности в «окнах» оптимальной продолжительности на длительный период планирования объемов грузовых перевозок, что не позволяет оценивать возможности их выполнения [15].

Основной целью статьи является решение задачи нахождения ординаты начала снижения скорости при приближении к месту ограничения разрешенной скорости движения. Для этого определяются основные уравнения движения поезда, проводится анализ способов снижения скорости и приводится блок-схема алгоритма поиска ординаты начала снижения скорости. Также приводятся примеры тяговых расчетов параметров движения с учетом длин поездов, разности ограничений скорости, режимов и расстояний снижения скорости.

**1. Уравнения движения поезда в условиях дополнительной информации**

Для определения скорости поезда и проходимого расстояния при всех достигаемых поездом величинах ускорения предлагается использовать следующие уравнения теоретической механики.

Конечную скорость на шаге расчета рекомендуется определять по формуле:

$$V_{ki} = V_{Hi} + a_{Pi} \Delta t_{Pi}, \tag{1}$$

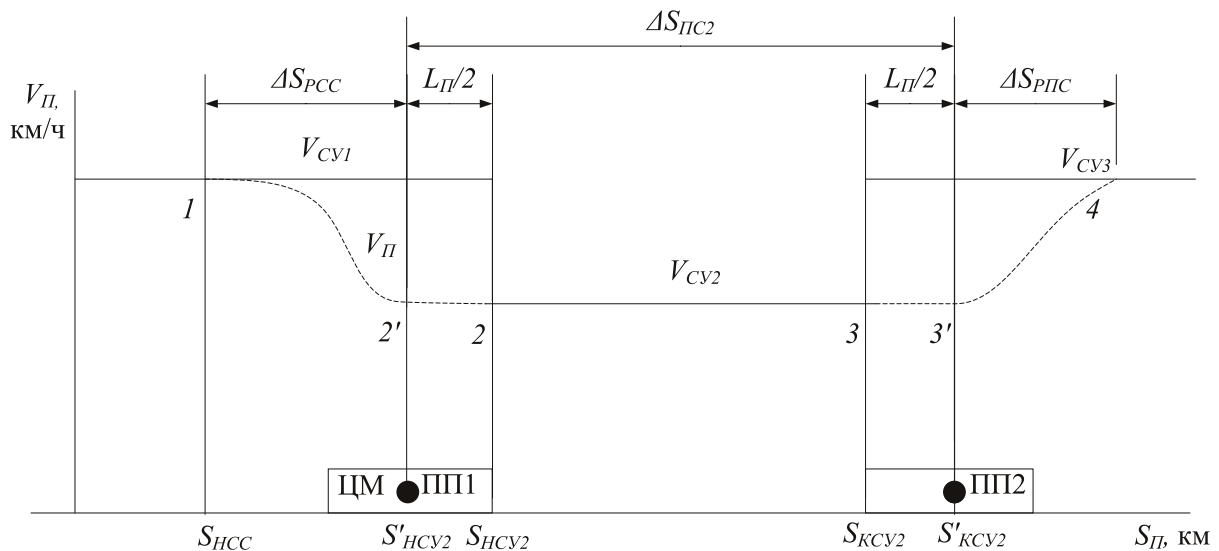
где  $\Delta t_{Pi} = 0,1$  с — рекомендуемый<sup>2</sup> интервал времени на всех шагах расчета. Начальная скорость на первом шаге расчета принимается равной скорости начала расчета.

Пройденное поездом расстояние на шаге расчета следует определять по формуле:

$$\Delta S_{Pi} = V_{Hi} \Delta t_{Pi} + a_{Pi} (\Delta t_{Pi}^2) / 2, \tag{2}$$

Алгебраические операции с размерностями величин, входящих в формулы тяговых расчетов (1)  $м/с + м/с^2 \cdot с = м/с$ , и (2)  $м/с \cdot с + м/с^2 \cdot с^2 = м$ , доказывают правильность размерностей получаемых результатов  $м/с$  для скорости и  $м$  для расстояния.

Представление поезда в виде материальной точки с массой, сосредоточенной в середине длины, требует при тяговых расчетах учитывать длину поезда  $L_{П}$ . Голова поезда (рис. 1) достигает начала места  $S_{НСУ2}$  установленной скорости  $V_{СУ2}$ , при отставании ординаты центра массы  $S'_{НСУ2}$  от  $S_{НСУ2}$  на половину длины поезда  $L_{П}/2$  (положение поезда ПП1). Хвост поезда освобождает конец места  $S_{КСУ2}$  установленной ско-



**Рис. 1.** Проследование поездом места ограничения скорости

<sup>2</sup> Правила тяговых расчетов для поездной работы. Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р.

рости  $V_{CV2}$ , когда ордината центра массы  $S'_{КСУ2}$  опережает  $S_{КСУ2}$  на половину длины поезда  $L_{П}/2$  (положение поезда ПП2). С этого положения становится допустимым повышение скорости с  $V_{CV2}$  до  $V_{CV3}$ , не превышая скорость  $V_{CV2}$ . Расстояние, на котором поезд осуществляет разгон  $\Delta S_{PCC}$ , и расстояние снижения скорости  $\Delta S_{PCC}$  не могут быть равными даже при равенстве скоростей  $V_{CV1}$  и  $V_{CV2}$ , так как на них оказывают влияние разные силы. На ординате 4 центр массы достигает скорости  $V_{CV3}$  и начинается движение поезда с этой установленной скоростью.

Расстояние  $\Delta S_{ПЦ2}$ , проходимое поездом с пониженной скоростью  $V_{CV2}$  (см. рис. 1), равно расстоянию между положениями центра массы поезда ПП1 и ПП2, а также сумме двух половин длины поезда и расстояния продвижения с пониженной скоростью:

$$\Delta S_{ПЦ2} = S'_{КСУ2} - S'_{НСУ2} = L_{П} / 2 + L_{CV2} + L_{П} / 2. \quad (3)$$

Учитывая возможность различий профиля пути при движении первой и второй половин длины поезда, следует вычислять  $\Delta S_{ПЦ2}$  по формуле (3).

Режим снижения скорости поезда (см. рис. 1) выбирается по минимальному расстоянию при служебном торможении ( $\Delta S_{PCCB}$ ) и выбеге ( $\Delta S_{PCCB}$ ) на одинаковом профиле пути. Начинать сравнительные расчеты расстояний необходимо с ординаты начала места движения с пониженной скоростью  $S'_{НСУ2}$  по направлению движения поезда. Это обеспе-

чивает сравнение расстояний снижения скорости на одинаковом профиле пути. Меньшее расстояние используется в начале расчета как задаваемая величина расстояния снижения скорости  $\Delta S_{PCC}$ .

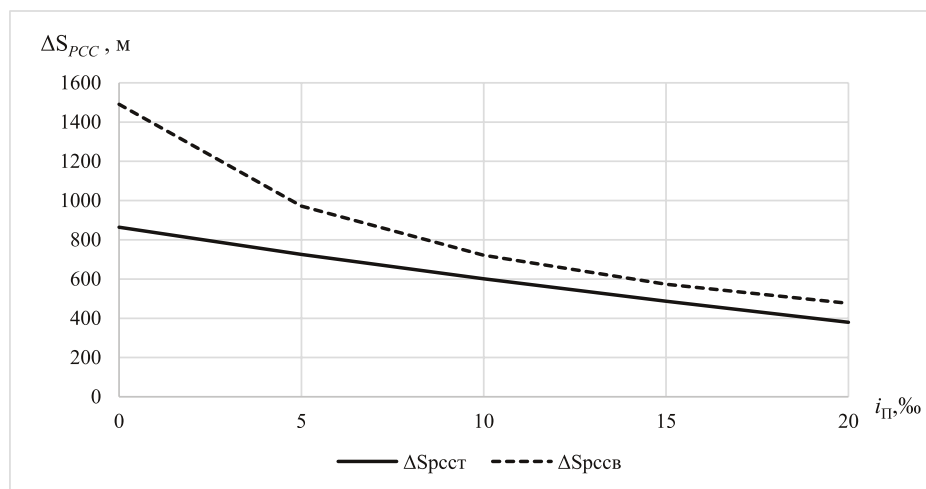
Результаты тяговых расчетов (рис. 2–5) расстояний снижения скорости используются в зависимости от сочетаний исходных данных.

Меньшие расстояния снижения скорости (рис. 2 и 3) грузовому и пассажирскому поездам требуются в режиме служебного торможения при всех рассмотренных уклонах пути. Но различия между расстояниями сокращаются с ростом уклона. Отдельно разность расстояний ( $\Delta S_{B-CT}$ ) изображена на рис. 4 и 5.

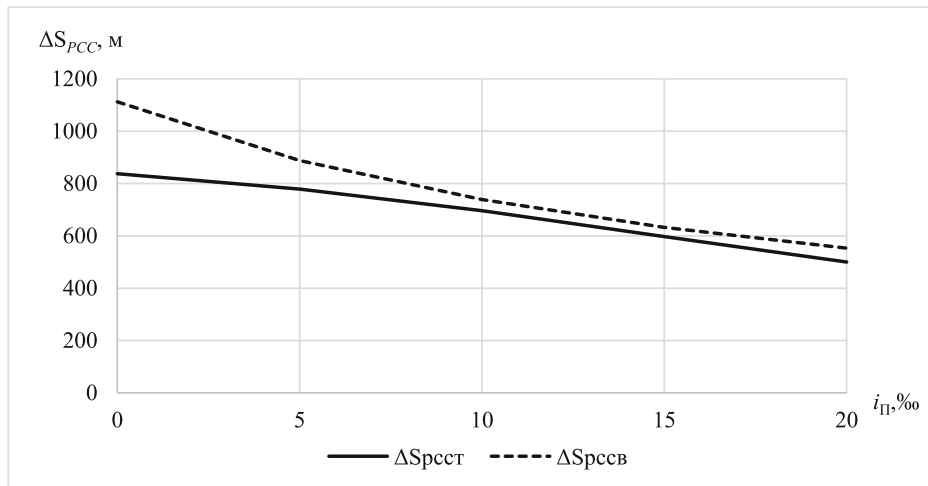
При увеличении подъема пути более десяти тысячных (рис. 4 и 5) разность расстояний снижения скорости грузового поезда в режиме выбега превышает это расстояние в режиме служебного торможения не более, чем на 100 метров. Для пассажирского поезда аналогичное превышение составляет менее 50 метров. Снижение скорости в режиме выбега не требует затрат энергии, практически применяется в указанном диапазоне подъема пути.

Расстояние снижения скорости  $\Delta S_{PCC}$ , равное (см. рис. 1) разности ординат центра массы поезда при начале движения с пониженной скоростью  $S'_{НСУ2}$  и начала снижения скорости  $S_{HCC}$ , можно определить двумя способами:

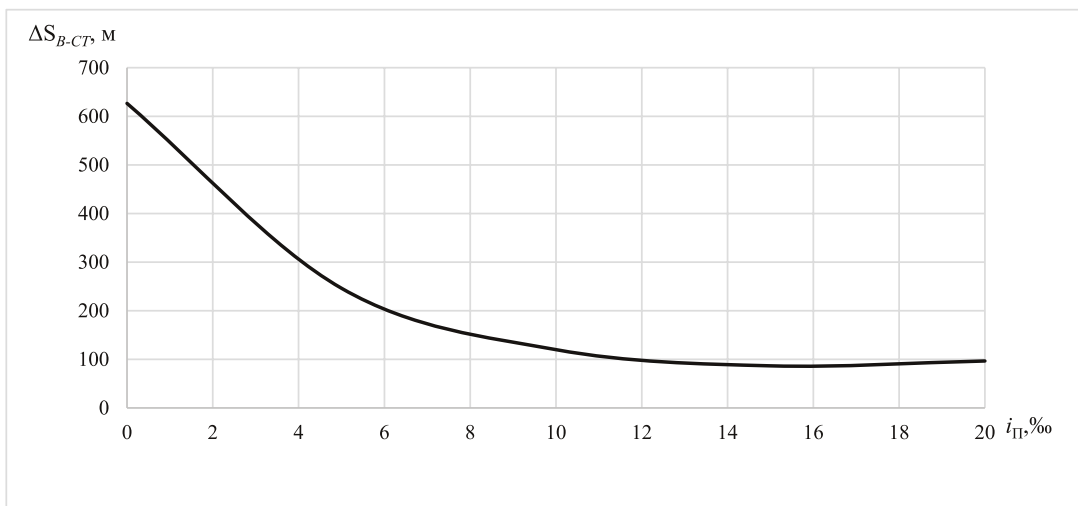
$$\begin{cases} \Delta S_{PCC} = S'_{НСУ2} - S_{HCC} \\ \Delta S_{PCC} = S_{НСУ2} - L_{П} / 2 - S_{HCC} \end{cases} \quad (4)$$



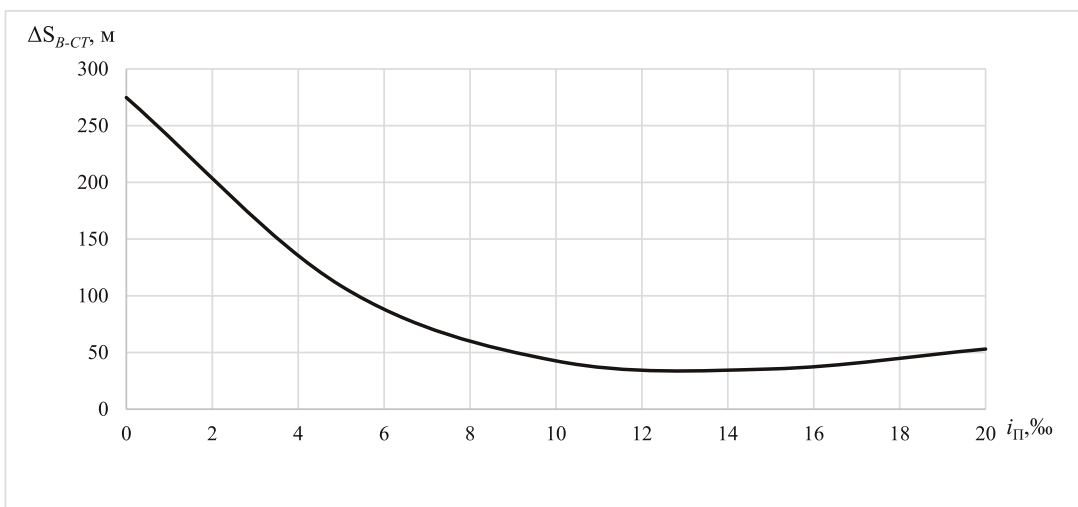
**Рис. 2.** Зависимости расстояния снижения скорости расчетного грузового поезда с 80 до 60 км/ч от уклона пути и режима снижения скорости



**Рис. 3.** Зависимости расстояния снижения скорости расчетного пассажирского поезда со 120 до 100 км/ч от уклона пути и режима снижения скорости



**Рис. 4.** Разность расстояний снижения скорости в режимах выбега и служебного торможения для грузового поезда при снижении скорости с 80 до 60 км/ч



**Рис. 5.** Разность расстояний снижения скорости в режимах выбега и служебного торможения для пассажирского поезда при снижении скорости со 120 до 100 км/ч

Определение ординаты  $S_{HCC}$  затрудняется тем, что расстояние  $\Delta S_{PCC}$  рассчитывается по направлению движения поезда, а ордината  $S_{HCC}$  определяется в обратном направлении. Поэтому перед каждым местом снижения установленной скорости ординату  $S_{HCC}$  приходится определять пошаговым приближением от промежуточной величины  $S'_{HCV2}$  к искомой  $S_{HCC}$ . Эту задачу решает алгоритм, блок-схема которого представлена на рис. 6.

Блок 1 алгоритма рассчитывает ординату  $S'_{HCV2} = S_{HCV2} - L_{\Pi}/2$  и приравнивает ординаты начала снижения скорости в режимах служеб-

ного торможения  $S_{HCCT}$  и выбега  $S_{HCCB}$  к ординате  $S'_{HCV2}$ :  $S_{HCCT} = S_{HCCB} = S'_{HCV2}$ .

Блок 2 выполняет тяговые расчеты расстояний снижения скорости от  $V_{CV1}$  до  $V_{CV2}$ , начиная с ординаты  $S'_{HCV2}$  в режимах выбега  $\Delta S_{PCCB}(S_{HCCB})$  и служебного торможения  $\Delta S_{PCCT}(S_{HCCT})$ .

Блок 3 сравнивает расстояния снижения скорости, рассчитанные в блоке 2, для данного поезда, длиной  $L_{\Pi}$ , на одинаковом профиле пути. Если расстояние  $\Delta S_{PCCT}$  окажется меньше расстояния  $\Delta S_{PCCB}$ , то блок 3 по информации ДА направит процесс приближения промежу-

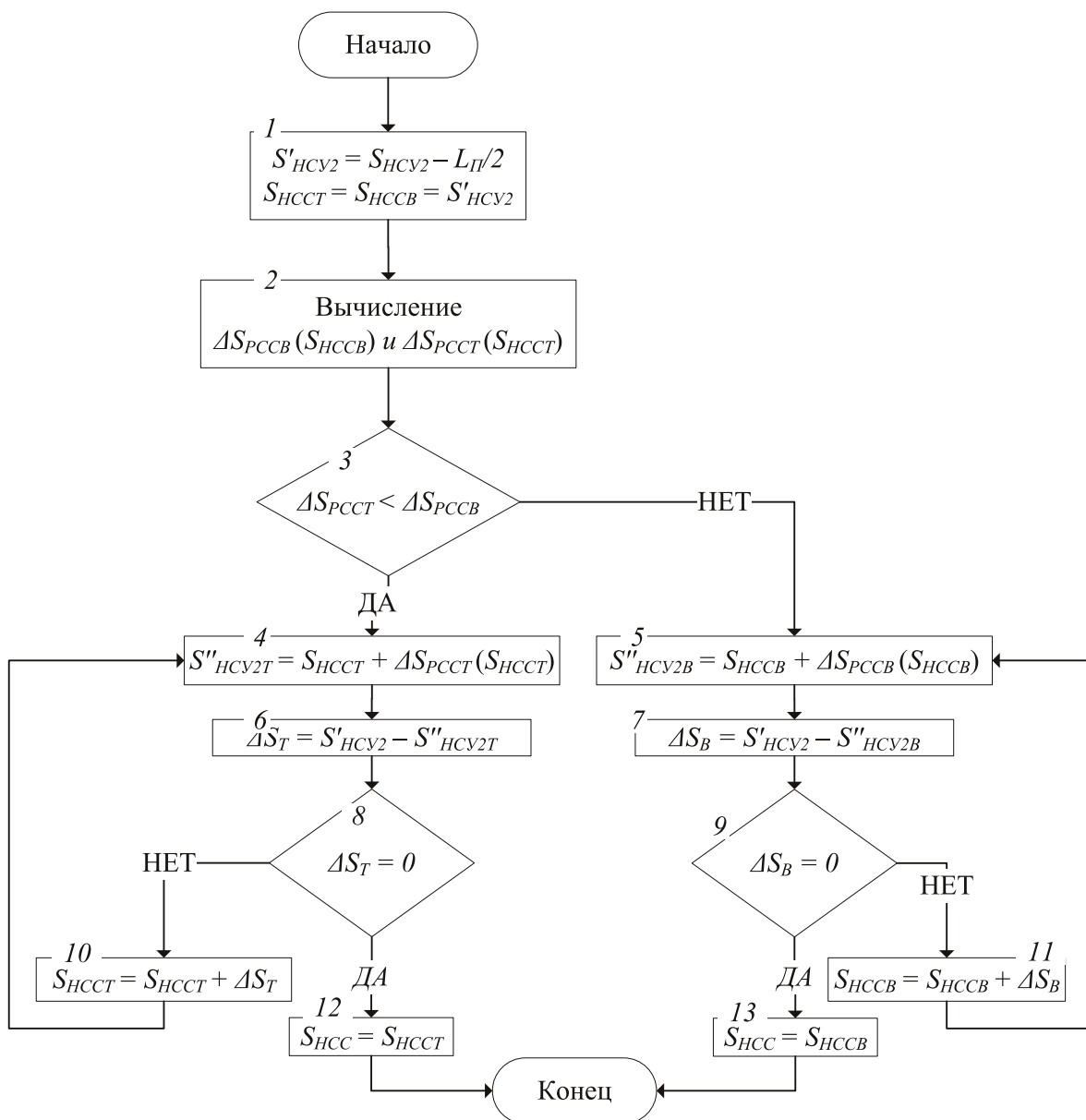


Рис. 6. Блок-схема алгоритма определения ординат начала и конца места снижения скорости



точного начала снижения скорости  $S_{HCCB}$  в комплекс блоков, обслуживающий режим служебного торможения, блоки 4, 6, 8 и 10, в ином случае — в комплекс блоков режима выбега, блоки 5, 7, 9 и 11.

Блок 4 в начале каждой итерации определяет ординату конца снижения скорости при приведении тормозной системы в действие на ординате начала снижения скорости, в данном случае — это  $S_{HCCB}$ . Блок, начиная с ординаты  $S_{HCCB}$ , рассчитывает расстояния снижения скорости  $\Delta S_{PCCT}$  и суммируя с  $S_{HCCB}$  получает  $S''_{HCU2T}$ .

Блок 6 рассчитывает разность  $\Delta S_T$  в режиме служебного торможения  $\Delta S_T = S'_{HCU2} - S''_{HCU2T}$ .

Если ордината  $S''_{HCU2T}$  менее  $S'_{HCU2}$ , то расстояние  $\Delta S_{PCCT}$  закончится до ординаты  $S'_{HCU2}$ , и ордината  $S_{HCCB}$  увеличится в блоке 10 на величину  $\Delta S_T$ .

Если ордината  $S''_{HCU2T}$  превысит  $S'_{HCU2}$ , то расстояние  $\Delta S_{PCCT}$  закончится за ординатой  $S'_{HCU2}$  и ордината  $S_{HCCB}$  уменьшится в блоке 10 на величину  $\Delta S_T$ .

Блок 8 проверяет условия окончания работы алгоритма. Пошаговое изменение  $S_{HCCB}$  создает условие, при котором ордината  $S'_{HCU2}$  становится равной ординате  $S''_{HCU2}$ , а  $\Delta S_T = 0$ . Это заканчивает работу алгоритма.

Блоки 5, 7, 9 и 11 работают аналогично в режиме выбега. В результате, при любом способе снижения скорости, находится  $S_{HCCB}$ , а блоки 12 и 13 приравнивают получившуюся величину к искомой.

На основе получаемых данных алгоритм строит графики зависимости скорости поезда  $V_{II}$  и времени движения  $t_{II}$  от величины ординаты центра массы  $S_{II}$ .

## 2. Практика тяговых расчетов

Примеры тяговых расчетов выполняются на профиле пути двухпутного перегона, ограниченного обгонными пунктами Оп А и Оп Б (рис. 7). Величина перегонного времени хода поездов рассчитывается в соответствии с требованием<sup>3</sup>. При остановке поезда на раздельном пункте по расписанию значения времени на разгон при трогании с места и на замедление при торможении до остановки прибавляются к перегонному времени хода. При изменениях установленной скорости расчеты выполняются с учетом разности скоростей и длин поездов. Длина расчетного грузового поезда не превышает полезную длину путей приема 1050 метров, с учетом допуска 10 метров на установку поезда<sup>4</sup>, пропускаемого в обоих направлениях.

Для примеров тяговых расчетов используется грузовой поезд с массой состава  $Q = (64 + 22) \cdot 72 = 4608$  т, длиной  $l_C = 13,9 \cdot 72 = 1000,8$  м. Масса тепловоза 2ТЭ116 составляет  $P = 276$  т и длина  $L_{II} = 36,3$  м. Длина поезда равна  $L_{II} = 1000,8 + 36,3 + 10 = 1047,1 < l_{II} = 1050$  м, а масса поезда  $P + Q = 276 + 4608 = 4884$  т. Длина перегона между осями обгонных пунктов составляет 13 250 м.

Примеры тяговых расчетов начинаются с перегонных времен хода грузового поезда, пропускаемого без остановок по главным путям соседних обгонных пунктов (табл. 1).

Скорость грузового поезда необходимо снизить (см. рис. 2) с 80 км/ч до 25 км/ч не позднее вступления головы поезда на начало места снижения скорости  $L_{CY}$ . Поэтому поезду требуется проследовать с пониженной скоростью

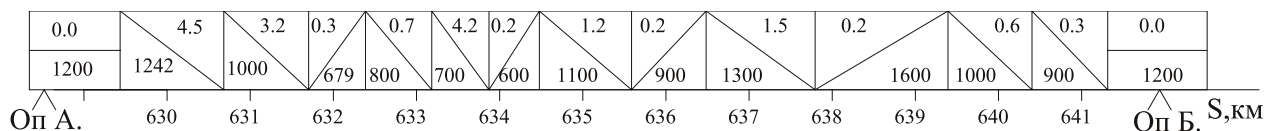


Рис. 7. Профиль пути перегона и обгонных пунктов

<sup>3</sup> Инструкция по разработке графика движения поездов в ОАО «РЖД». Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 27.12.2006 № 2568р.

<sup>4</sup> Правила тяговых расчетов для поездной работы. Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р.

**Таблица 1. Перегонное время хода грузового поезда в зависимости от установленной скорости**

Установленная скорость, км/ч	Перегонное время хода, мин
25	31,78
40	19,86
50	15,90
60	13,25
70	11,35
80	09,93

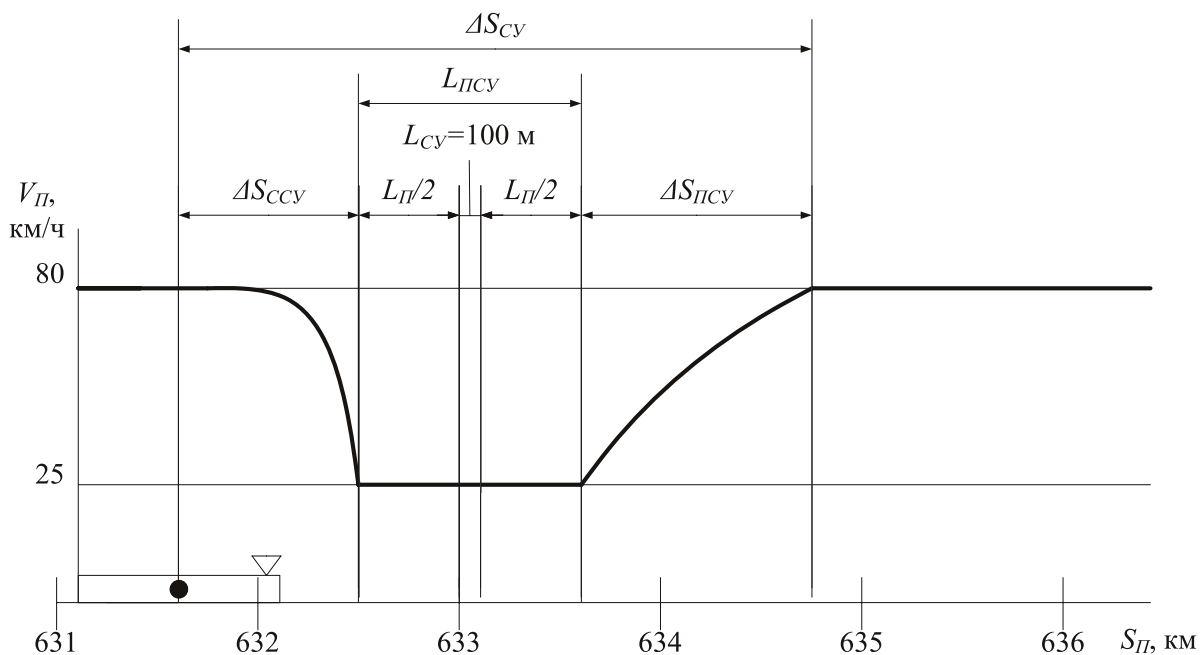
25 км/ч дополнительное расстояние, равное  $L_{п}/2$ . Для освобождения хвостом поезда места снижения скорости  $L_{св}$  центру массы необходимо дополнительно проследовать  $L_{п}/2$ . Следовательно, заданное расстояние движения с пониженной скоростью  $L_{св}$  необходимо увеличить на длину поезда. В итоге, расстояние движения с пониженной скоростью составит:  $L_{псв} = L_{п}/2 + L_{св} + L_{п}/2$ .

После этого, не превышая пониженную скорость 25 км/ч, становится допустимым повышение скорости до 80 км/ч. Расстояния, необходимые для снижения  $\Delta S_{св}$  и повышения скорости  $\Delta S_{псв}$ , определяются программой тяговых расчетов.

При нулевом уклоне пути (табл. 2) меньшее расстояние снижения скорости требуется в режиме служебного торможения во всем диапазоне сравниваемых скоростей и при отрицательном уклоне пути. При снижении скорости от 80, 70 и 60 км/ч до 20 км/ч и менее расстояния в режиме выбега намного превышают расстояния служебного торможения, которые в табл. 2 не включены. При увеличении уклона до 20 тысячных разница между расстояниями снижения скорости становится меньше (табл. 3), а в некоторых случаях практически нулевая, что доказывает возможность использования выбега в качестве способа снижения скорости.

Расчеты показывают, что перегонное время хода без учета (числитель) и с учетом (знаменатель) длины поезда различаются значительно (см. табл. 5). Отношение времен хода записано в ячейки в виде результата деления.

Длину поезда необходимо учитывать при тяговых расчетах. Это связано с наличием целого ряда мест, требующих изменения скорости движения, даже при рассмотрении случая движения между двумя остановочными пунктами (см. рис. 9). Результаты тяговых расчетов демонстрируют повышение скорости остановленного грузового поезда до 80 км/ч, проследо-



**Рис. 8.** Проследование грузовым поездом места ограничения скорости длиной 100 м на перегоне

**Таблица 2. Расстояния снижения скорости расчетному грузовому поезду при нулевом уклоне пути, разных начальных и конечных скоростях, в режимах служебного торможения (числитель) и выбега (знаменатель), м**

Начальная скорость поезда, км/ч	Конечная скорость поезда, км/ч							
	70	60	50	40	25	20	10	0
80	658/ 742	864/ 1491	1037/ 2229	1175/ 2936	1315	1344	1379	1385
70		575/ 748	748/ 1486	886/ 2193	1026/ 3116	1055	1091	1100
60			490/ 739	628/ 1445	767/ 2367	797/ 2615	832	842
50				402/ 706	542/ 1629	571/ 1876	606/ 2238	616/ 2371
40					351/ 923	380/ 1170	415/ 1532	425/ 1665
25						161/ 247	197/ 609	206/ 742
20							141/ 361	151/ 495
10								63/ 133

**Таблица 3. Расстояния снижения скорости расчетному грузовому поезду при уклоне пути в 20 тысячных, разных величинах начальной и конечной скоростей, в режимах служебного торможения (числитель) и выбега (знаменатель), м**

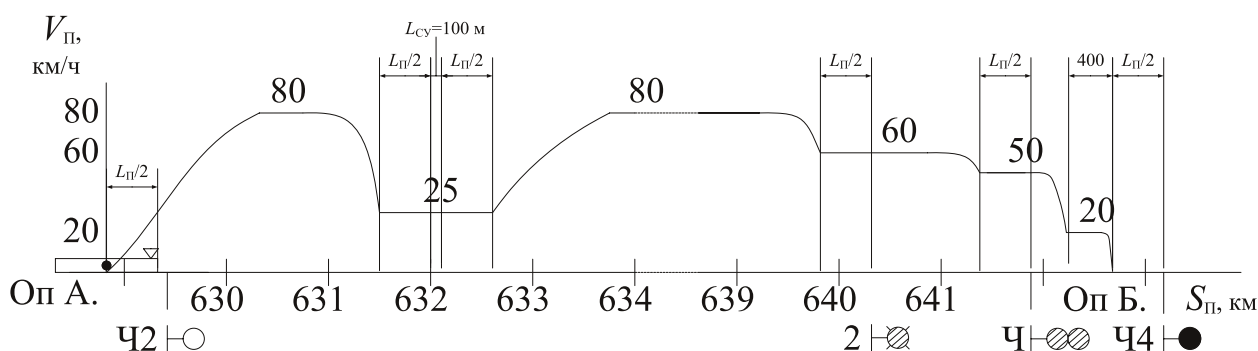
Начальная скорость поезда, км/ч	Конечная скорость поезда, км/ч							
	70	60	50	40	25	20	10	0
80	249/ 253	380/ 476	486/ 677	571/ 848	660/ 1041	680/ 1087	704/ 1149	711/ 1170
70		227/ 234	340/ 427	426/ 598	515/ 791	534/ 837	558/ 900	565/ 921
60			201/ 211	297/ 372	386/ 565	405/ 611	429/ 673	436/ 694
50				171/ 185	274/ 364	293/ 410	317/ 472	324/ 493
40					179/ 193	198/ 239	222/ 301	229/ 322
25						46/ 88	108/ 112	119/ 129
20							62/ 83	83/ 90
10								21/ 41

**Таблица 4. Затраты времени и расстояние, проходимое поездом, в условиях, представленных на рис. 8**

Технологическая операция	Затраты времени движения, мин	Расстояние движения, м
Снижение скорости с 80 до 25 км/ч с использованием служебного торможения, $\Delta S_{\text{св}}$	1,45	1315
Движение по месту ограничения скорости, — $L_{\text{псу}}$	2,78	1159
Разгон от 25 до 80 км/ч — $\Delta S_{\text{псу}}$	0,93	2230
Снижение скорости с 20 км/ч до остановки	0,32	131

**Таблица 5. Перегонное время хода грузового поезда в зависимости от различия установленных скоростей, длин места ограничения скорости, без учета (числитель) и с учетом (знаменатель) длины поезда**

Скорости на месте ограничения, км/ч	Длина места ограничения скорости, м		
	100	200	500
80 – 25 – 80	11,48/ 12,97=0,89	11,63/ 13,15=0,88	12,20/ 13,73=0,89
80 – 40 – 80	10,73/ 11,43=0,94	10,80/ 11,53=0,94	11,08/ 11,78=0,94
80 – 50 – 80	10,40/ 10,83=0,96	10,45/ 10,88=0,96	10,62/ 11,05=0,96
80 – 60 – 80	10,17/ 10,42=0,98	10,18/ 10,43=0,98	10,28/ 10,53=0,98
80 – 70 – 80	10,00/ 10,12=0,99	10,02/ 10,13=0,99	10,05/ 10,17=0,99



**Рис. 9.** Проследование грузовым поездом места ограничения скорости длиной 100 м на перегоне и остановка на боковом пути Оп Б

вание места ограничения скорости до 25 км/ч, снижение скорости с 80 до 60 км/ч при вступлении на блок-участок за предупредительным светофором 2, снижение скорости с 60 до 50 км/ч при вступлении на блок-участок за входным светофором Ч и снижение скорости с 50 до 20 км/ч при движении по блок-участку перед выходным светофором Ч4 с красным огнем. При тяговых расчетах выполняется требование о снижении скорости поезда при следовании к светофору с запрещающим показанием<sup>5</sup>.

Параметры движения пассажирского и грузового поездов, рассчитанные с учетом дополнительных данных, показывают изменение времени хода в зависимости от разных начальных и конечных скоростей, а также параметров перегона (табл. 6).

<sup>5</sup>Распоряжение ОАО «РЖД» от 23 апреля 2019 № 767/р), п. 14, в поездной работе, при следовании к светофору с запрещающим показанием.

Расчеты показывают большое влияние начальных скоростей движения по отклонению и остановок на станциях, даже при движении между двумя соседними станциями. Все это приводит к необходимости увеличения объема учитываемых параметров для повышения точности прогнозирования времен хода. Технология расчетов учитывает затраты времени на проследование перегонов, отдельных пунктов, различая безостановочный пропуск и прием с остановкой на боковой или главный путь.

### Заключение

Предложенный в статье метод тяговых расчетов позволяет существенно (до 12%) повысить достоверность прогноза времени хода поезда, особенно при большой разнице между максимальной скоростью на участке и установленной на участке ограничения.

**Таблица 6. Время хода пассажирского или грузового поезда в зависимости от условий проследования обгонных пунктов и перегона**

№	Условия проследования перегона и обгонных пунктов	Время хода, мин
1	Проследование пассажирским поездом перегона и обгонных пунктов по главным путям со скоростью 120 км/ч	6,60
2	Разгон на обгонном пункте А и проследование пассажирским поездом обгонного пункта Б со скоростью 120 км/ч	7,37
3	Проследование обгонного пункта А по главному пути со скоростью 120 км/ч с остановкой на главном пути обгонного пункта Б. Скорость снижается перед входным светофором с желтым огнем и останавливается перед выходным светофором с красным огнем	8,63
4	Разгон пассажирского поезда на обгонном пункте А до скорости 120 км/ч и остановка на главном пути обгонного пункта Б	9,47
7	Проследование обгонного пункта А по главному пути со скоростью 120 км/ч с остановкой на боковом пути обгонного пункта Б при движении по стрелочному переводу с маркой крестовины 1/18	8,63
8	Проследование обгонного пункта А по главному пути со скоростью 120 км/ч с остановкой на боковом пути обгонного пункта Б при движении по стрелочному переводу с маркой крестовины 1/22	8,63
9	Проследование обгонного пункта А по главному пути со скоростью 120 км/ч и проследование обгонного пункта Б по боковому пути при движении по стрелочному переводу с маркой крестовины 1/18	7,10
10	Проследование обгонного пункта А по главному пути со скоростью 120 км/ч и проследование обгонного пункта Б по боковому пути по стрелочному переводу с маркой крестовины 1/22	6,60
11	Проследование перегона и обгонных пунктов грузовым поездом по главным путям со скоростью 80 км/ч	9,98
12	Разгон на обгонном пункте А и проследование грузовым поездом обгонного пункта Б со скоростью 80 км/ч	11,55
13	Проследование обгонного пункта А по главному пути грузовым поездом со скоростью 80 км/ч с остановкой на главном пути обгонного пункта Б	10,08
14	Разгон грузового поезда на обгонном пункте А до скорости 80 км/ч и остановка на главном пути обгонного пункта Б	11,70
15	Проследование грузовым поездом обгонного пункта А по главному пути со скоростью 80 км/ч с остановкой на боковом пути обгонного пункта Б при движении по стрелочному переводу с маркой крестовины 1/9	10,85
16	Проследование грузовым поездом обгонного пункта А по главному пути со скоростью 80 км/ч с остановкой на боковом пути обгонного пункта Б при движении по стрелочному переводу с маркой крестовины 1/11	10,28
17	Проследование грузовым поездом обгонного пункта А по главному пути со скоростью 80 км/ч и проследование обгонного пункта Б по боковому пути при движении по стрелочному переводу с маркой крестовины 1/9	10,53
18	Проследование грузовым поездом обгонного пункта А по главному пути со скоростью 80 км/ч и проследование обгонного пункта Б по боковому пути при движении по стрелочному переводу с маркой крестовины 1/11	10,13

По результатам моделирования получены численные значения времени хода поезда с учетом и без учета его длины. Эти значения подтверждают необходимость учета длины поезда при тяговых расчетах. При этом режим снижения установленной скорости следует выбирать по минимуму расстояния снижения скорости, рассчитанному с учетом длины поезда, при служебном торможении или выбеге. Определять расстояния снижения скорости рекомендуется от ординаты начала движения

головы поезда с пониженной скоростью, что создает условия для сравнения расстояний на одинаковом профиле пути.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в исследовании процессов, происходящих при движении поездов по станции во время обгона и скрещения, а также процессов, происходящих при одновременном движении нескольких поездов на участках с разными системами интервального регулирования движения поездов. ▲

**Библиографический список**

1. Воронин В. А. Защитный участок: элемент безопасности или пережиток прошлого? // Железнодорожный транспорт. 2019. № 3. С. 25–27. EDN YYTOEH.
2. Кокурин И. М. Технология определения длин фиксированных блок-участков / И. М. Кокурин, И. А. Пушкин // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 10. С. 9–14. DOI 10.34649/AT.2022.10.10.002. EDN FISEIH.
3. Railway Signalling & Interlocking: international Compendium / S. V. Vlasenko. 2-nd Edition. Hamburg: PMC Media House GmbH, 2018. 456 p. ISBN 978–3–96245–156–1. EDN QGVDEZ.
4. Kokurin J. M. Technological Foundations of Traffic Controller Data Support Automation / J. M. Kokurin, D. V. Efanov // 2019 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTs 2019, Batumi, 13–16 сентября 2019 года. Batumi, 2019. P. 8884410. DOI 10.1109/EWDTs.2019.8884410. EDN OHONVP.
5. Александров А. Э. Использование имитационной системы ИСТРА для моделирования графика движения поездов / А. Э. Александров, А. В. Шипулин // Транспорт Урала. 2011. № 4 (31). С. 67–71. EDN OOMTWD.
6. Кокурин И. М. Технологические основы инновационной системы автоматического управления движением поездов / И. М. Кокурин, Д. В. Ефанов // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 5. С. 19–23. DOI 10.34649/AT.2019.5.5.003. EDN UNAKVM.
7. Современные системы управления движением поездов: Отечественный и зарубежный опыт / Е. Н. Розенберг, Е. Е. Шухина, А. В. Озеров, В. М. Малинов. М. : Общество с ограниченной ответственностью «Издательские решения», 2020. 210 с. ISBN 978–5–0051–0924–8. EDN RWWACV.
8. Hintze P., Pruter F. «But that’s not the kilometre in the plan!» — the potential of georeferenced railway infrastructure data // Signal+Draht. 2018. Ausgabe 11. P. 6–15.
9. Pan D. On Intelligent Automatic Train Control of Railway Moving Automatic Block Systems Based on Multi-Agent Systems / D. Pan, Y. Zheng, C. Zhang // Proceedings of the 29<sup>th</sup> Chinese Control Conference, Beijing, China, 29–31 July 2010. P. 4471–4476.
10. Кокурин И. М. Когнитивный метод для решения задач интервального регулирования движения поездов / И. М. Кокурин, И. А. Пушкин // Транспорт России: проблемы и перспективы — 2020: Материалы Юбилейной международной-научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 10–11 ноября 2020 года / © ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук, 2020 © Коллектив авторов, 2020. Т. 2. Санкт-Петербург: Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН, 2020. С. 18–27. EDN XCFCWK.
11. Цветков В. Я. Информационная управленческая ситуация на транспорте / В. Я. Цветков, А. Л. Охотников // Государственный советник. 2018. № 2(22). С. 27–33. EDN XRZMPJ.
12. Кокурин И. М. Алгоритмизация решений поездного диспетчера по выбору станций обгона поездов на однопутном участке / И. М. Кокурин, А. Б. Васильев // Вестник транспорта Поволжья. 2015. № 1 (49). С. 64–73. EDN TQMDJP.
13. Кокурин И. М. Автоматизация информационной поддержки принятия решений поездным диспетчером при организации движения поездов / И. М. Кокурин, А. Б. Васильев // Автоматика на транспорте. 2015. Т. 1, № 2. С. 156–167. EDN UGYUKT.
14. Александров А. Э. Расчет и оптимизация транспортных систем с использованием моделей (теоретические основы, методология): специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : дис. ... докт. техн. наук. Екатеринбург, 2008. 285 с. EDN QENPZH.
15. Беседин А. И. Определение потерь наличной пропускной способности двухпутных и многопутных железнодорожных участках, оборудованных автоблокировкой, от действия предупреждений по ограничению скоростей движения поездов / А. И. Беседин // Наука и техника транспорта. 2008. № 3. С. 12–15. EDN JUKTWT.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH. 2024. Vol. 10, no. 1. P. 52–63  
DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-01-52-63

### Traction calculations taking into account additional data

#### Information about authors

**Kokurin J. M.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Problems of Organization of Transport Systems<sup>1</sup>.

E-mail: kokyrim@mail.ru

**Pushkin I. A.**, Postgraduate Student<sup>2</sup>. E-mail: usrobots@yandex.ru

<sup>1</sup> N. S. Solomenko Transport Problems Institute Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg

<sup>2</sup> Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Department of Automation and Remote Control on Railways

**Abstract.** The article outlines a method for increasing the accuracy of calculations of train motion parameters, taking into account its length when moving through a speed limit section. It is proposed to develop a normative technology for traction calculations, which determines, according to the laws of theoretical mechanics, the parameters of train movement in a selectable mode of reducing the set speed at a distance determined by the method of step-by-step approximation to the desired value from a given value, taking into account the length of the train. During calculations, the train is represented as a material point with mass concentrated in the middle of its length, and the calculation of motion parameters is performed only for the center of mass. The travel distance at the point of speed reduction increases by the length of the train and is considered in the traction calculation formulas. The train length is used to calculate the train mass, which determines the forces acting on the train and the acceleration generated. The speed and distance of the train at the calculation step are determined based on a specified small time interval. An algorithm has been developed for finding the place where the speed reduction begins when moving through a speed limit area, consistent with the formulas proposed in the rules for traction calculations. The proposed methodology, in contrast to the rules for traction calculations, takes these data into account. The necessity of taking into account data on the length of the train in the calculations of inter-train and station intervals used in the development and adjustment of standard traffic schedules has been proven.

**Keywords:** traction calculations, movement parameters, speed limits, speed reduction modes, speed reduction distance, train length, interval regulation.

#### References

- Voronin V. A. Zashchitnyj uchastok: element bezopasnosti ili perezhitok proshlogo? / V. A. Voronin // *Zheleznodorozhnyj transport*. 2019. № 3. S. 25–27. EDN YYTOEH. (In Russian)
- Kokurin I. M. Tekhnologiya opredeleniya dlin fiksirovannykh blok-uchastkov / I. M. Kokurin, I. A. Pushkin // *Avtomatika, svyaz', informatika*. 2022. № 10. S.9–14. DOI 10.34649/AT.2022.10.10.002. EDN FISEIH. (In Russian)
- Railway Signalling & Interlocking: international Compendium / S. V. Vlasenko. 2-nd Edition. Hamburg: PMC Media House GmbH, 2018. 456 p. ISBN 978–3–96245–156–1. EDN QGVDEZ.
- Kokurin J. M. Technological Foundations of Traffic Controller Data Support Automation / J. M. Kokurin, D. V. Efanov // 2019 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTs 2019, Batumi, 13–16 sentyabrya 2019 goda. Batumi, 2019. P. 8884410. DOI 10.1109/EWDTs.2019.8884410. EDN OHONVP.
- Aleksandrov A. E. Ispol'zovanie imitacionnoj sistemy ISTRa dlya modelirovaniya grafika dvizheniya poezdov / A. E. Aleksandrov, A. V. Shipulin // *Transport Urala*. 2011. № 4 (31). S. 67–71. EDN OOMTWD. (In Russian)
- Kokurin I. M. Tekhnologicheskie osnovy innovacionnoj sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem poezdov / I. M. Kokurin, D. V. Efanov // *Avtomatika, svyaz', informatika*. 2019. № 5. S. 19–23. DOI 10.34649/AT.2019.5.5.003. EDN UNAKVM. (In Russian)
- Sovremennye sistemy upravleniya dvizheniem poezdov: Otechestvennyj i zarubezhnyj opyt / E. N. Rozenberg, E. E. SHuhina, A. V. Ozerov, V. M. Malinov. Moskva: Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu «Izdatel'skie resheniya», 2020. 210 s. ISBN 978–5–0051–0924–8. EDN RWWACV. (In Russian)
- Hintze P., Pruter F. «But that's not the kilometre in the plan!» — the potential of georeferenced railway infrastructure data // *Signal+Draht*. 2018. Ausgabe 11. P. 6–15.
- Pan D. On Intelligent Automatic Train Control of Railway Moving Automatic Block Systems Based on Multi-Agent Systems / D. Pan, Y. Zheng, C. Zhang // *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, Beijing, China, 29–31 July 2010*. P. 4471–4476.
- Kokurin I. M. Kognitivnyj metod dlya resheniya zadach interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov / I. M. Kokurin, I. A. Pushkin // *Transport Rossii: problemy i perspektivy — 2020: Materialy YUbilejnoj mezhdunarodnoj-nauchno prakticheskoy konferencii, Sankt-Peterburg, 10–11 noyabrya 2020 goda* / © FGBUN Institut problem transporta im. N. S. Solomenko Rossijskoj akademii nauk, 2020 © Kollektiv avtorov, 2020. T. 2. Sankt-Peterburg: Institut problem transporta im. N. S. Solomenko RAN, 2020. S. 18–27. EDN XCFCWK. (In Russian)
- Cvetkov V. Ya. Informacionnaya upravlencheskaya situaciya na transporte / V. Ya. Cvetkov, A. L. Ohotnikov // *Gosudarstvennyj sovetnik*. 2018. № 2 (22). S. 27–33. EDN XRZMPJ. (In Russian)
- Kokurin I. M. Algoritmizaciya reshenij poezdnogo dispetchera po vyboru stancij obgona poezdov na odnoputnom uchastke / I. M. Kokurin, A. B. Vasil'ev // *Vestnik transporta Povolzh'ya*. 2015. № 1 (49). S. 64–73. EDN TQMDJP. (In Russian)
- Kokurin I. M. Avtomatizaciya informacionnoj podderzhki prinyatiya reshenij poezdnym dispetcherom pri organizacii dvizheniya poezdov / I. M. Kokurin, A. B. Vasil'ev // *Avtomatika na transporte*. 2015. T. 1, № 2. S. 156–167. EDN UGYUKT. (In Russian)
- Aleksandrov A. E. Raschet i optimizaciya transportnykh sistem s ispol'zovaniem modelej (teoreticheskie osnovy, metodologiya): special'nost' 05.22.08 "Upravlenie processami perevozok" : dis. ... dokt. tekhn. nauk. Ekaterinburg, 2008. 285 s. EDN QEHPZH. (In Russian)
- Besedin A. I. Opredelenie poter' nalichnoj propusknoj sposobnosti dvuhputnyh i mnogoputnyh zheleznodorozhnyh uchastkah, oborudovannyh avtoblokirovkoj, ot dejstviya preduprezhdenij po ogranicheniyu skorostej dvizheniya poezdov / A. I. Besedin // *Nauka i tekhnika transporta*. 2008. № 3. S. 12–15. EDN JUKTWT. (In Russian)

# ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОСЛЕ ОТКАЗОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИРТУАЛЬНОЙ СЦЕПКИ ПОЕЗДОВ

**БУШУЕВ Сергей Валентинович**, канд. техн. наук, проректор по научной работе, доцент<sup>1</sup>;  
e-mail: sbushuev@usurt.ru

**КОВАЛЕВ Игорь Александрович**, канд. техн. наук, доцент<sup>2</sup>; e-mail: ikovalev@usurt.ru

Уральский государственный университет путей сообщения, кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железных дорогах»<sup>1</sup>, кафедра «Управление эксплуатационной работой»<sup>2</sup>

В статье рассмотрено влияние технологии группового автоведения (виртуальной сцепки) на ускорение процесса восстановления движения после отказа с перерывом в движении на участке железной дороги. Определены возможные межпоездные интервалы: расчетные и статистические оценки с учетом реальных условий движения на участке и с применением технологии виртуальной сцепки. При этом влияние ограничений по энергоснабжению не рассматривалось, предполагается, что в процессе массового внедрения технологии группового автоведения система энергоснабжения будет усилена для обеспечения возможностей систем автоматики. Проведено имитационное моделирование работы участка железной дороги в системе макро моделирования транспортных узлов и полигонов ИМЕТРА с целью комплексной оценки влияния внедрения группового автоведения на показатели работы участка в нормальном режиме работы и после восстановления движения при длительном (8 часов) отказе технических средств. Рассмотрена возможность усиления пунктов технического осмотра дополнительными бригадами для ускорения восстановления движения после отказа технических средств.

**Ключевые слова:** пропускная способность железных дорог, межпоездной интервал, системы интервального регулирования движения поездов, виртуальная сцепка, групповое автоведение поездов, система ИМЕТРА, имитационное моделирование, график движения поездов.

DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-01-64-73

## ▼ Введение

Вслед за эпохой кардинального изменения технических решений электрической централизации [1] пришло время систем интервального регулирования. Особый интерес представляет возможность переноса функций поддержания нужного интервала на локомотив, при этом учитывается уровень развития технологии, функция обеспечения безопасности сохраняется за системами автоблокировки, но возникает синергетический эффект в увеличении пропускной способности участков железных дорог.

С 2019 года в ОАО «РЖД» началось внедрение и продолжается расширение использования технологии организации перевозки виртуально сцепленными грузовыми поездами «Виртуальная сцепка» (ВСЦ) [2]. Общая эксплуатационная длина полигона внедрения составила более 5000 км, более 10 тыс. пар поездов было проведено по технологии ВСЦ в 2022 году с увеличением в 2023 году. Все это

благодаря тому, что технология группового автоведения поездов, частным случаем реализации которой является внедряемая ВСЦ, обладает большим потенциалом по увеличению пропускной способности участков железных дорог [3, 4] за счет снижения интервала между виртуально сцепленными поездами даже на участках, оборудованных трехзначной автоблокировкой [5]. За рубежом виртуальная сцепка (virtual coupling) рассматривается как один из вариантов реализации четвертого уровня европейской системы управления ERTMS<sup>1</sup> [6, 7] для высокоскоростных поездов [8].

Цель данной статьи — оценить влияние массового внедрения технологии группового автоведения на время восстановления движения на участке железной дороги после отказов в условиях эксплуатации железных дорог России. Для этого будем оценивать изменение

<sup>1</sup> Европейская система управления движением поездов (англ. European Rail Traffic Management System).



показателей работы участка во время и после длительного перерыва в движении поездов. Для оценки роли группового автоведения также необходимо учесть возможность сокращения межпоездного интервала за счет технологии ВСЦ.

**1. Результаты исследований межпоездных интервалов на грузонапряженном участке железной дороги**

Схема движения с трехблочным разграничением на участках с трехзначной автоблокировкой приведена на рис. 1, а, а применение группового автоведения позволяет двигаться на тех же участках с двухблочным разграничением без снижения установленной скорости и безопасности движения, рис. 1, б.

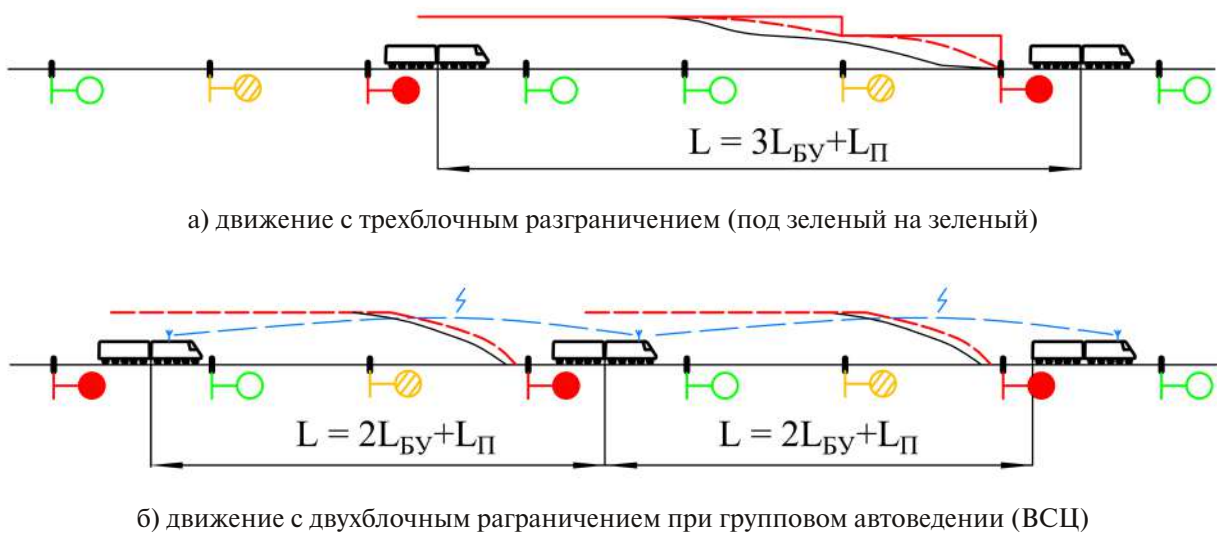
Межпоездной интервал, который реально может обеспечить система интервального регулирования движения поездов (СИРДП), зависит от типа системы, особенностей проекта на конкретном участке и фактически реализуемой скорости движения. На фактическую скорость влияет множество факторов: поездная обстановка, привычки конкретного машиниста, решения, принятые при оперативном планировании движения поездов.

Исследования движения поездов авторами статьи на одном из грузонапряженных участков ОАО «РЖД» протяженностью более 150 км,

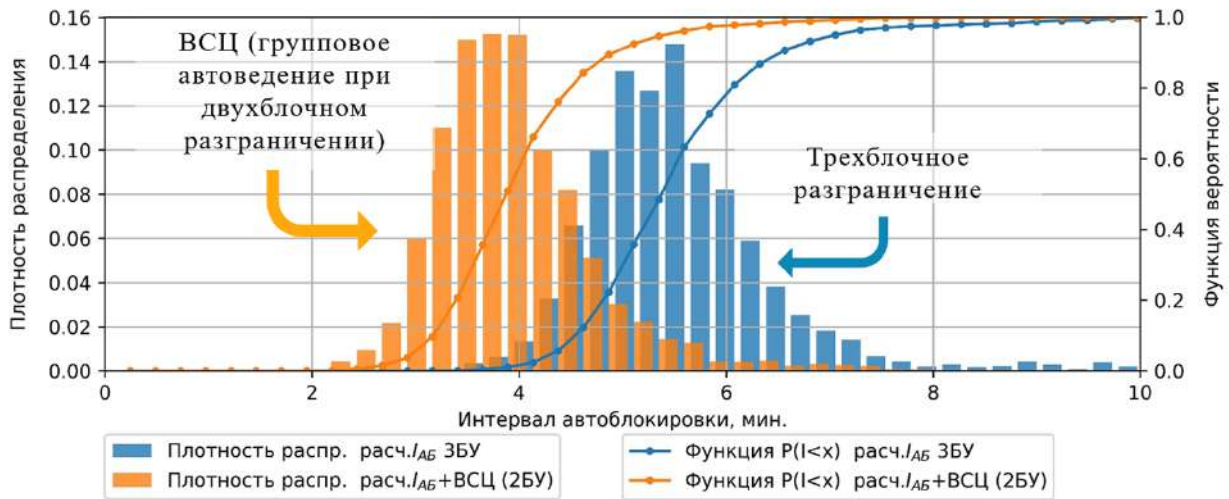
оборудованном трехзначной автоблокировкой, показывают, что даже в проектных решениях длины рельсовых цепей и блок-участков заложены таким образом, что при движении со скоростью согласно тягового расчета допустимый минимальный межпоездной интервал по ходу движения варьируется от 4,5 до 7 минут при движении с трехблочным разграничением (см. рис. 2, а). Групповое автоведение может позволить сократить этот интервал до 3–5 минут.

Следует учитывать, что расчетный межпоездной интервал движения на протяжении всего участка будет определяться наибольшим в процессе движения, поэтому на исследуемом участке его нужно принимать 7 минут для трехблочного разграничения и 5 минут для группового автоведения.

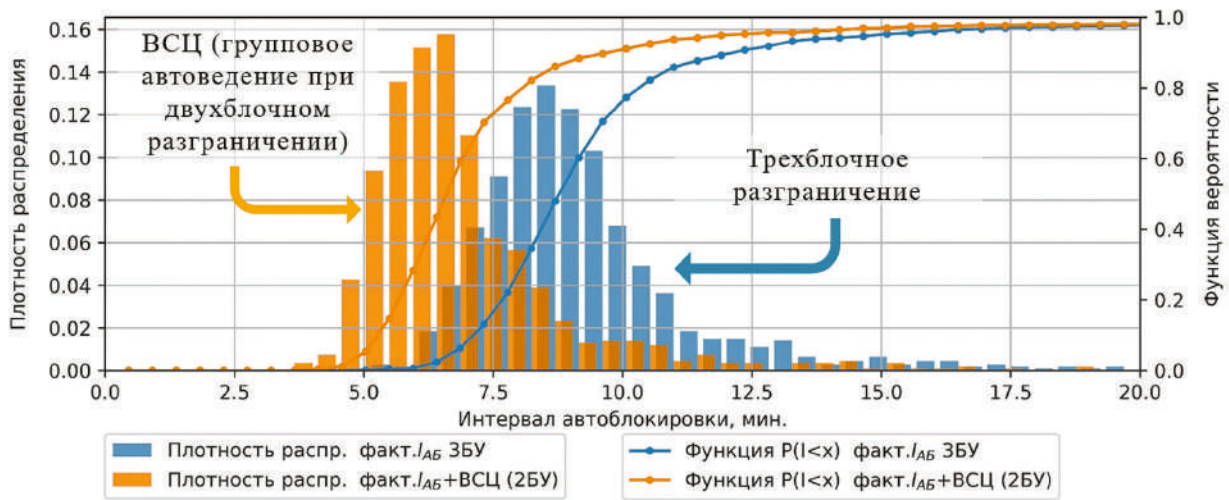
В реальных условиях эксплуатации отказы технических средств, временные ограничения скорости, выполнение регламентных работ, несвоевременное принятие оперативных решений или задержки при выполнении технологических операций приводят к снижению скорости, а значит, к увеличению минимальных межпоездных интервалов. На рис. 2, б видно, что при исследовании движения более 3000 грузовых и пассажирских поездов на участке железной дороги фактический расчетный межпоездной интервал для трехблочного разграничения оказался от 6 до 14, в среднем 9 минут,



**Рис. 1.** Схемы движения поездов на участке трехзначной автоблокировки ( $L$  — межпоездной интервал в метрах,  $L_{бу}$  — длина блок-участка автоблокировки,  $L_{п}$  — длина поезда)



а) минимальный расчетный межпоездной интервал (по тяговому расчету, с учетом длительных ограничений скорости)



б) фактический расчетный межпоездной интервал (с учетом реальной кривой скорости каждого поезда)

**Рис. 2.** Распределения межпоездных интервалов при трехблочном и двухблочном разграничении на участке с трехзначной автоблокировкой

а для двухблочного разграничения от 4 до 11, в среднем 6 минут.

В реальной жизни поезда по технологии ВСЦ движутся совместно с обычными поездами, кроме того, расстояние между виртуально сцепленными поездами настроено с учетом ограничения по энергоснабжению (значительно больше, чем может позволить автоблокировка), что снижает эффект от применения группового автоведения.

На рис. 3 видно, что поезда без автоведения ограничивают скорость всего пакета (средняя скорость на участке протяженностью 140 км

составила всего 56 км/ч). Влияние обозначенных факторов увеличивает межпоездной интервал от 30–40%, что в численном выражении составляет 9–12 минут.

Представленная на рис. 3 реализация движения ВСЦ поездов демонстрирует нерешенную в настоящий момент проблему организации движения таких поездов, что снижает ожидаемый эффект от применения технологии практически до нуля [9]. Однако следует полагать, что после реализации мероприятий, предусмотренных Концепцией внедрения на сети железных дорог комплексной техноло-

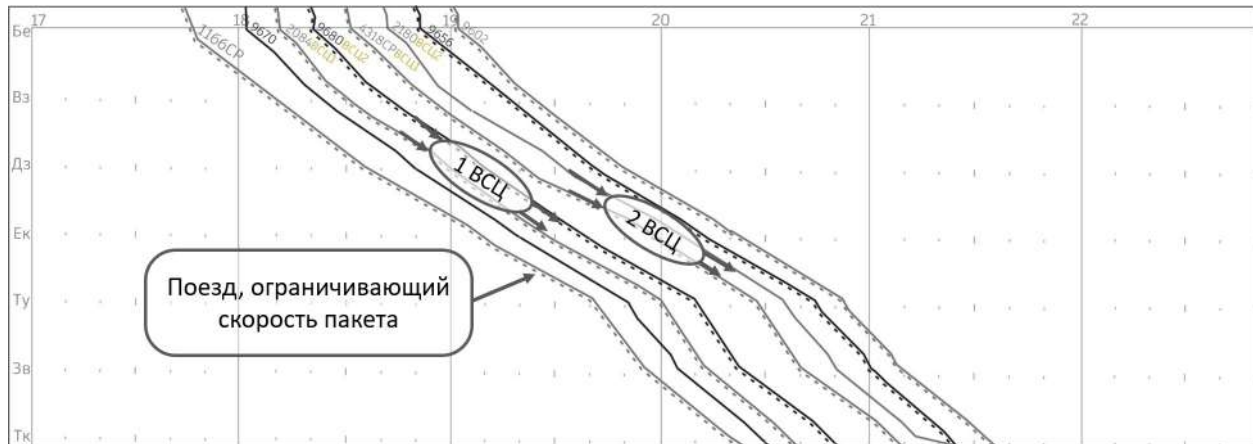


Рис. 3. Фрагмент исполненного графика движения ВСЦ

гии интервального регулирования движения поездов<sup>2</sup> [10], в частности, повышение скорости движения на желтый сигнал светофора до 80 км/ч, переход к групповому автоведению (до 5 поездов) с минимальным интервалом, автоматизация и информационная увязка оперативного планирования с системами автоведения поездов, усиление энергоснабжения, принятие мер к обеспечению отправления поездов с минимальным интервалом [11], движение с расчетным межпоездным интервалом 5 минут достижимо.

Очевидно, что увеличение плотности потока поездов сразу приведет к росту потерь времени в ожидании технологических операций на станциях [12], и это может исключить получение эффекта от мероприятий по совершенствованию СИРДП на участке [13].

## 2. Оценка влияния массового внедрения технологии группового автоведения на время восстановления нормальной работы участка железной дороги после отказа

Наиболее точная и комплексная оценка поездной работы участка при изменении технологии организации движения, в частности, условий работы системы интервального регулирования, может быть получена только имитационным моделированием [14]. Поэтому авторами выполнено исследование работы

участка железной дороги в условиях внедрения группового автоведения, обеспечивающего движение поездов с установленной скоростью и двухблочным разграничением при трехзначной автоблокировке на модели одного из реальных грузонапряженных участков, разработанной в системе макро моделирования транспортных узлов и полигонов ИМЕТРА [15] и валидированной научной школой Козлова Петра Алексеевича.

Система ИМЕТРА опирается на макро-структурный, функциональный подход к моделированию [16, 17], позволяя учитывать технологию работы транспортных систем через представление ее в виде сети каналов и бункеров, взаимодействующих между собой с заданными детерминированными или стохастическими характеристиками.

ИМЕТРА позволяет устанавливать этапность развития транспортной инфраструктуры направлений и полигонов, определять их рациональную технологию работы, производить оценку вариантов реконструкции. По результатам расчетов система выдает широкий набор показателей, представленных в графическом и табличном виде (график загрузки элементов инфраструктуры, график исполненного движения, пропускную способность станций, загрузку парков, горловин, терминалов и задержки из-за них, полный и расчлененный по элементам простой, состояние полигона в любой момент времени и др.).

Модель построена для двухпутного участка протяженностью 400 км, на котором распола-

<sup>2</sup> Концепция внедрения на сети железных дорог комплексной технологии интервального регулирования движения поездов: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 28 сентября 2020 года № 2123/р.

гаются 17 станций, в том числе 2 сортировочные станции, 2 крупные пассажирские станции, 5 участковых станций. Отдельные перегоны имеют третий и четвертый главные пути.

В модели заданы технические характеристики станций с учетом путевого развития парков, специализации и вместимости путей. Станции (парки) поделены на каналы, обеспечивающие учет параллельных технологических операций. Учтены потоки поездов по направлениям с указанием технических характеристик потока (длина составов в четном и нечетном направлениях всех возможных назначений: транзитные, сформированные на дороге и прибывающие в расформирование, внутридорожные и сборные поезда).

Для каждой категории поездопотока задана последовательность операций, моделирующих проследование по перегонам и станциям направления и технологические операции на технических станциях.

За основу взята структура и количественные соотношения существующих поездопотоков, учтены технологические принципы пропуска и обработки поездов для этого участка и станций, принятые в нормативных документах. В частности, учтены операции на станциях, которые могут проводиться с поездами разных категорий (тяжеловесные в нечетном направлении, длинносоставные 100 условных вагонов в четном, поезда нормативного веса и длины). В том числе: операции по расформированию, накоплению, формированию; осмотр, закрепление, раскрепление состава; смена поездного локомотива и локомотивных бригад; опробование тормозов и другие. Движение пассажирских и тяжеловесных поездов было задано расписанием.

Целью имитационного эксперимента в системе ИМЕТРА было определение комплексного эффекта от сокращения межпоездного интервала в пакетах грузовых поездов унифицированной массы и длины с нормативных для заданного участка 8 минут до 5 минут за счет группового автоведения.

Моделирование с реальными размерами и графиком движения пассажирских и тяжеловесных поездов показывает положительный эффект от применения виртуальной сцепки по показателям работы участка, представленным

в табл. 1, но визуально на фрагменте исполненного графика, представленном на рис. 4, а, это сложно заметить. Дело в том, что межпоездной интервал в пакете поездов унифицированной длины снизился значительно (на 37%), но зачастую технологические операции, связанные с обработкой поездов на станциях, не позволяют его использовать.

**Таблица 1. Результат имитационного эксперимента при нормальной работе участка**

Показатель	Интервал СИРДП		Изменение
	8 мин	5 мин	
Участковая скорость, км/ч	27,8	31,4	+ 13 %
Время нахождения на участке, час	10,8	10,1	- 6,5 %
Задержки грузовых поездов (без тяжеловесных), час	617,3	460,9	- 25 %

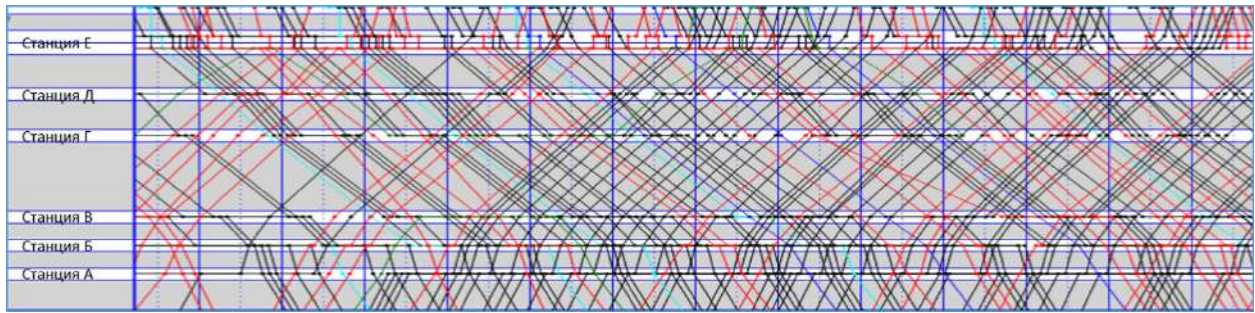
Чтобы разделить причины снижения эффекта новой технологии, необходимо снизить влияние пассажирского движения, ограничивающего уровень пропускной способности. Тогда инфраструктурные ограничения и ограничения технологии выявятся более наглядно.

Для этого из расчетов с 5-минутными интервалами были исключены пассажирские поезда и увеличена доля грузовых унифицированных поездов. На нижнем графике, представленном на рис. 4, б, теперь наглядно видно, как станция А «разрывает» пакеты в четном направлении, а станция Б в нечетном. Это снижает эффект сокращения межпоездного интервала в пакете поездов, следующих в виртуальной сцепке.

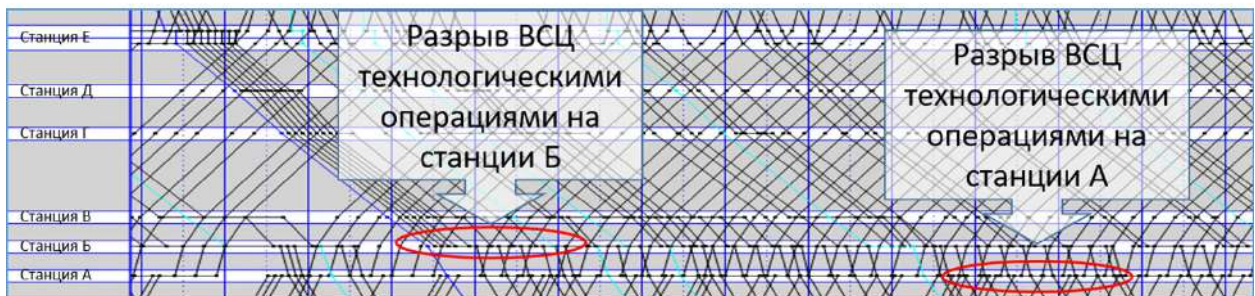
Для оценки влияния перерывов в движении поездов, оказывающих влияние на пропускную способность направления, проведен эксперимент с закрытием одного из перегонов четного направления на 8 часов.

В этом случае, при 8-минутном межпоездном интервале, участок не справился с пропуском заданного потока поездов, что выразилось в невозможности приема поездов для пропуска по участку.

При групповом автоведении (5-минутном интервале СИРДП) с началом окна резко выросли задержки грузовых поездов и снизилось количество сданных четных поездов. После



а) график движения поездов с учетом пассажирских поездов с минимальным интервалом в пакете поездов унифицированной массы 5 минут



б) график исполненного движения с минимальным интервалом в пакете поездов унифицированной массы 5 минут (пассажирские поезда исключены)

**Рис. 4.** Фрагмент графика движения поездов на участке А–К

**Таблица 2.** График изменения показателей работы участка при отказе\*

Показатель / модельные сутки	2 сутки	3 сутки (перерыв в движении)	4 сутки	5 сутки	6 сутки
Время нахождения, час	10,0 →	10,5 ↑	11,7 ↑	10,4 ↓	9,8 →
Задержки грузовых поездов (без тяжеловесных), час	287 →	488 ↑	734 ↑	413 ↓	365 ↓
Сданные четные поезда	134 →	123 ↓	136 ↑	146 ↑	138 →

\* обозначения: → — нормальные среднестатистические значения работы участка, ↑↓ — рост или падение показателя под влиянием отказа и в процессе восстановления движения.

открытия движения началось восстановление нормальной работы участка, но и в этом случае прочие технологические и инфраструктурные ограничения не дают полноценно реализовать 5-минутный межпоездной интервал. Полностью показатели работы участка восстановились через двое суток на третьи, о чем свидетельствуют значения, представленные в табл. 2.

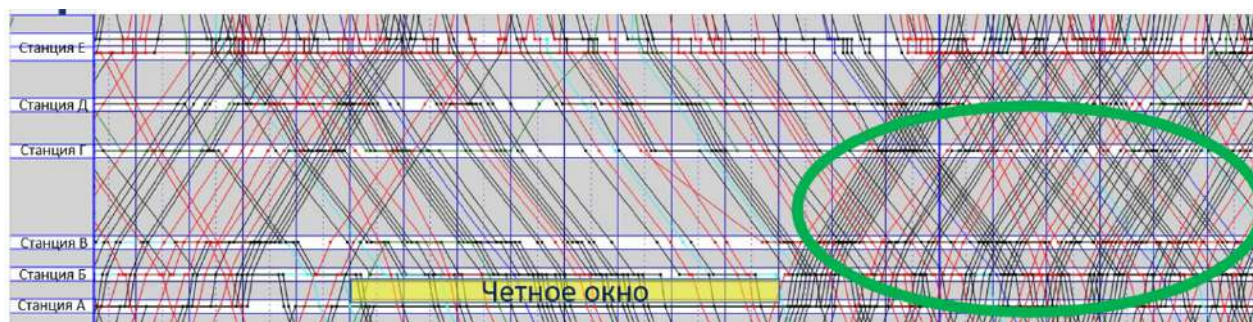
Для углубленного анализа причин медленного восстановления движения рассмотрим показатели «Среднесуточные задержки» из-за элементов инфраструктуры и загрузку этих элементов, отсортированных в порядке убы-

вания загрузки (табл. 3). Из десяти наиболее загруженных элементов семь — это бригады пунктов технического осмотра (ПТО) парков и участковых станций и три из них загружены более чем на 90 %.

Однако существует возможность усиления ПТО дополнительными бригадами, для ускорения выполнения технологических операций и тем самым снять ограничения по этому основанию. Теперь при моделировании без ограничений со стороны ПТО на графике движения поездов, представленном на рис. 5, четко прослеживается сгущение потока грузовых унифицированных поездов и возмож-

**Таблица 3. Среднесуточные задержки и загрузка инфраструктуры для варианта с реальной производительностью ПТО**

Элемент инфраструктуры, как причина задержек	Интервал 5 мин	
	Среднесуточные задержки, час	Загрузка, %
Бриг. ПТО Станция Ж, парк А	103,44	99,0
Бриг. ПТО Станция Ж, парк О	74,23	98,9
Бриг. ПТО Станция Ж, парк Т	93,09	91,5
Пути парка О станции Ж	80,15	89,0
Бриг. ПТО Станция А	51,45	88,7
Пути парка А станции Ж	73,46	82,0
Бриг. ПТО Станция Ж, парк Б	14,77	78,2
Бриг. ПТО Станция Б	12,88	74,3
Бриг. ПТО Станция З	13,41	71,3
Пути парка Т+Г станции Ж	11,47	57,7
Пути станции А	9,44	52,8
Пути станции Б	6,51	44,9
Нечетная горловина станции З	13,75	31,0
Пути парка ПОП станции И	9,68	11,9
Пути станции К	14,52	10,6



**Рис. 5.** Представление результатов моделирования отказа на графике движения поездов путем 8-часового перерыва в четном направлении движения при снятии ограничений по пропуску поездов со стороны ПТО (фрагмент участка А-К)

ность организации движения по виртуальной сцепке в пакетах от 3 до 10 поездов после завершения окна.

В результате показатели работы участка приходят в норму в два раза быстрее, т.е. уже к концу следующих суток влияние перерыва в движении не отражается на показателях работы участка (табл. 4).

Эксперимент со снятием ограничений пропускной способности участка из-за ПТО показывает, на сколько сократились задержки грузовых поездов на оставшихся ограничивающих элементах инфраструктуры (табл. 5). Изменил-

ся и порядок отсортированных по убыванию среднесуточных задержек из-за указанного элемента технического оснащения станций. Следует также обратить внимание, что загрузка элементов, приводящих к наибольшим потерям, теперь невелика.

**Заключение**

Проведенная оценка влияния массового внедрения технологии группового автоведения на время восстановления движения на участке железной дороги после отказов показала следующее.

**Таблица 4. Восстановление работы участка после 8-часового перерыва в движении при использовании ВСЦ с интервалом 5 минут и снятием ограничений пропускной способности ПТО участковых станций**

Показатель	2 сутки	3 сутки (перерыв в движении)	4 сутки	5 сутки	6 сутки
Время нахождения, час	9,3 →	10,2 ↑	9,8 ↓	9,1 →	9,2 →
Задержки грузовых поездов (без тяжеловесных), час	252 →	470 ↑	426 ↓	251 →	252 →
Сданные четные поезда	138 →	124 ↓	158 ↑	140 →	141 →

**Таблица 5. Среднесуточные задержки и загрузка инфраструктуры при снятии ограничений со стороны ПТО**

Элемент инфраструктуры, как причина задержек	Интервал 5 мин	
	Среднесуточные задержки, час	Загрузка, %
<b>Нечетная горловина станции З</b>	<b>12:25</b>	28,4
<b>Четная горловина станции Б</b>	<b>9:19</b>	25,2
<b>Нечетная горловина станции И</b>	<b>9:13</b>	26,1
<b>Нечетная горловина станции А</b>	<b>7:46</b>	36,2
<b>Нечетная горловина станции Е</b>	<b>7:09</b>	28,2
Нечетная горловина парка Т+Г ст. Ж	6:55	22,8
Четная горловина парка станции Е	6:25	29,3
Нечетная горловина станции К	6:24	34,7
Нечетная горловина станции Л	5:50	37,1
Четная горловина станции И	5:31	21,1
Четная горловина станции З	5:10	30,4
Четная горловина станции М	4:36	36,5
Нечетная горловина станции Б	4:35	31,2
Четная горловина станции Н	4:32	37,6
Нечетная горловина парка Г ст. О	4:20	24,3

Групповое автоведение (виртуальная сцепка) позволит в перспективе сократить межпоездной интервал в пакете грузовых поездов до 5–6 минут.

На рассмотренном грузонапряженном участке с коэффициентом использования пропускной способности более 0,8 при возникновении 8-часового окна в одном направлении, например, в результате отказа, недостаточно резервов пропускной способности при существующем нормативном 8-минутном межпоездном интервале и восстановить движение без снижения потока поездов невозможно.

Применение технологии виртуальной сцепки позволяет восстановить движение при заданном потоке поездов за двое суток, при этом основные задержки возникают на ПТО, кото-

рые часто нарушают движение пакетов поездов в виртуальной сцепке, что снижает эффективность применения технологии.

Временное усиление пунктов ПТО дополнительными бригадами с целью снятия ограничения пропускной способности по этой причине позволяет восстановить движение в 2 раза быстрее (за сутки), обеспечив пропуск всего потока поездов. ▲

**Библиографический список**

1. Никитин А.Б., Бушуев С. В. Тенденции развития электрической сигнализации и компьютерных систем оперативного управления движением поездов на станциях // Транспорт Урала. 2006. № 2 (9). С. 14–18. EDN KDMJSH.
2. Оленцевич В.А., Упырь Р.Ю., Антипина А.А. Эффективность внедрения интервального ре-

- гулирования движения поездов по системе «виртуальная сцепка» на участке // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 2 (66). С. 182–189. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2020.2\(66\).182-189](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2020.2(66).182-189). EDN CRLWQS.
3. Климова Е. В., Пилипушка Л. Е., Рябов В. С. Технология «виртуальной сцепки» поездов как инструмент повышения провозной и пропускной способности линии // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2019. Т. 1. С. 60–64. EDN SVYGCE.
  4. Бушуев С. В., Голочалов Н. С. Анализ способов повышения пропускной способности железных дорог // Транспорт Урала. 2023. № 1 (76). С. 42–50. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2023-1-42-50>. EDN QEOLTJ.
  5. Бушуев С. В. Пути повышения провозной способности участков железных дорог // Автоматика на транспорте. 2022. Т. 8, № 4. С. 343–353. <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2022-8-04-343-353>. EDN FICKYY.
  6. ERTMS level 4, train convoys or virtual coupling / Mitchell and et al. // IRSE International Technical Committee — 2016. [Online]. Available: <http://www.irse.org/knowledge/publicdocuments/ITC%20Report%2039.pdf>
  7. Goikoetxea J. Roadmap towards the wireless virtual coupling of trains // International Workshop on Communication Technologies for Vehicles: Springer. 2016. P. 3–9.
  8. Schumann T. Increase of capacity on the shinkansen high-speed line using virtual coupling // International Journal of Transport Development and Integration. 2017. Vol. 1, no. 4. P. 666–676.
  9. Эсаулов В. А. Методы совершенствования технологии пропуска грузовых поездов на грузонапряженном направлении железной дороги: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Эсаулов Вячеслав Александрович, 2023. 138 с. EDN QARDAP.
  10. Комплексная технология интервального регулирования движения поездов / Воронин В. А., Гургенидзе И. Р., Дежков М. А. и др. // М. : АО «Т8 Издательские технологии», 2023. 216 с. ISBN 978-5-521-23792-0. EDN WTZMVC.
  11. Голочалов Н. С. Определение длины разгонного пути // Инновационный транспорт. 2023. № 3 (49). С. 41–47. <https://doi.org/10.20291/2311-164X-2023-3-41-47>. EDN IKCDEC.
  12. Тимухина Е. Н., Пермикин В. Ю., Кашеева Н. В. Метод выявления лимитирующих железнодорожных станций для пропуска тяжеловесных поездов на полигоне дороги // Транспорт Урала. 2017. № 1 (52). С. 40–44. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2017-1-40-44>. EDN YIACXR.
  13. Колокольников В. С., Фалалеева Т. А. Оценка взаимного влияния перерабатывающей способности станции и пропускной способности прилегающего перегона // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2023. № 1 (34). С. 72–78. EDN BDZGOJ.
  14. Козлов П. А. Оптимизация развития транспортных узлов и полигонов на основе имитационного моделирования // Бюллетень ученого совета АО «ИЭРТ». 2023. № 8–2. С. 30–40. EDN GEIEHV.
  15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015662972 Российская Федерация. Система макро моделирования транспортных узлов и полигонов ИМЕТРА: № 2015619807: заявл. 15.10.2015: опубл. 08.12.2015 / П. А. Козлов, И. В. Иванов, В. Ю. Пермикин; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Аналитические и управляющие системы на транспорте «Транспортный алгоритм». EDN NNWIRG.
  16. Козлов П. А., Колокольников В. С. Макроструктурный подход в исследовании железнодорожных станций // Транспорт Урала. 2017. № 2 (53). С. 3–7. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2017-2-3-7>. EDN YUNIJJ.
  17. Слободянюк И. Г. Функциональный подход к моделированию транспортных систем // Транспорт Урала. 2017. № 2 (53). С. 96–101. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2017-2-96-101>. EDN YUNJBR.



TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH. 2024. Vol. 10, no. 1. P. 64–73  
DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-01-64-73

## Restoration of traffic after failures using a virtual train coupling

### Information about authors

**Bushuev S. V.**, PhD in Engineering, Vice-rector for Research Work, Associate Professor<sup>1</sup>. E-mail: sbushuev@usurt.ru

**Kovalev I. A.**, PhD in Engineering, Associate Professor<sup>2</sup>. E-mail: ikovalev@usurt.ru

Ural State University of Railway Transport, Department of Automation, Remote Control and Communications in Railway Transport<sup>1</sup>, Department of Operations Management<sup>2</sup>

**Abstract.** The article examines the influence of group automatic train operation technology (virtual coupling) on accelerating the process of restoring traffic after a failure with a break in traffic on a railway section. Possible train-to-train intervals have been determined: calculated and statistical estimates taking into account real traffic conditions on the section and using virtual coupling technology. At the same time, the influence of energy supply shortage was not considered; it is assumed that in the process of mass implementation of group automatic train operation technology, the energy supply system will be strengthened to ensure the capabilities of automation systems. Simulation modeling of the operation of a railway section in the IMETRA system (macromodeling system for transport junctions and grounds) was carried out in order to comprehensively assess the impact of the introduction of group automatic train operation on the performance of the section in normal operation and after restoration of traffic in the case of a long-term (8 hours) failure of technical means. The possibility of strengthening technical inspection points with additional teams has been considered to speed up the restoration of traffic after failure of technical means.

**Keywords:** railway line capacity, train-to-train interval, headway automatic train control system, virtual coupling, group automatic train operation, IMETRA system, simulation modeling, train schedule.

### References

- Nikitin A. B. Tendencii razvitiya elektricheskoy signalizatsii i komp'yuternykh sistem operativnogo upravleniya dvizheniem poezdov na stantsiyah / A. B. Nikitin, S. V. Bushuev // *Transport Urala*. 2006. № 2 (9). S. 14–18. EDN KDMJSH. (In Russian)
- Olencevich V. A. Effektivnost' vnedreniya interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov po sisteme "virtual'naya scepka" na uchastke / V. A. Olencevich, R. YU. Upry', A. A. Antipina // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie*. 2020. № 2 (66). S. 182–189. DOI 10.26731/1813–9108.2020.2(66).182–189. EDN CRLWQS. (In Russian)
- Klimova E. V. Tekhnologiya "virtual'noj scepki" poezdov kak instrument povysheniya provoznoy i propusknoy sposobnosti linii / E. V. Klimova, L. E. Pilipushka, V. S. Ryabov // *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona*. 2019. T. 1. S. 60–64. EDN SVYGCE. (In Russian)
- Bushuev S. V., Golochalov N. S. Analiz sposobov povysheniya propusknoy sposobnosti zheleznnykh dorog // *Transport Urala*. 2023. № 1 (76). S. 42–50. DOI 10.20291/1815–9400–2023–1–42–50. EDN QEOLTJ. (In Russian)
- Bushuev S. V. Puti povysheniya provoznoy sposobnosti uchastkov zheleznnykh dorog // *Avtomatika na transporte*. 2022. T. 8, № 4. S. 343–353. DOI 10.20295/2412–9186–2022–8–04–343–353. EDN FICKYY. (In Russian)
- ERTMS level 4, train convoys or virtual coupling / Mitchell and et al. // *IRSE International Technical Committee* — 2016. [Online]. Available: <http://www.irse.org/knowledge/publicdocuments/ITC%20Report%2039.pdf>
- Goikoetxea J. Roadmap towards the wireless virtual coupling of trains // *International Workshop on Communication Technologies for Vehicles: Springer*. 2016. P. 3–9.
- Schumann T. Increase of capacity on the shinkansen high-speed line using virtual coupling // *International Journal of Transport Development and Integration*. 2017. Vol. 1, no. 4. P. 666–676.
- Esaulov V. A. Metody sovershenstvovaniya tekhnologii propuska gruzovykh poezdov na gruzonapryazhennom napravlenii zheleznoy dorogi: dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Esaulov Vyacheslav Aleksandrovich, 2023. 138 s. EDN QARDAP. (In Russian)
- Kompleksnaya tekhnologiya interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov. / V. A. Voronin, I. R. Gurgendze, M. A. Dezhkov [i dr.]. — M.: AO «18 Izdatel'skie tekhnologii», 2023. 216 s. ISBN 978–5–521–23792–0. EDN WZMVC. (In Russian)
- Golochalov N. S. Opredelenie dliny razgonnogo puti / N. S. Golochalov // *Innovatsionnyy transport*. 2023. № 3 (49). S. 41–47. DOI 10.20291/2311–164X–2023–3–41–47. EDN IKCDEC. (In Russian)
- Timuhina E. N. Metod vyyavleniya limitiruyushchikh zheleznodorozhnykh stantsiy dlya propuska tyazhelovesnykh poezdov na poligone dorogi / E. N. Timuhina, V. YU. Permikin, N. V. Kashcheeva // *Transport Urala*. 2017. № 1 (52). S. 40–44. DOI 10.20291/1815–9400–2017–1–40–44. EDN YIACXR. (In Russian)
- Kolokol'nikov V. S. Ocenka vzaimnogo vliyaniya pererabatyvayushchey sposobnosti stantsii i propusknoy sposobnosti prilgayushchego pereгона / V. S. Kolokol'nikov, T. A. Falaleeva // *Transport Aziatsko-Tihookeanskogo regiona*. 2023. № 1 (34). S. 72–78. EDN BDZGOJ. (In Russian)
- Kozlov P. A. Optimizatsiya razvitiya transportnykh uzlov i poligonov na osnove imitatsionnogo modelirovaniya / P. A. Kozlov // *Byulleten' uchenogo soveta AO "IERT"*. 2023. № 8–2. S. 30–40. EDN GEIEHV. (In Russian)
- Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2015662972 Rossiyskaya Federatsiya. Sistema makromodelirovaniya transportnykh uzlov i poligonov IMETRA: № 2015619807: zayavl. 15.10.2015: opubl. 08.12.2015 / P. A. Kozlov, I. V. Ivanov, V. YU. Permikin; zayavitel' Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu "Analiticheskie i upravlyayushchie sistemy na transporte "Transportnyy algoritim". EDN NNWIRG. (In Russian)
- Kozlov P. A. Makrostrukturnyy podhod v issledovanii zheleznodorozhnykh stantsiy / P. A. Kozlov, V. S. Kolokol'nikov // *Transport Urala*. 2017. № 2 (53). S. 3–7. DOI 10.20291/1815–9400–2017–2–3–7. EDN YUNIUI. (In Russian)
- Slobodyanyuk I. G. Funktsional'nyy podhod k modelirovaniyu transportnykh sistem / I. G. Slobodyanyuk // *Transport Urala*. 2017. № 2(53). S. 96–101. DOI 10.20291/1815–9400–2017–2–96–101. EDN YUNJBR. (In Russian)

# ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ СИНТЕЗА САМОПРОВЕРЯЕМЫХ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ЛОГИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ СИГНАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЗВЕШЕННЫХ КОДОВ БОУЗА — ЛИНА

**ЕФАНОВ Дмитрий Викторович**, д-р техн. наук, профессор, действительный член Международной Академии транспорта, член Института инженеров электротехники и электроники, профессор<sup>1,3,4</sup>, заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе<sup>2</sup>; e-mail: TrES-4b@yandex.ru  
**ЕЛИНА Есения Игоревна**, аспирант<sup>1</sup>; e-mail: eseniya-elina@mail.ru

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт машиностроения, материалов и транспорта, Высшая школа транспорта, г. Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Научно-исследовательский и проектный институт «Транспортной и строительной безопасности» (ООО «НИПИ «ТрансСтройбезопасность»), г. Санкт-Петербург

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

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

Предложено при синтезе самопроверяемых цифровых устройств на основе логической коррекции сигналов применять взвешенные коды Боуза — Лина, принципы построения которых подразумевают предварительное взвешивание информационных символов натуральными числами. Предложены две базовые структуры для синтеза схем встроенного контроля для групп из шести выходов объекта диагностирования. Структуры основаны на использовании взвешенных кодов Боуза — Лина с суммированием в кольце вычетов по модулю  $M=4$ . Таких помехозащищенных кодов с числом информационных символов  $m=4$  существует 15, что позволяет выбирать в качестве базового кода в схеме встроенного контроля наилучший вариант по различным критериям, в том числе добиваться достижения свойства самопроверяемости даже в случаях, когда этого невозможно получить путем использования традиционных подходов, включая дублирование. Разработаны два алгоритма синтеза схем встроенного контроля на основе логической коррекции сигналов, позволяющие использовать коррекцию только двух из шести функций в базовой структуре. Для базовых структур существует 720 способов построения схемы встроенного контроля на основе логической коррекции сигналов с применением каждого взвешенного кода Боуза — Лина, что дает возможность выбора наилучшего способа реализации самопроверяемого устройства с учетом различных показателей (структурной избыточности, контролепригодности и пр.). Работа алгоритмов продемонстрирована на простых примерах. Приведены результаты экспериментов с тестовыми цифровыми схемами из набора *MCNC Benchmarks*, подтверждающие эффективность разработанных алгоритмов. Показано, что при большом числе выходов существует астрономическое количество способов организации схем встроенного контроля, что дает возможность построения самопроверяемых устройств с различными характеристиками. Логическая коррекция сигналов с применением взвешенных кодов Боуза — Лина может использоваться при разработке и проектировании самопроверяемых цифровых устройств на различной элементной базе.

**Ключевые слова:** тестирование цифровых схем, самопроверяемое устройство, схема встроенного контроля, логическая коррекция сигналов, взвешенный код с суммированием, взвешенный код Боуза — Лина.

DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-01-74-99

## ▼ Введение

Синтезу самопроверяемых цифровых устройств на основе двоичных избыточных кодов посвящено большое число публикаций. В основном рассматривались вопросы синтеза самопроверяемых устройств путем дополнения в схемах встроенного контроля (СВК)

рабочих функций, вычисляемых объектом диагностирования, некоторыми контрольными функциями для последующей проверки корректности вычислений по диагностическому признаку принадлежности формируемых кодовых слов заранее выбранному равномерно-му коду. Исследователями затрагивались как

особенности равномерных кодов, проявляющиеся при синтезе СВК [1–5], так и аспекты синтеза контрольного оборудования (детекторов, кодеров и тестеров кодов) [6–9]. Применение при синтезе СВК подхода, связанного с логической коррекцией сигналов (ЛКС) от объекта диагностирования, освещается в гораздо меньшем числе научных публикаций. Однако, по мнению авторов, ЛКС было уделено недостаточное внимание, поскольку она позволяет проектировщику самопроверяемого устройства получить ряд преимуществ перед традиционным подходом, связанным с дополнением в СВК рабочих функций некоторыми контрольными. Эти преимущества заключаются прежде всего в большей гибкости в обеспечении самопроверяемости структуры синтезируемого устройства и возможности влияния на показатели сложности технической реализации, поскольку в отличие от традиционного подхода ЛКС дает возможность для одного равномерного кода синтезировать большое количество СВК [10–13].

У ЛКС есть свои недостатки, среди которых следует выделить невозможность применения методов синтеза СВК с учетом поиска особых групп выходов по их видам (монотонно независимые или монотонно и асимметрично независимые) и преобразования структур объектов диагностирования в такие, которые будут обладать особыми свойствами (являться единой группой монотонно независимых или монотонно и асимметрично независимых) [14–16]. Такая особенность как раз и связана с применением при ЛКС немонотонного преобразования с использованием сумматоров по модулю  $M=2$ . Однако, как показывают исследования авторов, эффективным оказывается контроль по группам  $H^p$ -независимых выходов ( $p$  — максимальная кратность обнаруживаемых ошибок в группе выходов) и контроль устройств, выходы которых образуют единую  $H^p$ -независимую группу [17].

Можно выделить четыре основных направления исследований ЛКС при синтезе СВК. Первое направление связано с применением при синтезе СВК на основе ЛКС неразделимых кодов и учетом свойств отдельных видов кодов для обнаружения неисправностей, обеспечения тестируемости элементов в СВК и снижения

показателей сложности технической реализации [18, 19]. Второе направление связано с использованием при синтезе СВК на основе ЛКС диагностического признака принадлежности формируемых функций особым классам булевых функций, например самодвойственным [20, 21]. Третье направление связано с изучением особенностей применения разделимых кодов при синтезе СВК на основе ЛКС. Здесь можно отметить одну из первых работ [22]. Внимание именно этому направлению в литературе уделено действительно мало, по всей видимости, по причине недостаточно глубоких исследований способов формирования простых кодов с малой избыточностью и характеристик обнаружения ими ошибок как в информационных символах, так и в символах всего кодового слова. Четвертое направление связано с комбинацией свойств неразделимых и разделимых кодов, а также с контролем принадлежности формируемых в СВК функций к самодвойственным и «близким» к ним классам булевых функций [23, 24].

Настоящая статья посвящена развитию третьего обозначенного направления в исследованиях ЛКС и погружает читателя в особенности использования свойств взвешенных кодов Боуза — Лина для синтеза на их основе СВК.

### **1. Особенности применения двоичных избыточных кодов при синтезе схем встроенного контроля на основе логической коррекции сигналов**

Структура организации СВК на основе ЛКС с применением двоичных избыточных кодов изображена на рис. 1. Объект диагностирования  $F(x)$ , имеющий  $t$  входов и  $n$  выходов и формирующий на каждом  $t$ -разрядном входном булевом векторе  $n$ -разрядный выходной булев вектор, снабжается СВК, состоящей из трех функциональных блоков. Блок коррекции сигналов (БКС) предназначен для преобразования функций, вычисляемых на рабочих выходах объекта диагностирования, в функции  $h_1, h_2, \dots, h_n$ , определяющие символы кодовых слов заранее выбранного двоичного избыточного кода. В качестве элементов преобразования используются двухвходовые сумматоры по модулю  $M=2$  (элементы  $XOR$ ). К первым

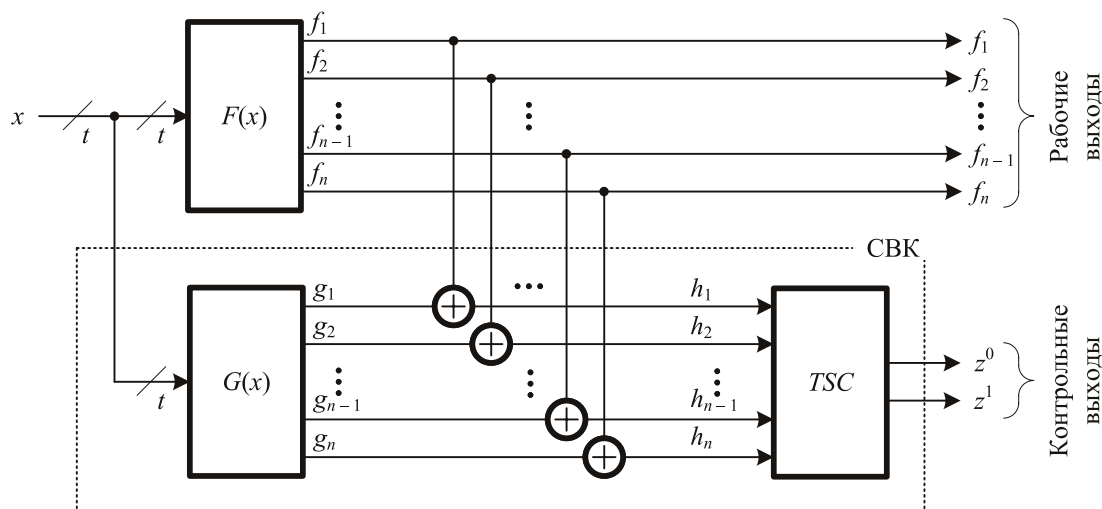


Рис. 1. Структура организации СВК на основе ЛКС

входам элементов  $XOR$  подключены рабочие выходы объекта диагностирования. Ко вторым входам подключены выходы блока  $G(x)$ , представляющего собой блок контрольной логики. Благодаря этому блоку и осуществляется вычисление функций логической коррекции:  $g_i = f_i \oplus h_i, i = 1, n$ . Таким образом, при поступлении входного вектора  $\langle x_i, x_{i-1} \dots x_2, x_1 \rangle$  на выходах БКС формируется вектор  $\langle h_n, h_{n-1} \dots h_2, h_1 \rangle$ , принадлежащий выбранному на этапе проектирования СВК двоичному избыточному коду. Этот контроль осуществляется с помощью самопроверяемого тестера  $TSC$  (*totally self-checking checker*) [1, 6, 7].  $TSC$  имеет два контрольных выхода  $z^0$  и  $z^1$ , на которых формируется парафазный сигнал контроля. При наличии неисправностей в объекте диагностирования или в одном из блоков СВК парафазность выходов  $z^0$  и  $z^1$  нарушается, что свидетельствует о наличии ошибки.

Обратимся именно к ветви теории синтеза СВК на основе ЛКС при использовании двоичных избыточных кодов. Наиболее глубоко исследованы вопросы применения равновесных кодов [25] при синтезе СВК на основе ЛКС. Свойства обнаружения ошибок, а также теория синтеза самопроверяемых тестеров данных кодов на различной элементной базе хорошо изучены, что позволяет эффективно использовать их для построения цифровых устройств.

Множество кодовых слов равновесного кода, или кода « $r$  из  $n$ », образуют все кодовые слова с заданным числом  $n$  символов с одина-

ковым весом  $r$  (с одинаковым числом  $r$  единичных символов). Множество кодовых слов кода « $r$  из  $n$ » образовано  $C_n^r$  кодовыми словами с одинаковым весом. Поэтому среди всего разнообразия видов ошибок с различными кратностями  $d$  такими кодами не обнаруживаются только симметричные ошибки в кодовых словах.

Ошибки в кодовых словах классифицируются на одиночные, монотонные, симметричные и асимметричные [5]. Одиночные ошибки связаны с однократными искажениями. Монотонные ошибки связаны с возникновением искажений только нулевых или только единичных символов в кодовых словах. Симметричные ошибки — это разнонаправленные ошибки четной кратностью  $d$ , в которых число искажений нулевых символов равно числу искажений единичных символов. Асимметричные ошибки — это разнонаправленные ошибки кратностью  $d \geq 3$ , в которых содержится неравное количество искажений нулевых и единичных символов. Различные равновесные коды обладают своими характеристиками обнаружения ошибок. Например, класс кодов «1 из  $n$ » не обнаруживает только двукратные симметричные ошибки, а все остальные их виды обнаруживает [26].

Поскольку свойства равновесных кодов хорошо изучены, в литературе известны методы синтеза самопроверяемых СВК на их основе путем выделения групп независимых и монотонно независимых выходов или преобразо-

вания структур объектов диагностирования в контролепригодные структуры с монотонно независимыми выходами [14]. Однако данные методы напрямую не применимы при синтезе СВК на основе ЛКС, поскольку сама коррекция осуществляется с использованием элементов, реализующих немонотонные функции.

При синтезе СВК на основе ЛКС можно контролировать сразу же все выходы объекта диагностирования с помощью одного равновесного кода, а можно использовать контроль вычислений по группам, применяя базовые структуры СВК для контроля устройств с малым числом выходов (как правило, до 10). Это обусловлено особенностями обеспечения самопроверяемости СВК на основе ЛКС и необходимостью формирования полного теста для элементов преобразования и тестера — равновесные коды с малыми значениями  $n$  имеют более простые тестеры, требующие меньшего количества комбинаций для полной их проверки [6].

В [22] предложено использовать для контроля вычислений на основе ЛКС коды Бергера [27]. При этом рассматривается построение базовой структуры для групп, состоящих из пяти выходов объектов диагностирования — три выхода не преобразуются и формируют информационные символы кода Бергера, а два оставшихся — преобразуются и формируют проверочные символы данного кода. Особенностью именно данного кода Бергера является то, что при числе информационных символов  $m=3$  формируется полное множество контрольных векторов с  $k=2$  проверочными символами, что позволяет обеспечивать полную проверку тестера. Более того, тестер данного кода Бергера имеет довольно простую структуру — он состоит из полного сумматора *FA* (*full-adder*) и модуля сжатия парафазных сигналов *TRC* (*two-rail checker*) [28]. Кодами Бергера, также как и равновесными кодами, не обнаруживаются только симметричные ошибки в информационных векторах. Однако, как показано в [29], ими могут не обнаруживаться ошибки любых видов и кратностей во всех символах кодовых слов. Поэтому при синтезе самопроверяемых СВК на основе данных кодов также нельзя использовать широко известные методы, подразумевающие контроль

вычислений по группам монотонно и группам монотонно и асимметрично независимых выходов.

В [30] учтена особенность кода Бергера, состоящая в том, что при условии  $m \neq 2^j - 1$ ,  $j \in \mathbb{N}$ ,  $j \geq 2$  не формируется полное множество контрольных векторов с  $k$  проверочными символами, и предложено использовать модульные коды с суммированием для синтеза СВК для устройств с произвольным количеством выходов. При построении данных кодов устанавливается модуль  $M \in \{2^1, 2^2, \dots, 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}\}$ , а затем осуществляется суммирование единичных разрядов в кольце вычетов по заданному модулю. Число проверочных символов у модульного кода с суммированием определяется величиной  $k = \log_2 M$ . Поэтому среди множества выходов объекта диагностирования выделяется  $k$  выходов, участвующих в формировании проверочных символов, которые получают при использовании логического преобразования в СВК, а оставшиеся  $n-k$  выходов определяют число информационных символов кода. Свойства модульных кодов с суммированием схожи со свойствами кодов Бергера, однако ими не обнаруживается большее количество ошибок в информационных векторах. Во всех символах кодовых слов ими не обнаруживается такое же количество ошибок, что и у кодов Бергера с тем же значением  $m$ , а в классе обнаруживаемых оказываются монотонные, симметричные и асимметричные ошибки [31]. Отметим также, что могут рассматриваться коды с суммированием в кольце вычетов по произвольному значению  $M \in \{2, 3, \dots, m+1\}$ .

Существует большое разнообразие модификаций кодов с суммированием, которые могут эффективно применяться при синтезе СВК на основе ЛКС. Рассмотрим применение взвешенных кодов с суммированием с числом информационных символов  $m=4$  и модулем  $M=4$ , которые могут применяться при синтезе СВК на основе ЛКС с контролем групп, состоящих из шести выходов объекта диагностирования. Поскольку модульные коды с суммированием единичных разрядов при  $M=4$ , 8 и 12 принято называть кодами Боуза — Лина [32], рассматриваемые взвешенные коды отнесем к классу так называемых взвешенных кодов Боуза — Лина.

## 2. Взвешенные коды Боуза — Лина

Взвешенные коды Боуза — Лина могут быть построены на основе принципа установления неравноправия между информационными символами путем их взвешивания [33]. Информационные символы из вектора  $\langle f_4 f_3 f_2 f_1 \rangle$  взвешиваются при этом весовыми коэффициентами  $[w_4, w_3, w_2, w_1]$   $w_i \in \mathbb{N}, i = 1, 4$ . Затем определяется сумма весовых коэффициентов единичных информационных символов в кольце вычетов по модулю  $M=4$ :

$$W_4 = W \pmod{4} = \left( \sum_{i=1}^{m=4} f_i w_i \right) \pmod{4}.$$

Далее число  $W_4$  представляется в двоичном виде и записывается в разряды контрольного вектора.

Обозначим взвешенные коды Боуза — Лина как  $WS4(4, 2)$  коды (*weight-based sum codes*), где числа в скобках обозначают количество информационных и проверочных символов. Отдельно будем указывать массив весовых коэффициентов  $[w_4, w_3, w_2, w_1]$ .

Весовые коэффициенты из массива  $[w_4, w_3, w_2, w_1]$  могут быть произвольными натуральными числами. Но поскольку вычисления производятся в кольце вычетов по модулю  $M=4$ , то только часть сочетаний значений весовых коэффициентов даст разнообразные по своим характеристикам коды. Весовые коэффициенты каждого информационного символа могут быть выбраны из множества  $\{1, 2, 3\}$ . Большие значения весовых коэффициентов не будут давать «новых» по характеристикам кодов. Взвешивание какого-либо информационного символа числом 0 не будет давать при построении помехозащищенного  $WS4(4, 2)$  кода, что даст эффективное его использование только в некоторых частных случаях.

Всего существует  $3^4=81$  вариант взвешивания информационных символов для построения взвешенного кода Боуза — Лина со значением  $m=4$ . Если рассматривать полное множество информационных векторов, то характеристики обнаружения ошибок будут определяться исключительно сочетанием значений весовых коэффициентов, а не их местоположением в массиве информационных векторов. Это дает возможность построения всего 15 помехозащищенных разнообразных  $WS4(4, 2)$

кодов со следующими массивами весовых коэффициентов [34]:  $[1, 1, 1, 1]$ ,  $[1, 1, 1, 2]$ ,  $[1, 1, 1, 3]$ ,  $[1, 1, 2, 2]$ ,  $[1, 1, 2, 3]$ ,  $[1, 1, 3, 3]$ ,  $[1, 2, 2, 2]$ ,  $[1, 2, 2, 3]$ ,  $[1, 2, 3, 3]$ ,  $[1, 3, 3, 3]$ ,  $[2, 2, 2, 2]$ ,  $[2, 2, 2, 3]$ ,  $[2, 2, 3, 3]$ ,  $[2, 3, 3, 3]$ ,  $[3, 3, 3, 3]$ . Первый из представленных массивов даст классический код Боуза — Лина.

В табл. 1 приведены характеристики обнаружения ошибок кодами Боуза — Лина, которые необходимо учитывать при синтезе СВК на основе ЛКС. Каждому  $WS4(4, 2)$  коду присвоены номера — римскими цифрами по мере возрастания весовых коэффициентов и увеличения их значений. Для каждого кода указано распределение необнаруживаемых ошибок в кодовых словах в виде:  $Nv_{[w_4, w_3, w_2, w_1]} = Nv_d + N\sigma_d + N\alpha_d$ , где  $N$  — число необнаруживаемых ошибок:  $v$  — всего в кодовых словах,  $v_d$  — число монотонных необнаруживаемых ошибок кратностью  $d$ ,  $\sigma_d$  — число симметричных необнаруживаемых ошибок кратностью  $d$ ,  $\alpha_d$  — число асимметричных необнаруживаемых ошибок кратностью  $d$ .

Следует отметить такие важные факторы. Для каждого  $WS4(4, 2)$  кода имеется свой код с отличными от других характеристиками сложности реализации, что определяется значениями весовых коэффициентов. У каждого  $WS4(4, 2)$  кода имеется своя классификация информационных векторов по одинаковым контрольным векторам. К примеру, в табл. 2 приведена такая классификация для кода с номером II. Такая классификация является основополагающей при синтезе СВК на основе ЛКС, поскольку требуется выбирать способ доопределения на каждой входной комбинации  $\langle x_i x_{i-1} \dots x_2 x_1 \rangle$  на выходах БКС вектора  $\langle h_6 h_5 \dots h_2 h_1 \rangle$ . Число способов доопределения разнообразно и зависит от проектировщика СВК. При этом могут использоваться специальные алгоритмы для доопределения.

Классификация информационных векторов по одинаковым контрольным векторам однозначно определяет характеристики обнаружения ошибок в информационных символах при безошибочности проверочных символов. Минимальное их общее количество достигается при равномерном распределении информационных векторов между всеми контрольными векторами. Исследования показывают,

**Таблица 1. Характеристика обнаружения ошибок в кодовых словах WS4(4, 2) кодами**

Номер кода	Массив весовых коэффициентов	Формула необнаруживаемых ошибок в кодовом слове
I	[1, 1, 1, 1]	$240v_{[1,1,1,1]} = 32u_2 + 48\sigma_2 + 36u_3 + 44\alpha_3 + 2u_4 + 6\sigma_4 + 32\alpha_4 + 8u_5 + 32\alpha_5$
II	[1, 1, 1, 2]	$240v_{[1,1,1,2]} = 32u_2 + 32\sigma_2 + 24u_3 + 72\alpha_3 + 6u_4 + 18\sigma_4 + 24\alpha_4 + 4u_5 + 28\alpha_5$
III	[1, 1, 1, 3]	$240v_{[1,1,1,3]} = 48u_2 + 32\sigma_2 + 20u_3 + 60\alpha_3 + 6u_4 + 18\sigma_4 + 16\alpha_4 + 4u_5 + 36\alpha_5$
IV	[1, 1, 2, 2]	$240v_{[1,1,2,2]} = 40u_2 + 32\sigma_2 + 12u_3 + 60\alpha_3 + 12u_4 + 24\sigma_4 + 36\alpha_4 + 2u_5 + 22\alpha_5$
V	[1, 1, 2, 3]	$240v_{[1,1,2,3]} = 44u_2 + 20\sigma_2 + 16u_3 + 80\alpha_3 + 20u_4 + 28\sigma_4 + 16\alpha_4 + 2u_5 + 4\sigma_5 + 10\alpha_5$
VI	[1, 1, 3, 3]	$240v_{[1,1,3,3]} = 48u_2 + 32\sigma_2 + 20u_3 + 60\alpha_3 + 6u_4 + 18\sigma_4 + 16\alpha_4 + 4u_5 + 36\alpha_5$
VII	[1, 2, 2, 2]	$240v_{[1,2,2,2]} = 64u_2 + 48\sigma_2 + 28u_4 + 36\sigma_4 + 48\alpha_4 + 2u_5 + 14\alpha_5$
VIII	[1, 2, 2, 3]	$240v_{[1,2,2,3]} = 40u_2 + 32\sigma_2 + 12u_3 + 60\alpha_3 + 12u_4 + 24\sigma_4 + 36\alpha_4 + 2u_5 + 22\alpha_5$
IX	[1, 2, 3, 3]	$240v_{[1,2,3,3]} = 32u_2 + 32\sigma_2 + 24u_3 + 72\alpha_3 + 6u_4 + 18\sigma_4 + 24\alpha_4 + 4u_5 + 28\alpha_5$
X	[1, 3, 3, 3]	$240v_{[1,3,3,3]} = 32u_2 + 48\sigma_2 + 36u_3 + 44\alpha_3 + 2u_4 + 6\sigma_4 + 32\alpha_4 + 8u_5 + 32\alpha_5$
XI	[2, 2, 2, 2]	$240v_{[2,2,2,2]} = 80u_2 + 80\sigma_2 + 10u_4 + 30\sigma_4 + 40\alpha_4$
XII	[2, 2, 2, 3]	$240v_{[2,2,2,3]} = 48u_2 + 48\sigma_2 + 32u_3 + 32\alpha_3 + 2u_4 + 6\sigma_4 + 8\alpha_4 + 8u_5 + 56\alpha_5$
XIII	[2, 2, 3, 3]	$240v_{[2,2,3,3]} = 24u_2 + 48\sigma_2 + 36u_3 + 36\alpha_3 + 36\sigma_4 + 36\alpha_4 + 6u_5 + 18\alpha_5$
XIV	[2, 3, 3, 3]	$240v_{[2,3,3,3]} = 4u_2 + 60\sigma_2 + 48u_3 + 48\alpha_3 + 4u_4 + 60\sigma_4 + 2u_5 + 12\sigma_5 + 2\alpha_5$
XV	[3, 3, 3, 3]	$240v_{[3,3,3,3]} = 80\sigma_2 + 20u_3 + 60\alpha_3 + 10u_4 + 30\sigma_4 + 40\alpha_5$

что если все весовые коэффициенты являются нечетными числами, то такое распределение оказывается неравномерным. Если хотя бы один весовой коэффициент взвешен четным числом, то распределение оказывается равномерным. Указанное обстоятельство влияет на алгоритмы доопределения в СВК функций логической коррекции сигналов.

**3. Построение схемы встроенного контроля на основе логической коррекции сигналов при преобразовании только выходов, формирующих проверочные символы кода**

На рис. 2 приведена базовая структура организации СВК на основе ЛКС с применением WS4(4, 2) кода при преобразовании только тех выходов объекта диагностирования, которые участвуют в формировании проверочных символов.

Значения информационных символов в структуре рис. 2 вычисляются объектом диагностирования без преобразования в БКС:  $h_3=f_3, h_4=f_4, h_5=f_5, h_6=f_6$ . Тогда каждому информационному вектору в СВК должен соответствовать единственный контрольный вектор, который можно однозначно доопределить на каждой входной комбинации.

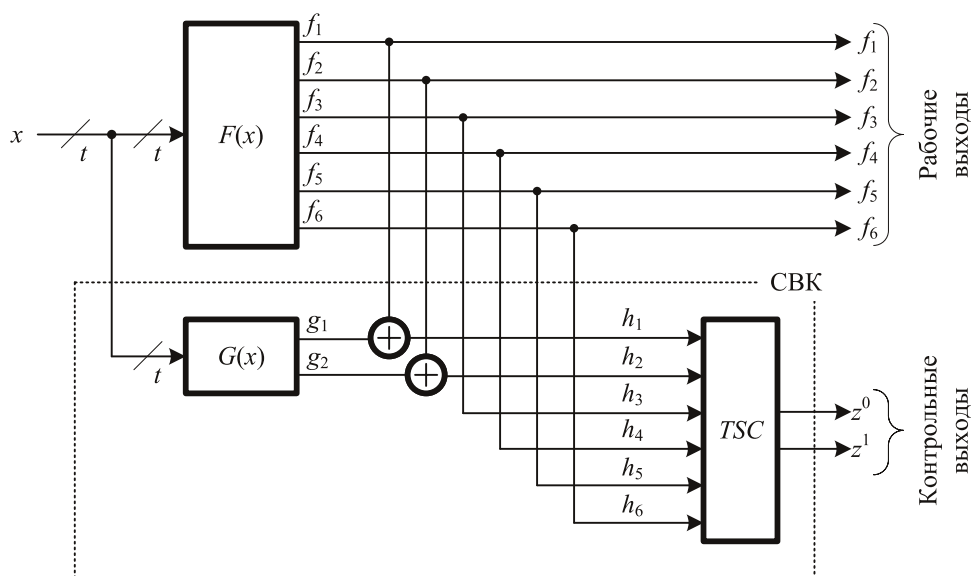
**Таблица 2. Классификация информационных векторов по одинаковым контрольным векторам для кода с номером II**

$W_4$			
0	1	2	3
Контрольные векторы			
00	01	10	11
Информационные векторы			
0000	0010	0001	0011
0111	0100	0110	0101
1011	1000	1010	1001
1101	1111	1100	1110

При синтезе СВК требуется обеспечить выполнение следующих условий:

1. Должно формироваться множество проверочных комбинаций для тестера WS4(4, 2) кода, что связано с необходимостью подачи на его входы полного множества контрольных векторов хотя бы единожды (см. табл. 2).
2. Должно формироваться множество проверочных комбинаций для элементов преобразования, которое содержит все четыре комбинации {00, 01, 10, 11} при его канонической реализации [35].

С учетом этих условий и синтезируется СВК.



**Рис. 2.** Структура организации СВК с преобразованием части рабочих функций в функции, описывающие проверочные символы заданного кода

Существует  $C_6^2 = 15$  способов выбора преобразуемых функций среди всех рабочих функций объекта диагностирования. Далее выходы в информационном векторе могут быть расставлены  $P_4 = 24$  вариантами, а в контрольном —  $P_2 = 2$  вариантами. Итого общее количество способов построения СВК на основе ЛКС с применением  $WS4(4, 2)$  кода равно  $C_6^2 P_4 P_2 = 15 \cdot 24 \cdot 2 = 720$ .

Такая вариативность позволяет синтезировать большое количество СВК на основе ЛКС с применением базовой структуры рис. 2, среди которых можно выбрать те, которые будут давать структуры с наименьшими показателями сложности реализации при обеспечении самопроверяемости всех компонентов.

**Алгоритм 1.** Правила синтеза СВК на основе ЛКС с применением  $WS4(4, 2)$  кода при преобразовании только тех рабочих функций, которые описывают проверочные символы кода:

1. Выделяем выходы объекта диагностирования, формирующие информационные и проверочные символы  $WS4(4, 2)$  кода в СВК.
2. Выполняем проверку формирования для двух преобразуемых функций объекта диагностирования хотя бы на двух наборах 0 и на двух 1 (это необходимо для формирования проверочных комбинаций элементов XOR).

3. Вычисляем функции, описывающие информационные символы:  $h_3 = f_3$ ,  $h_4 = f_4$ ,  $h_5 = f_5$ ,  $h_6 = f_6$ .
4. Однозначно по информационным векторам на каждой входной комбинации  $\langle x_t, x_{t-1}, \dots, x_2, x_1 \rangle$  доопределяем разряды  $h_1$  и  $h_2$ .
5. Вычисляем функции  $g_1$  и  $g_2$ :  $g_2 = f_2 \oplus h_2$ ,  $g_1 = f_1 \oplus h_1$ .
6. Проверяем формирование полного множества комбинаций для проверки тестера: {00, 01, 10, 11}.
7. Проверяем формирование полного теста для элементов преобразования: {00, 01, 10, 11}.
8. Оптимизируем функции  $g_2$  и  $g_1$ .
9. Синтезируем блок  $G(x)$  в выбранном элементном базисе.

Покажем работу представленного алгоритма на примере синтеза СВК для устройства, описываемого таблицей истинности (табл. 3).

Будем синтезировать СВК непосредственно по структуре рис. 2 и в качестве преобразуемых выберем функции  $f_2$  и  $f_1$ . Процесс доопределения иллюстрируется табл. 4.

Табл. 4 заполнена с учетом табл. 2. Из анализа столбцов для  $g_2$  и  $g_1$  ясно, что полный тест для тестера формируется. Из анализа столбцов  $XOR_2$  и  $XOR_1$  ясно, что формируется и полный тест для элементов преобразования.



**Таблица 3. Таблица истинности комбинационного устройства**

№	$x_4$	$x_3$	$x_2$	$x_1$	$f_6$	$f_5$	$f_4$	$f_3$	$f_2$	$f_1$
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1
2	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1
3	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0
4	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0
5	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1
6	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0
7	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0
8	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0
9	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0
10	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1
11	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0
13	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0
14	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0
15	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0

**Таблица 4. Сигналы на выходах  $F(x)$  и линиях СВК при использовании алгоритма 1 и кода № II**

№	$x_4$	$x_3$	$x_2$	$x_1$	$f_6$	$f_5$	$f_4$	$f_3$	$f_2$	$f_1$	$h_6$	$h_5$	$h_4$	$h_3$	$h_2$	$h_1$	$g_2$	$g_1$	$XOR_2$	$XOR_1$
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	10	01
1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	01	10
2	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	00	11
3	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	11	00
4	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	10	00
5	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	01	11
6	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	01	01
7	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	01	00
8	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	11	01
9	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	01	01
10	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	11	10
11	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	11	10
12	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	00	00
13	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	10	01
14	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	01	01
15	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	00	01

Далее выписываются разрешенные наборы для функций  $g_2$  и  $g_1$ :

$$g_2 = \{1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 14\};$$

$$g_1 = \{0, 2, 5, 6, 8, 9, 13, 14, 15\}.$$

Затем синтезируется СВК в выбранном элементном базисе.

Для примера синтезируем самопроверяемое устройство по структуре рис. 2 и определим показатели сложности его технической реализации в условных единицах библиотеки функциональных элементов *stdcell2\_2.genlib* с помощью *SIS* [36, 37].

Блок  $F(x)$  синтезирован без оптимизации структуры. Сложность его реализации оценивается величиной  $L_{F(x)}=1200$  (усл. ед.). Блок  $G(x)$  синтезирован после оптимизации функций  $g_2$  и  $g_1$  с помощью процедуры *full\_simplify*. Его сложность равна  $L_{G(x)}=320$  (усл. ед.).

Показатель сложности реализации устройства с СВК определяется по формуле:

$$L_{CED} = L_{F(x)} + L_{G(x)} + 2L_{XOR} + L_{G(f)} + L_{TRC} + 2L_{NOT}, \quad (1)$$

где  $L_{CED}$  — показатель сложности реализации устройства с СВК<sup>1</sup>,  $L_{XOR}=40$  — показатель сложности одного элемента преобразования,  $L_{NOT}=16$  — показатель сложности инвертора в  $TSC^2$ ,  $L_{G(f)}=216$  — показатель сложности кодера в  $TSC$ ,  $L_{TRC}=192$  — показатель сложности  $TRC$  в  $TSC$ .

По формуле (1) имеем:

$$L_{CED} = 1200 + 320 + 2 \cdot 40 + 216 + 192 + 2 \cdot 16 = 2040.$$

Сравним с дублированием.

Для структуры дублирования формула вычисления показателя сложности имеет следующий вид:

$$L_D = 2L_{F(x)} + nL_{NOT} + (n-1)L_{TRC}, \quad (2)$$

где  $n$  — число выходов устройства  $F(x)$ .

По формуле (2) имеем:

$$L_D = 2 \cdot 1200 + 6 \cdot 16 + (6-1) \cdot 192 = 3456.$$

Показатель  $\delta$  дает представление об эффективности синтезируемого устройства по предложенному методу в сравнении с использованием метода дублирования:

$$\delta = \frac{L_{CED}}{L_D} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Вычислим показатель  $\delta$  для рассматриваемого примера:

<sup>1</sup> Устройство с СВК в англоязычных источниках часто определяют как *CED System — concurrent error-detection system*. Отсюда нижний индекс у показателя сложности технической реализации устройства с СВК.

<sup>2</sup> Строго говоря, два инвертора устанавливаются либо на выходах  $G(x)$ , либо на выходах  $G(f)$  для работы в парафазной логике элемента сравнения  $TRC$ .

$$\delta = \frac{2040}{3456} \cdot 100\% = 59,028\%.$$

Показатель структурной избыточности самопроверяемого устройства, синтезированного по алгоритму 1, составляет менее 60% от показателя структурной избыточности системы дублирования.

#### 4. Построение схемы встроенного контроля на основе логической коррекции сигналов при преобразовании части выходов, которые формируют информационные символы кода

На рис. 3 приведена базовая структура организации СВК на основе ЛКС с применением  $WS4(4, 2)$  кода при преобразовании части выходов объекта диагностирования, которые участвуют в формировании информационных символов.

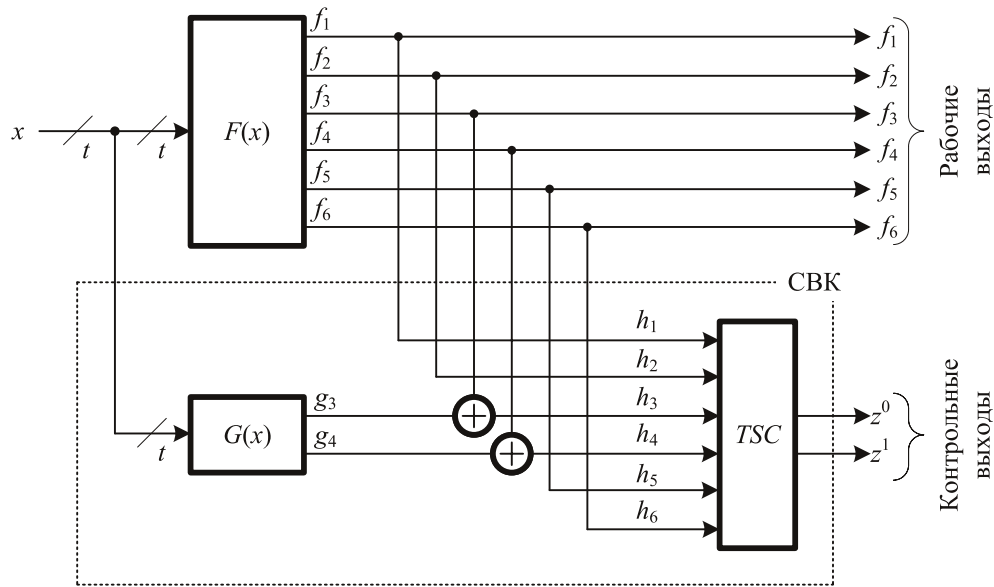
Особенностью распределения информационных векторов между контрольными векторами для рассматриваемого  $WS4(4, 2)$  кода № II является следующее свойство.

**Утверждение 1.** Для каждого контрольного вектора существует ровно по одному информационному вектору вида  $\langle 00xx \rangle$ ,  $\langle 01xx \rangle$ ,  $\langle 10xx \rangle$ ,  $\langle 11xx \rangle$ ,  $x \in \{0, 1\}$ .

Это свойство рассматриваемого  $WS4(4, 2)$  кода можно использовать при синтезе СВК при преобразовании только части рабочих функций, участвующих в формировании информационного вектора.

**Утверждение 2.** Функции, описывающие старшие разряды в информационном векторе, могут напрямую вычисляться объектом диагностирования.

**Доказательство.** Обратимся к табл. 1. Для построения самопроверяемой СВК потребуется формирование хотя бы по разу контрольных векторов  $\langle h_2 h_1 \rangle = \langle 00 \rangle$ ,  $\langle 01 \rangle$ ,  $\langle 10 \rangle$ ,  $\langle 11 \rangle$ . Положим, информационный вектор выглядит следующим образом:  $\langle h_6 h_5 h_4 h_3 \rangle$ . Покажем, что можно доопределить функции, описывающие старшие разряды информационного вектора, так:  $h_6 = f_6$  и  $h_5 = f_5$ . В каждом столбце табл. 1 для функций  $h_6$  и  $h_5$  присутствует и 0, и 1, а значит, такое доопределение возможно всегда. ■



**Рис. 3.** Структура организации СВК с преобразованием части рабочих функций в функции, описывающие проверочные символы заданного кода

**Алгоритм 2.** Правила синтеза СВК на основе ЛКС с применением WS4(4, 2) кода при преобразовании двух рабочих функций, которые описывают информационные символы кода:

1. Выделяем выходы объекта диагностирования, формирующие информационные и проверочные символы WS4(4, 2) кода в СВК.
2. Вычисляем функции, описывающие проверочные символы:  $h_2=f_2, h_1=f_1$ .
3. Вычисляем функции, описывающие старшие разряды информационного вектора:  $h_6=f_6, h_5=f_5$ .
4. Однозначно по контрольным векторам и старшим разрядам информационного вектора на каждой входной комбинации  $\langle x_i, x_{i-1}, \dots, x_2, x_1 \rangle$  доопределяем разряды  $h_4$  и  $h_3$ .
5. Вычисляем функции  $g_4$  и  $g_3$ :  $g_4 = f_4 \oplus h_4, g_3 = f_3 \oplus h_3$ .
6. Проверяем формирование полного множества комбинаций для проверки теста: {00, 01, 10, 11}.
7. Проверяем формирование полного теста для элементов преобразования: {00, 01, 10, 11}.
8. Оптимизируем функции  $g_2$  и  $g_1$ .
9. Синтезируем блок  $G(x)$  в выбранном элементном базисе.

Для функций вычисления значений разрядов  $h_4$  и  $h_3$  нетрудно получить функцио-

нальную зависимость. Для этого рассмотрим таблицу кодовых слов WS4(4, 2) кода (табл. 5). В ней кодовые слова расположены в лексикографическом порядке, а каждому кодовому слову соответствует десятичный номер, соответствующий двоичному числу, записанному в информационном векторе.

Для получения функций, описывающих информационные символы  $h_4$  и  $h_3$ , поменяем местами столбцы  $h_4$  и  $h_3$  и  $h_2$  и  $h_1$  и поменяем строки

**Таблица 5.** Кодовые слова WS4(4, 2) кода

№	$h_6$	$h_5$	$h_4$	$h_3$	$h_2$	$h_1$
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1	0
2	0	0	1	0	0	1
3	0	0	1	1	1	1
4	0	1	0	0	0	1
5	0	1	0	1	1	1
6	0	1	1	0	1	0
7	0	1	1	1	0	0
8	1	0	0	0	0	1
9	1	0	0	1	1	1
10	1	0	1	0	1	0
11	1	0	1	1	0	0
12	1	1	0	0	1	0
13	1	1	0	1	0	0
14	1	1	1	0	1	1
15	1	1	1	1	0	1

так, чтобы номера соответствовали двоичным числам, записанным в векторах  $\langle h_6 h_5 h_2 h_1 \rangle$  (табл. 6).

**Таблица 6. Таблица истинности функций  $h_4$  и  $h_3$**

№	$h_6$	$h_5$	$h_2$	$h_1$	$h_4$	$h_3$
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1	0
2	0	0	1	0	0	1
3	0	0	1	1	1	1
4	0	1	0	0	1	1
5	0	1	0	1	0	0
6	0	1	1	0	1	0
7	0	1	1	1	0	1
8	1	0	0	0	1	1
9	1	0	0	1	0	0
10	1	0	1	0	1	0
11	1	0	1	1	0	1
12	1	1	0	0	0	1
13	1	1	0	1	1	1
14	1	1	1	0	0	0
15	1	1	1	1	1	0

Используем метод Карно для получения логических выражений, описывающих функции  $h_4$  и  $h_3$  [38]. Получаем следующие функции, описывающие «недостающие» информационные символы:

$$\begin{aligned}
 h_4 &= \overline{h_6} \overline{h_5} h_1 \vee \overline{h_6} h_5 \overline{h_1} \vee h_6 h_5 h_1 \vee h_6 \overline{h_5} \overline{h_1} = \\
 &= \overline{h_6} (\overline{h_5} h_1 \vee h_5 \overline{h_1}) \vee h_6 (h_5 h_1 \vee \overline{h_5} \overline{h_1}) = \\
 &= h_6 \oplus h_5 \oplus h_1;
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 h_3 &= \overline{h_6} \overline{h_5} h_2 \vee \overline{h_6} h_5 h_1 \vee \overline{h_6} h_2 h_1 \vee h_5 \overline{h_2} \overline{h_1} \vee h_6 h_5 \overline{h_2} \vee h_6 \overline{h_2} \overline{h_1} = \\
 &= \overline{h_6} \overline{h_5} h_2 \vee h_6 h_5 \overline{h_2} \vee h_2 h_1 (\overline{h_5} \vee \overline{h_6}) \vee \overline{h_2} \overline{h_1} (h_5 \vee h_6) = \\
 &= h_2 (\overline{h_6} \overline{h_5} \vee h_1 (\overline{h_5} \vee \overline{h_6})) \vee \overline{h_2} (h_6 h_5 \vee \overline{h_1} (h_5 \vee h_6)).
 \end{aligned} \tag{5}$$

Применяя (4) и (5), можно автоматически доопределить значения функций логической коррекции сигналов  $g_4$  и  $g_3$ .

Аналогично рассмотренному выше примеру с доопределением функций логической кор-

рекции сигналов для алгоритма 1, выполним те же процедуры для использования алгоритма 2 (табл. 7).

Проверочные комбинации для тестера и элементов преобразования формируются.

Выпишем разрешенные наборы для функций  $g_4$  и  $g_3$ :

$$\begin{aligned}
 g_4 &= \{0, 2, 5, 6, 8, 9, 13, 14, 15\}; \\
 g_3 &= \{1, 2, 3, 7, 10, 11\}.
 \end{aligned}$$

Далее СВК синтезируется в выбранном элементном базисе.

Используя *SIS* и библиотеку *stdcell2\_2.genlib*, синтезируем СВК и оценим показатели сложности ее реализации.

Блок  $G(x)$  синтезирован после оптимизации функций  $g_4$  и  $g_3$  с помощью процедуры *full\_simplify*. Его сложность определяется величиной  $L_{G(x)} = 240$  (усл. ед.). Используем формулу (1) для определения показателя структурной избыточности самопроверяемого устройства:

$$L_{CED} = 1200 + 240 + 2 \cdot 40 + 216 + 192 + 2 \cdot 16 = 1960.$$

По формуле (3) определим показатель  $\delta$  для рассматриваемого примера:

$$\delta = \frac{1960}{3456} \cdot 100 \% = 56,713 \%$$

В данном примере получено еще большее уменьшение показателя структурной избыточности самопроверяемого устройства по сравнению с дублированием, чем в предыдущем.

Могут рассматриваться и другие алгоритмы синтеза СВК: например, связанные с преобразованием всех рабочих функций от объекта диагностирования [39].

### 5. Эксперименты с тестовыми схемами

Для проверки эффективности предлагаемых способов синтеза СВК был проведен ряд экспериментов с тестовыми комбинационными схемами из набора *MCNC Benchmarks* [40, 41]. В ходе экспериментов оценивались показатели структурной избыточности и тестопригодности элементов СВК.

Тестовые схемы из набора *MCNC Benchmarks* имеют различные параметры. Обозначим число входов схемы, как и ранее, через  $t$ , а число выходов — через  $n$ .

Таблица 7. Сигналы на выходах  $F(x)$  и линиях СВК

№	$x_4$	$x_3$	$x_2$	$x_1$	$f_6$	$f_5$	$f_4$	$f_3$	$f_2$	$f_1$	$h_6$	$h_5$	$h_4$	$h_3$	$h_2$	$h_1$	$g_4$	$g_3$	$XOR_4$	$XOR_3$
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	11	10
1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	00	11
2	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	11	11
3	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	00	01
4	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	10	00
5	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	11	00
6	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	01	10
7	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	10	01
8	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	01	00
9	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	01	10
10	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	00	01
11	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	10	11
12	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	10	10
13	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	11	00
14	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	01	10
15	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	11	00

Приведенные выше алгоритмы синтеза СВК основаны на использовании  $WS4(4, 2)$  кода № II и подразумевают контроль вычислений в группе из 6 выходов. Поэтому при синтезе СВК для схем с произвольным числом выходов требуется предварительно выделить контролируемые группы. Число способов их выделения велико. Среди  $n$  выходов можно в качестве первой группы выделить выходы  $C_n^6$  вариантами. Среди оставшихся выходов —  $C_{n-6}^6$  вариантами и т. д. Общее же число вариантов выбора групп определяется величиной<sup>3</sup>

$$N = \prod_{j=1}^{\lfloor \frac{n}{6} \rfloor - 1} C_{n-6(j-1)}^6 \quad (6)$$

К примеру, при  $n=15$  формула (6) дает следующее число вариантов выбора групп:

$$N = \prod_{j=1}^{\lfloor \frac{15}{6} \rfloor - 1} C_{15-6(j-1)}^6 = \prod_{j=1}^2 C_{15-6(j-1)}^6 = C_{15}^6 C_{11}^6 = 2\,312\,310.$$

<sup>3</sup> Следует отметить, что представленная формула дает возможность определения общего количества вариантов выбора групп по принципу «минимум выделенных групп для покрытия всех выходов». Другими словами, не учтено возможное повторное использование выходов в разных группах, что может быть сделано из соображений повышения обнаруживающих характеристик метода.

Кроме того, в каждой выделенной группе можно, как было показано выше, синтезировать СВК  $C_6^2 P_4 P_2 = 15 \cdot 24 \cdot 2 = 720$  способами. Тогда с учетом (6) имеем следующее количество способов синтеза СВК с выделением групп по 6 выходов по 1 и 2 алгоритмам соответственно:

$$N_{CED}^I = N_{CED}^{II} = C_6^2 P_4 P_2 \prod_{j=1}^{\lfloor \frac{n}{6} \rfloor - 1} C_{n-6(j-1)}^6 = 720 \cdot \prod_{j=1}^{\lfloor \frac{n}{6} \rfloor - 1} C_{n-6(j-1)}^6 \quad (7)$$

Для рассмотренного выше примера с  $n=15$  формула (7) дает соответственно  $N_{CED}^I = 720 \cdot 2\,312\,310 = 1\,664\,863\,200$ . Это число астрономическое, поэтому в ходе эксперимента был использован следующий алгоритм синтеза СВК для тестовых схем.

**Алгоритм 3.** Последовательность синтеза СВК на основе ЛКС с применением  $WS4(4, 2)$  кода на основе базовых алгоритмов:

1. Для рассматриваемой тестовой схемы выделяем последовательно в соответствии с описанием схемы группы по 6 выходов, причем если  $n \pmod 6 = 0$ , то выделяем ровно  $\lfloor \frac{n}{6} \rfloor$  групп по 6 выходов; если  $n \pmod 6 = r, r \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ , то выделяем  $\lfloor \frac{n}{6} \rfloor$  групп по 6 выходов и одну

группу, в которую включаем  $s$  оставшихся выходов и  $6-s$  выходов, расположенных рядом в описании. Таким образом, выделяется  $\lceil \frac{n}{6} \rceil$  групп по 6 выходов.

2. Для каждой из  $\lceil \frac{n}{6} \rceil$  групп синтезируем СВК с использованием базовой структуры рис. 2 по алгоритму 1 и отдельно с использованием базовой структуры рис. 3 по алгоритму 2.
3. Выходы полученных СВК объединяем на входах самопроверяемого компаратора, реализованного на основе  $\lceil \frac{n}{6} \rceil - 1$  модуля сжатия паразитных сигналов *TRC*.

Пользуясь алгоритмом 3, реализуем СВК для ряда тестовых схем из набора *MCNC Benchmarks*. Используем исключительно *WS4(4, 2)* код № II и базовые алгоритмы 1 и 2. При синтезе устройств используем тот же подход, что и в описаниях примеров в предыдущих разделах, интерпретатор *SIS* и библиотеку функциональных элементов *stdcell2\_2.genlib*. При этом блок  $F(x)$  (тестовая схема) синтезировалась без оптимизации структуры. Блоки же контрольной логики каждой СВК объединены и синтезированы совместно при оптимизации процедурой *full\_simplify*. Остальные элементы СВК являются типовыми.

В табл. 8 и 9, а также на рис. 4 и 5 приведены результаты экспериментов для 21 тестовой схемы. В последних двух графах табл. 8 и 9 приведены относительные показатели сложности реализации устройств с СВК — показатель  $\delta$ , рассчитанный по формуле (3), и показатель  $\gamma$ , рассчитанный по формуле:

$$\gamma = \frac{L_{G(x)}}{L_{F(x)}} \cdot 100\%. \quad (8)$$

По показателю  $\delta$  можно судить об эффективности реализации по сравнению со стандартным методом дублирования. При использовании алгоритма 1 в качестве базового для

19 из 21 схемы получают более эффективные по показателю  $\delta$  структуры устройств. Причем для 10 схем получено улучшение более чем на 25%. В среднем для всех схем получен показатель  $\delta_{cp} = 78,079\%$ . При использовании алгоритма 2 в качестве базового для 18 из 21 схемы получают более эффективные по показателю  $\delta$  структуры устройств. Причем, так же как и для алгоритма 1, для 10 схем получено улучшение более чем на 25%. В среднем для всех схем получен показатель  $\delta_{cp} = 78,948\%$ . В целом оба алгоритма дают соизмеримые по показателю  $\delta$  структуры для каждой тестовой схемы. Разброс в значениях для всех схем, кроме *newcpla1*, не превышает  $\pm 5\%$ . Однако среди представленных вариантов синтеза устройств можно выбрать наилучший по показателю  $\delta$ .

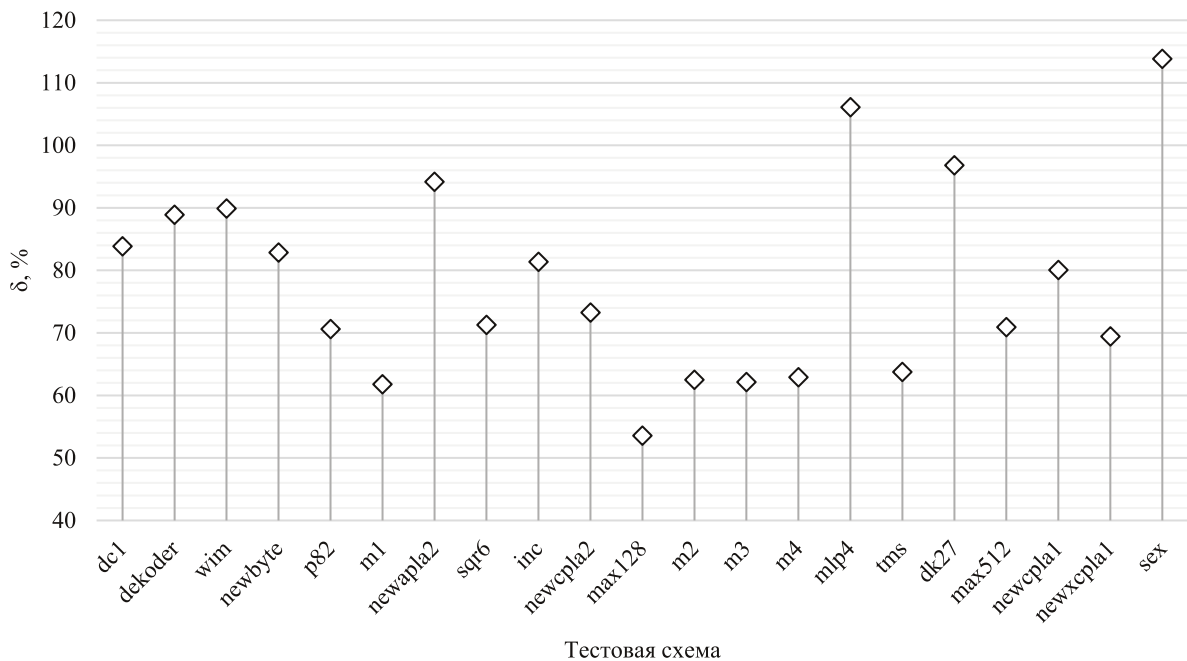
Показатель  $\gamma$  введен здесь для того, чтобы учесть вклад в общее значение абсолютного показателя сложности реализации устройства блока контрольной логики  $G(x)$ . Остальные составляющие каждой СВК типовые, естественно, влияют на сложность реализации, но при довольно сложных блоках  $G(x)$  значения  $\delta$  становятся близкими к 100% и превышающими данный порог. К примеру, при значениях  $\gamma < 100\%$  при использовании обоих алгоритмов синтеза СВК в качестве базовых получены значения  $\delta < 100\%$ . Только в тех случаях, когда  $\gamma > 100\%$ , и показатель  $\delta > 100\%$ . Это говорит о весомом влиянии на показатели сложности реализации всего устройства показателя для  $G(x)$ .

Из сравнения рис. 4 и 5 следует, что характер величин  $\delta$  для одинаковых схем при использовании разных алгоритмов синтеза СВК схож.

Опишем далее результаты экспериментов характеристик тестопригодности элементов СВК. В табл. 10 и 11 приведены данные о числе комбинаций, на которых формируются все возможные контрольные векторы для *WS4(4, 2)* кода № II для каждой контролируемой группы выходов.

**Таблица 8. Результаты экспериментов по использованию в качестве базового алгоритма 1 при синтезе СВК**

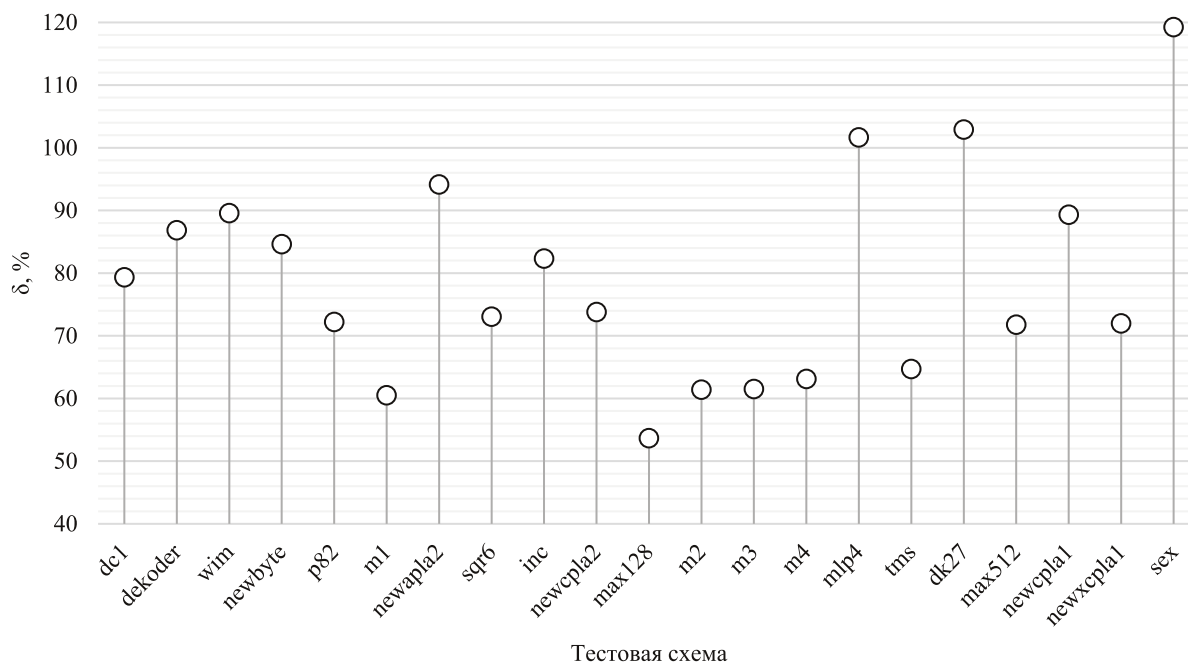
№	Схема	$t$	$n$	$q$	$L_{F(x)}$ усл. ед.	$L_{G(x)}$ усл. ед.	$L_{CED}$ усл. ед.	$L_{D'}$ усл. ед.	$\gamma, \%$	$\delta, \%$
1	dc1	4	7	2	976	488	2696	3216	50	83,831
2	dekoder	4	7	2	736	464	2432	2736	63,043	88,889
3	wim	4	7	2	712	472	2416	2688	66,292	89,881
4	newbyte	5	8	2	592	376	2200	2656	63,514	82,831
5	p82	5	14	3	2368	952	5264	7456	40,203	70,601
6	m1	6	12	2	3064	912	5208	8432	29,765	61,765
7	newapla2	6	7	2	600	488	2320	2464	81,333	94,156
8	sqr6	6	12	2	2648	1536	5416	7600	58,006	71,263
9	inc	7	9	2	2376	1624	5232	6432	68,35	81,343
10	newcpla2	7	10	2	1896	1032	4160	5680	54,43	73,239
11	max128	7	24	4	20192	1352	24200	45184	6,696	53,559
12	m2	8	16	3	10096	2536	14576	23328	25,119	62,483
13	m3	8	16	3	13464	3272	18680	30064	24,302	62,134
14	m4	8	16	3	18704	4848	25496	40544	25,92	62,885
15	mlp4	8	8	2	7224	8432	16888	15920	116,722	106,08
16	tms	8	16	3	6784	1920	10648	16704	28,302	63,745
17	dk27	9	9	2	528	888	2648	2736	168,182	96,784
18	max512	9	6	1	9632	4256	14408	20320	44,186	70,906
19	newcpla1	9	16	3	2520	2080	6544	8176	82,54	80,039
20	newxcpla1	9	23	4	3760	1992	8408	12112	52,979	69,419
21	sex	9	14	3	1360	2888	6192	5440	212,353	113,824
Среднее									64,868	78,079



**Рис. 4.** Графическое представление показателя  $\delta$  для тестовых схем при использовании в качестве базового алгоритма 1 при синтезе СВК

**Таблица 9. Результаты экспериментов по использованию в качестве базового алгоритма 2 при синтезе СВК**

№	Схема	$t$	$n$	$q$	$L_{F(x)}$ усл. ед.	$L_{G(x)}$ усл. ед.	$L_{CED}$ усл. ед.	$L_{D}$ усл. ед.	$\gamma, \%$	$\delta, \%$
1	dc1	4	7	2	976	344	2552	3216	35,246	79,353
2	dekoder	4	7	2	736	408	2376	2736	55,435	86,842
3	wim	4	7	2	712	464	2408	2688	65,169	89,583
4	newbyte	5	8	2	592	424	2248	2656	71,622	84,639
5	p82	5	14	3	2368	1072	5384	7456	45,27	72,21
6	m1	6	12	2	3064	808	5104	8432	26,371	60,531
7	newapla2	6	7	2	600	488	2320	2464	81,333	94,156
8	sqr6	6	12	2	2648	1672	5552	7600	63,142	73,053
9	inc	7	9	2	2376	1688	5296	6432	71,044	82,338
10	newcpla2	7	10	2	1896	1064	4192	5680	56,118	73,803
11	max128	7	24	4	20192	1408	24256	45184	6,973	53,683
12	m2	8	16	3	10096	2288	14328	23328	22,662	61,42
13	m3	8	16	3	13464	3088	18496	30064	22,935	61,522
14	m4	8	16	3	18704	4944	25592	40544	26,433	63,122
15	mlp4	8	8	2	7224	7728	16184	15920	106,977	101,658
16	tms	8	16	3	6784	2080	10808	16704	30,66	64,703
17	dk27	9	9	2	528	1056	2816	2736	200	102,924
18	max512	9	6	1	9632	4432	14584	20320	46,013	71,772
19	newcpla1	9	16	3	2520	2840	7304	8176	112,698	89,335
20	newxcpla1	9	23	4	3760	2304	8720	12112	61,277	71,995
21	sex	9	14	3	1360	3184	6488	5440	234,118	119,265
Среднее									68,643	78,948



**Рис. 5.** Графическое представление показателя  $\delta$  для тестовых схем в качестве базового алгоритма 2 при синтезе СВК



Таблица 10. Число контрольных векторов, поступающих на тестеры в СВК, синтезированных с применением алгоритма 1

№	Схема	Группа 1 — TSC <sub>1</sub>						Группа 2 — TSC <sub>2</sub>						Группа 3 — TSC <sub>3</sub>						Группа 4 — TSC <sub>4</sub>				
		Контрольные векторы						Контрольные векторы						Контрольные векторы						Контрольные векторы				
		00	01	10	11	00	01	10	11	00	01	10	11	00	01	10	11	00	01	10	11	00	01	10
1	dc1	11	4	1	0	11	2	0	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	decoder	4	2	5	5	6	7	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	wim	8	3	0	5	3	4	4	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	newbyte	28	3	1	0	28	3	1	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	p82	18	8	3	3	27	1	0	4	28	3	1	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	m1	51	4	7	2	32	25	0	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	newapla2	60	3	1	0	60	3	1	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	sqrb	12	20	20	12	23	13	15	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	inc	58	34	26	10	43	27	37	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	newcpla2	106	17	4	1	73	55	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	max128	77	44	0	7	81	4	33	10	83	32	12	1	73	55	0	0	-	-	-	-	-	-	-
12	m2	210	15	20	11	181	38	15	22	160	95	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	m3	191	20	30	15	158	47	22	29	128	117	0	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	m4	138	40	49	29	57	111	32	56	12	202	0	42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	mip4	79	55	65	57	93	56	59	48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	tms	184	37	25	10	196	57	0	3	165	20	59	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	dk27	304	80	64	64	80	304	32	96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	max512	117	160	121	114	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	newcpla1	258	226	14	14	278	52	110	72	262	20	0	230	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	newxcpla1	42	74	394	2	410	98	2	2	80	80	328	24	20	356	132	4	-	-	-	-	-	-	-
21	sex	176	244	88	4	47	110	255	100	207	126	159	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Таблица 1 1. Число контрольных векторов, поступающих на тестеры в СВК, синтезированных с применением алгоритма 2**

№	Схема	Группа 1 — TSC <sub>1</sub>						Группа 2 — TSC <sub>2</sub>						Группа 3 — TSC <sub>3</sub>						Группа 4 — TSC <sub>4</sub>					
		Контрольные векторы						Контрольные векторы						Контрольные векторы						Контрольные векторы					
		00	01	10	11	00	01	10	11	00	01	10	11	00	01	10	11	00	01	10	11				
1	dc1	6	2	1	7	6	4	2	4	2	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
2	decoder	2	2	1	11	3	7	1	5	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
3	wim	0	2	3	11	0	2	2	12	2	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
4	newbyte	30	1	1	0	30	1	1	0	1	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
5	p82	17	4	7	4	14	5	5	8	5	8	25	0	1	6	-	-	-	-	-	-				
6	m1	35	14	10	5	35	6	8	15	6	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
7	newapla2	62	1	1	0	62	1	1	0	1	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
8	sqg6	32	32	0	0	20	16	16	12	16	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
9	inc	80	20	24	4	68	20	40	0	20	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
10	newcpla2	76	12	33	7	114	0	10	4	0	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
11	max128	76	12	33	7	120	0	7	1	0	1	59	0	36	33	114	0	10	10	4	4				
12	m2	172	39	26	19	254	1	0	1	0	1	169	12	18	57	-	-	-	-	-	-				
13	m3	146	51	32	27	251	4	0	1	0	1	139	15	23	79	-	-	-	-	-	-				
14	m4	43	115	54	44	239	13	2	2	2	2	33	31	45	147	-	-	-	-	-	-				
15	mlp4	128	32	64	32	80	56	64	56	64	56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
16	tms	218	1	37	0	162	2	20	72	20	72	163	12	7	74	-	-	-	-	-	-				
17	dk27	120	128	136	128	368	128	16	0	16	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
18	max512	109	120	138	145	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
19	newcpla1	391	103	9	9	417	72	23	0	23	0	432	64	16	0	-	-	-	-	-	-				
20	newxcpla1	492	4	16	0	24	8	40	440	40	440	32	0	468	12	504	4	4	4	0	0				
21	sex	320	64	128	0	200	0	184	128	0	128	116	244	140	12	-	-	-	-	-	-				

Таблица 12. Число тестовых комбинаций для элементов преобразования в СВК, синтезированных с применением алгоритма 1

№	Схема	Группа 1					Группа 2					Группа 3					Группа 4				
		XOR	Тестовые комбинации				XOR	Тестовые комбинации				XOR	Тестовые комбинации				XOR	Тестовые комбинации			
			00	01	10	11		00	01	10	11		00	01	10	11		00	01	10	11
1	dc1	XOR <sub>4</sub>	8	0	1	7	XOR <sub>5</sub>	8	1	5	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		XOR <sub>3</sub>	6	1	3	6	XOR <sub>4</sub>	8	0	5	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	dekoder	XOR <sub>4</sub>	1	3	7	5	XOR <sub>5</sub>	7	3	0	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		XOR <sub>3</sub>	2	1	6	7	XOR <sub>4</sub>	2	2	6	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	wim	XOR <sub>4</sub>	2	0	5	9	XOR <sub>5</sub>	2	0	9	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		XOR <sub>3</sub>	1	2	6	7	XOR <sub>4</sub>	1	1	8	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	newbyte	XOR <sub>4</sub>	30	1	0	1	XOR <sub>6</sub>	30	1	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		XOR <sub>3</sub>	28	3	0	1	XOR <sub>5</sub>	28	3	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	p82	XOR <sub>4</sub>	20	1	5	6	XOR <sub>10</sub>	18	1	3	10	XOR <sub>12</sub>	25	0	1	6	-	-	-	-	
		XOR <sub>3</sub>	16	8	3	5	XOR <sub>9</sub>	16	3	2	11	XOR <sub>11</sub>	24	2	1	5	-	-	-	-	
6	m1	XOR <sub>4</sub>	44	5	4	11	XOR <sub>10</sub>	39	2	5	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		XOR <sub>3</sub>	41	4	2	17	XOR <sub>9</sub>	32	11	21	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7	newapla2	XOR <sub>4</sub>	62	1	0	1	XOR <sub>5</sub>	62	1	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		XOR <sub>3</sub>	60	3	0	1	XOR <sub>4</sub>	60	3	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
8	sqr6	XOR <sub>4</sub>	32	32	0	0	XOR <sub>10</sub>	24	14	14	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		XOR <sub>3</sub>	16	16	16	16	XOR <sub>9</sub>	22	14	12	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
9	inc	XOR <sub>4</sub>	68	32	4	24	XOR <sub>7</sub>	52	36	22	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		XOR <sub>3</sub>	73	31	13	11	XOR <sub>6</sub>	60	48	0	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
10	newcpla2	XOR <sub>4</sub>	88	0	5	35	XOR <sub>7</sub>	114	0	0	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		XOR <sub>3</sub>	98	11	7	12	XOR <sub>6</sub>	69	55	0	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
11	max128	XOR <sub>4</sub>	88	0	7	33	XOR <sub>10</sub>	77	43	0	8	XOR <sub>16</sub>	47	12	1	68	XOR <sub>22</sub>	114	0	14	
		XOR <sub>3</sub>	77	32	19	0	XOR <sub>9</sub>	113	14	0	1	XOR <sub>15</sub>	62	33	0	33	XOR <sub>21</sub>	69	55	0	

Продолжение табл. 12

№	Схема	Группа 1						Группа 2						Группа 3						Группа 4					
		XOR	Тестовые комбинации			XOR	Тестовые комбинации			XOR	Тестовые комбинации			XOR	Тестовые комбинации			XOR			Тестовые комбинации				
			00	01	10		11	00	01		10	11	00		01	10	11	00	01	10	11				
12	m2	XOR <sub>4</sub>	194	17	14	31	XOR <sub>10</sub>	218	37	0	1	XOR <sub>14</sub>	181	0	1	74	-	-	-	-	-	-	-		
		XOR <sub>3</sub>	184	14	12	46	XOR <sub>9</sub>	195	59	1	1	XOR <sub>13</sub>	160	27	69	0	-	-	-	-	-	-	-		
13	m3	XOR <sub>4</sub>	172	25	20	39	XOR <sub>10</sub>	204	51	0	1	XOR <sub>14</sub>	154	0	11	91	-	-	-	-	-	-	-		
		XOR <sub>3</sub>	162	16	19	59	XOR <sub>9</sub>	175	76	0	5	XOR <sub>13</sub>	128	34	94	0	-	-	-	-	-	-	-		
14	m4	XOR <sub>4</sub>	112	46	32	66	XOR <sub>10</sub>	166	86	2	2	XOR <sub>14</sub>	45	19	23	169	-	-	-	-	-	-	-		
		XOR <sub>3</sub>	61	36	33	126	XOR <sub>9</sub>	85	156	11	4	XOR <sub>13</sub>	8	70	174	4	-	-	-	-	-	-	-		
15	mlp4	XOR <sub>4</sub>	86	74	48	48	XOR <sub>6</sub>	85	51	56	64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		XOR <sub>3</sub>	114	78	34	30	XOR <sub>5</sub>	91	53	51	61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
16	tms	XOR <sub>4</sub>	185	34	1	36	XOR <sub>10</sub>	164	0	3	89	XOR <sub>14</sub>	163	12	59	22	-	-	-	-	-	-	-		
		XOR <sub>3</sub>	208	47	0	1	XOR <sub>9</sub>	166	16	44	30	XOR <sub>13</sub>	166	4	28	58	-	-	-	-	-	-	-		
17	dk27	XOR <sub>4</sub>	184	64	64	200	XOR <sub>7</sub>	368	128	0	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		XOR <sub>3</sub>	176	80	64	192	XOR <sub>6</sub>	80	304	96	32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
18	max512	XOR <sub>4</sub>	111	118	117	166	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		XOR <sub>3</sub>	117	130	144	121	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
19	newcpla1	XOR <sub>4</sub>	466	28	0	18	XOR <sub>10</sub>	307	182	0	23	XOR <sub>14</sub>	270	226	4	12	-	-	-	-	-	-	-		
		XOR <sub>3</sub>	270	130	110	2	XOR <sub>9</sub>	352	88	36	36	XOR <sub>13</sub>	262	186	64	0	-	-	-	-	-	-	-		
20	newxcpla1	XOR <sub>4</sub>	100	396	0	16	XOR <sub>10</sub>	28	4	0	480	XOR <sub>16</sub>	32	0	352	128	XOR <sub>21</sub>	372	136	0	4	4			
		XOR <sub>3</sub>	436	72	4	0	XOR <sub>9</sub>	60	4	96	352	XOR <sub>15</sub>	400	100	4	8	XOR <sub>20</sub>	152	356	4	0	0			
21	sex	XOR <sub>4</sub>	324	60	32	96	XOR <sub>10</sub>	63	137	218	94	XOR <sub>14</sub>	248	112	67	85	-	-	-	-	-	-	-		
		XOR <sub>3</sub>	264	184	64	0	XOR <sub>9</sub>	246	138	72	56	XOR <sub>13</sub>	164	92	54	202	-	-	-	-	-	-	-		

**Примечание.** Индексы элементов XOR соответствуют номеру преобразуемого выхода в описании тестовой схемы.

Таблица 13. Число тестовых комбинаций для элементов преобразования в СВК, синтезированных с применением алгоритма 2

№	Схема	Группа 1				Группа 2				Группа 3				Группа 4					
		XOR	Тестовые комбинации			XOR	Тестовые комбинации			XOR	Тестовые комбинации			XOR	Тестовые комбинации				
			00	01	10		11	00	01		10	11	00		01	10	11	00	01
1	dc1	XOR <sub>4</sub>	7	2	2	5	XOR <sub>5</sub>	8	1	5	2	-	-	-	-	-	-	-	-
		XOR <sub>3</sub>	6	4	1	5	XOR <sub>4</sub>	9	0	2	5	-	-	-	-	-	-	-	-
2	decoder	XOR <sub>4</sub>	2	1	6	7	XOR <sub>5</sub>	1	1	7	7	-	-	-	-	-	-	-	-
		XOR <sub>3</sub>	5	5	3	3	XOR <sub>4</sub>	1	2	7	6	-	-	-	-	-	-	-	-
3	wim	XOR <sub>4</sub>	4	6	3	3	XOR <sub>5</sub>	0	4	9	3	-	-	-	-	-	-	-	-
		XOR <sub>3</sub>	2	0	6	8	XOR <sub>4</sub>	8	2	1	5	-	-	-	-	-	-	-	-
4	newbyte	XOR <sub>4</sub>	28	3	0	1	XOR <sub>6</sub>	28	3	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-
		XOR <sub>3</sub>	28	3	0	1	XOR <sub>5</sub>	28	3	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-
5	p82	XOR <sub>4</sub>	19	11	0	2	XOR <sub>10</sub>	16	9	2	5	XOR <sub>12</sub>	24	7	1	0	-	-	-
		XOR <sub>3</sub>	21	7	4	0	XOR <sub>9</sub>	17	9	4	2	XOR <sub>11</sub>	25	6	1	0	-	-	-
6	m1	XOR <sub>4</sub>	41	17	2	4	XOR <sub>10</sub>	32	0	21	11	-	-	-	-	-	-	-	-
		XOR <sub>3</sub>	46	9	4	5	XOR <sub>9</sub>	37	2	7	18	-	-	-	-	-	-	-	-
7	newapla2	XOR <sub>4</sub>	60	3	0	1	XOR <sub>5</sub>	60	3	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-
		XOR <sub>3</sub>	60	3	0	1	XOR <sub>4</sub>	60	3	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-
8	sq16	XOR <sub>4</sub>	24	24	8	8	XOR <sub>10</sub>	24	16	10	14	-	-	-	-	-	-	-	-
		XOR <sub>3</sub>	32	16	8	8	XOR <sub>9</sub>	24	13	14	13	-	-	-	-	-	-	-	-
9	inc	XOR <sub>4</sub>	74	34	12	8	XOR <sub>7</sub>	46	42	14	26	-	-	-	-	-	-	-	-
		XOR <sub>3</sub>	56	58	11	3	XOR <sub>6</sub>	64	44	8	12	-	-	-	-	-	-	-	-
10	newcp1a2	XOR <sub>4</sub>	98	22	7	1	XOR <sub>7</sub>	59	22	10	37	-	-	-	-	-	-	-	-
		XOR <sub>3</sub>	102	25	1	0	XOR <sub>6</sub>	59	22	37	10	-	-	-	-	-	-	-	-
11	max128	XOR <sub>4</sub>	88	32	8	0	XOR <sub>10</sub>	113	1	0	14	XOR <sub>16</sub>	55	33	7	33	XOR <sub>22</sub>	59	22
		XOR <sub>3</sub>	127	0	0	1	XOR <sub>9</sub>	73	51	4	0	XOR <sub>15</sub>	48	61	0	19	XOR <sub>21</sub>	59	22

Продолжение табл. 13

№	Схема	Группа 1			Группа 2			Группа 3			Группа 4					
		XOR	Тестовые комбинации			XOR	Тестовые комбинации			XOR	Тестовые комбинации					
		00	01	10	11	XOR	00	01	10	11	XOR	00	01	10	11	
12	m2	XOR <sub>4</sub>	187	46	9	14	XOR <sub>10</sub>	179	15	17	45	XOR <sub>14</sub>	160	0	69	27
		XOR <sub>3</sub>	195	27	15	19	XOR <sub>9</sub>	165	33	53	5	XOR <sub>13</sub>	161	0	21	74
13	m3	XOR <sub>4</sub>	165	59	16	16	XOR <sub>10</sub>	154	18	21	63	XOR <sub>14</sub>	128	0	94	34
		XOR <sub>3</sub>	174	41	16	25	XOR <sub>9</sub>	134	45	71	6	XOR <sub>13</sub>	139	0	26	91
14	m4	XOR <sub>4</sub>	61	135	33	27	XOR <sub>10</sub>	48	35	48	125	XOR <sub>14</sub>	8	4	174	70
		XOR <sub>3</sub>	109	69	34	44	XOR <sub>9</sub>	25	69	16	146	XOR <sub>13</sub>	31	19	37	169
15	mlp4	XOR <sub>4</sub>	82	54	66	54	XOR <sub>6</sub>	95	73	47	41	-	-	-	-	-
		XOR <sub>3</sub>	76	68	62	50	XOR <sub>5</sub>	84	72	45	55	-	-	-	-	-
16	tms	XOR <sub>4</sub>	180	22	28	26	XOR <sub>10</sub>	164	17	29	46	XOR <sub>14</sub>	166	38	28	24
		XOR <sub>3</sub>	166	74	9	7	XOR <sub>9</sub>	162	0	16	78	XOR <sub>13</sub>	162	37	44	13
17	dk27	XOR <sub>4</sub>	176	208	64	64	XOR <sub>7</sub>	176	320	0	16	-	-	-	-	-
		XOR <sub>3</sub>	168	216	64	64	XOR <sub>6</sub>	128	256	48	80	-	-	-	-	-
18	max512	XOR <sub>4</sub>	117	125	144	126	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		XOR <sub>3</sub>	105	131	121	155	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	newcpla1	XOR <sub>4</sub>	367	131	13	1	XOR <sub>10</sub>	388	80	0	44	XOR <sub>14</sub>	254	4	72	182
		XOR <sub>3</sub>	351	147	14	0	XOR <sub>9</sub>	299	31	36	146	XOR <sub>13</sub>	264	10	10	228
20	newxcpla1	XOR <sub>4</sub>	438	58	2	14	XOR <sub>10</sub>	60	356	96	0	XOR <sub>16</sub>	396	108	8	0
		XOR <sub>3</sub>	48	462	2	0	XOR <sub>9</sub>	24	484	0	4	XOR <sub>15</sub>	56	104	328	24
21	sex	XOR <sub>4</sub>	256	176	72	8	XOR <sub>10</sub>	219	141	99	53	XOR <sub>14</sub>	199	217	19	77
		XOR <sub>3</sub>	296	200	12	4	XOR <sub>9</sub>	92	164	188	68	XOR <sub>13</sub>	258	94	80	80

**Примечание.** Индексы у элементов XOR соответствуют номеру преобразуемого выхода в описании тестовой схемы.

Из табл. 10 следует, что только для 8 тестовых схем (около 40%) с использованием базового алгоритма 1 получены структуры, где формируются все тестовые комбинации для компараторов в СВК для каждой из контролируемых групп. Еще для 7 схем (около 35%) не формируется только одна из тестовых комбинаций для одного из тестеров.

Из табл. 11 следует, что для 6 тестовых схем (около 30%) с использованием базового алгоритма 2 получены структуры, где формируются все тестовые комбинации для компараторов в СВК для каждой из контролируемых групп. Еще для 7 схем (около 35%) не формируется только одна из тестовых комбинаций для одного из тестеров.

Также важным является и формирование теста для каждого элемента преобразования в каждой СВК. В табл. 12 и 13 сведены данные по числу тестовых комбинаций элементов преобразования в каждой СВК для каждой тестовой схемы.

Из анализа табл. 12 следует, что только для 3 тестовых схем (примерно 15%) использование алгоритма 3 совместно с алгоритмом 1 дает возможность тестирования всех элементов преобразования и еще для 6 тестовых схем (примерно 30%) не формируется только одна комбинация для одного из элементов преобразования.

Из анализа табл. 13 получаем, что только для 7 тестовых схем (примерно 35%) обеспечивается тестируемость всех элементов преобразования в каждой СВК и еще для 5 схем (около 25%) не формируется только одна комбинация для одного из элементов преобразования.

Напрямую применением алгоритма 3 во многих случаях не удается обеспечивать полную самопроверяемость структур для рассмотренных тестовых комбинационных схем. Следует, однако, отметить тот факт, что никаких перестановок выходов в экспериментах не осуществлялось и фиксировались результаты, получаемые для структур, реализованных по алгоритму 3. Учитывая (7), можно сделать вывод о возможном достижении тестопригодности элементов в структурах СВК путем выбора иного способа построения. Эту задачу авторы оставили за рамками настоящего исследова-

ния, показав принципиальную возможность построения самопроверяемых структур по предлагаемым способам.

### Заключение

В подавляющем числе случаев при использовании предложенных в статье способов синтеза СВК удается построить устройства с функциями автоматического обнаружения неисправностей с показателями сложности технической реализации, меньшими, чем показатели для стандартного метода дублирования. В эксперименте показано, что в среднем для рассмотренных тестовых схем при использовании алгоритма 1 в качестве базового получена величина  $\delta_{cp} = 78,079\%$ , а при использовании алгоритма 2 —  $\delta_{cp} = 78,948\%$ . При этом в ряде случаев достигается уменьшение показателя сложности реализации по сравнению с дублированием более чем на 30%. Однако при этом не всегда удается обеспечивать самопроверяемость структур единичным применением алгоритма 3 без перестановки выходов — требуется поиск такого способа выделения выходов и их расположения в информационном и контрольном векторах, при котором условия обеспечения самопроверяемости выполняются. Тем не менее следует подчеркнуть, что достичь полной самопроверяемости с применением представленных в статье способов синтеза СВК удастся всегда, когда это возможно в принципе (речь идет о том, что для некоторых устройств может просто не быть достаточного количества значений 0 или 1 на всех входных комбинациях для какой-либо из функций). Учитывая тот факт, что можно эти функции сделать непреобразуемыми, эффект может быть достигнут. Таким образом, наиболее сложной задачей для представленных способов является обеспечение тестируемости элементов преобразования и тестеров в составах СВК. Тем не менее в статье показано, что базовые алгоритмы 1 и 2 могут эффективно применяться при синтезе СВК с использованием  $WS4(4, 2)$  кодов.

Перспективой дальнейших исследований отметим направления изучения  $WS4(4, 2)$  кодов с иными весовыми коэффициентами рядов информационного вектора, а также в целом модульных взвешенных кодов с суммированием с произвольными значениями

$m$  и модулями, выбираемыми из множества  $M \in \{2^2, 2^3, \dots, 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil - 1}\}$ . Кроме того, может оказаться эффективным применение преобразования не только части выходов объекта диагностирования, но и всех выходов для достижения требуемых характеристик. К примеру, подобная задача исследовалась нами ранее в частном случае для одного из способов взвешивания при построении  $WS4(4, 2)$  кода в [42]. Также интерес представляют исследования в области учета характеристик взвешенных кодов с суммированием при выборе групп контролируемых выходов или организации контроля вычислений единой группы по коду с соответствующими значениями  $m$  и  $k$ .

В заключение отметим, что, по мнению авторов, ЛКС — это до конца не исследованный и перспективный инструмент для синтеза самопроверяемых устройств, который во многих случаях позволяет реализовывать высоконадежные блоки для систем критического применения в промышленности и на транспорте. ▲

#### Библиографический список

- Согомонян Е. С., Слабаков Е. В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. М.: Радио и связь, 1989. 208 с.
- Mitra S., McCluskey E. J. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? // Proceedings of International Test Conference, 2000, USA, Atlantic City, NJ, 3–5 October 2000. P. 985–994. DOI: 10.1109/TEST.2000.894311.
- Стемпковский А. Л., Тельпухов Д. В., Жукова Т. Д. и др. Синтез схемы функционального контроля на основе спектрального R-кода с разбиением выходов на группы // Микроэлектроника. 2019. Т. 48, № 4. С. 284–294.
- Stempkovsky A. L., Zhukova T. D., Telpukhov D. V., Gurov S. I. CICADA: A New Tool to Design Circuits with Correction and Detection Abilities // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 13–15 May 2021, Kazan, Russia. P. 1–5. DOI: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438900.
- Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Теория синтеза самопроверяемых цифровых систем на основе кодов с суммированием. СПб.: Лань, 2021. 580 с.
- Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Самопроверяемые дискретные устройства. СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 224 с.
- Piestrak S. J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. 111 p.
- Останин С. А., Матросова А. Ю., Буторина Н. Б. и др. Синтез монотонных детекторов для подмножества равновесных кодов // Известия вузов. Физика. 2016. Т. 59, № 8–2. С. 79–81.
- Butorina N., Burkatovskaya Yu., Pakhomova E. On the Self-Testing (m, n)-code Checker Design // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1019, 14<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019) 14–17 October 2019, Tomsk, Russian Federation. P. 336–340. DOI: 10.1088/1757-899X/1019/1/012098.
- Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Дмитриев А. В. и др. Организация функционального контроля комбинационных схем методом логического дополнения // Электронное моделирование. 2002. Т. 24, № 6. С. 52–66.
- Гессель М., Морозов А. В., Сапожников В. В. и др. Логическое дополнение — новый метод контроля комбинационных схем // Автоматика и телемеханика. 2003. № 1. С. 167–176.
- Гессель М., Морозов А. В., Сапожников В. В. и др. Контроль комбинационных схем методом логического дополнения // Автоматика и телемеханика. 2005. № 8. С. 161–172.
- Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. New Methods of Concurrent Checking: Edition 1. Dordrecht: Springer Science + Business Media B. V., 2008. 184 p.
- Morosow A., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., et al. Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs // VLSI Design. 1998. Vol. 5, Issue 4. P. 333–345. DOI: 10.1155/1998/20389.
- Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Условия обнаружения неисправности логического элемента в комбинационном устройстве при функциональном контроле на основе кода Бергера // Автоматика и телемеханика. 2017. № 5. С. 152–165.
- Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. Organization of a Fully Self-Checking Structure of a Combinational Device Based on Searching for Groups of Symmetrically Independent Outputs // Automatic Control and Computer Sciences. 2020. Vol. 54, Issue 4. P. 279–290. — DOI: 10.3103/S0146411620040045.
- Ефанов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Модифицированные коды с суммированием взвешенных переходов в системах функционального контроля комбинационных схем // Труды Института системного программирования РАН. 2017. Т. 29, № 5. С. 39–60. DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(5)-3.
- Das D. K., Roy S. S., Dmitiriev A., et al. Constraint Don't Cares for Optimizing Designs for Concurrent Checking by 1-out-of-3 Codes // Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Workshops on Boolean Problems, Freiberg, Germany, September, 2012. P. 33–40.
- Пивоваров Д. В. Построение систем функционального контроля многовыходных комбинационных схем методом логического дополнения по равновесным кодам // Автоматика на транспорте. 2018. Т. 4, № 1. С. 131–149.



20. Saposhnikov V.I., Dmitriev A., Goessel M., et al. Self-Dual Parity Checking — a New Method for on Line Testing // Proceedings of 14<sup>th</sup> IEEE VLSI Test Symposium, USA, Princeton, 1996. P. 162–168.
21. Гессель М., Дмитриев А. В., Сапожников В. В. и др. Самотестируемая структура для функционального обнаружения отказов в комбинационных схемах // Автоматика и телемеханика. 1999. № 11. С. 162–174.
22. Morozov M., Saposhnikov V.V., Saposhnikov V.I., et al. New Self-Checking Circuits by Use of Bergercodes // Proceedings of 6<sup>th</sup> IEEE International On-Line Testing Workshop, Palma De Mallorca, Spain, 3–5 July 2000. P. 171–176.
23. Ефанов Д. В., Погодина Т. С. Исследование свойств самодвойственных комбинационных устройств с контролем вычислений на основе кодов Хэмминга // Информатика и автоматизация. 2023. Т. 22, № 2. С. 349–392. DOI: 10.15622/ia.22.2.5.
24. Ефанов Д. В. Особенности реализации самопроверяемых структур на основе метода инвертирования данных и линейных кодов // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2023. № 65. С. 126–138. DOI: 10.17223/19988605/65/13.
25. Freiman C.V. Optimal Error Detection Codes for Completely Asymmetric Binary Channels // Information and Control. 1962. Vol. 5, Issue 1. P. 64–71. DOI: 10.1016/S0019-9958(62)90223-1.
26. Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., et al. The Synthesis Conditions of Completely Self-Testing Embedded-Control Circuits Based on the Boolean Complement Method to the «1-out-of-m» Constant-Weight Code // Automatic Control and Computer Sciences. 2020. Vol. 54. Issue 2. P. 89–99. DOI: 10.3103/S0146411620020042.
27. Berger J.M. A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels // Information and Control. 1961. Vol. 4, Issue 1. P. 68–73. DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
28. Carter W.C., Duke K.A., Schneider P.R. Self-Checking Error Checker for Two-Rail Coded Data // United States Patent Office, filed July 25, 1968, ser. No. 747533, patented Jan. 26, 1971, N. Y., 10 p.
29. Efanov D., Osadchy G., Zueva M. Special Aspects of Errors Definition via Sum Codes within Embedded Control Schemas Being Realized by Means of Boolean Complement Method // Proceedings of 11<sup>th</sup> IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2021). Cracow, Poland. September 22–25 2021. Vol. 1. P. 424–431. DOI: 10.1109/IDAACS53288.2021.9660837.
30. Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. The Self-Checking Concurrent Error-Detection Systems Synthesis Based on the Boolean Complement to the Bose — Lin Codes with the Modulo Value  $M=4$  // Electronic Modeling. 2021. Vol. 43, Issue 1. P. 28–45. DOI: 10.15407/emodel.43.01.028.
31. Efanov D., Osadchy G., Zueva M. Specifics of Error Detection with Modular Sum Codes in Concurrent Error-Detection Circuits Based on Boolean Complement Method // Proceedings of 19<sup>th</sup> IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2021), Batumi, Georgia, September 10–13, 2021. P. 59–69. DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581036.
32. Bose B., Lin D.J. Systematic Unidirectional Error-Detection Codes // IEEE Transaction on Computers. Nov. 1985. Vol. C-34, P. 1026–1032.
33. Das D., Toubia N.A., Seuring M., et al. Low Cost Concurrent Error Detection Based on Modulo Weight-Based Codes // Proceedings of the IEEE 6<sup>th</sup> International On-Line Testing Workshop (IOLTW). Spain, Palma de Mallorca. July 3–5 2000. P. 171–176. DOI: 10.1109/OLT.2000.856633.
34. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Об одном классе кодов, пригодных для синтеза систем функционального контроля логических устройств // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2014. № 2. С. 48–58.
35. Аксёнова Г. П. Необходимые и достаточные условия построения полностью проверяемых схем свертки по модулю 2 // Автоматика и телемеханика. 1979. № 9. С. 126–135.
36. Sentovich E.M., Singh K.J., Moon C., et al. Sequential Circuit Design Using Synthesis and Optimization // Proceedings IEEE International Conference on Computer Design: VLSI in Computers & Processors. Cambridge, MA, USA. 11–14 October 1992, P. 328–333. DOI: 10.1109/ICCD.1992.276282.
37. SIS: A System for Sequential Circuit Synthesis / E. M. Sentovich, K.J. Singh, L. Lavagno, et al. // Electronics Research Laboratory, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Berkeley. 4 May 1992. 45 p.
38. Закревский А. Д., Поттосин Ю. В., Черемисинова Л. Д. Логические основы проектирования дискретных устройств. М.: Физматлит, 2007. 592 с.
39. Ефанов Д. В. Синтез самопроверяемых комбинационных устройств на основе метода логической коррекции сигналов с применением кодов Боуза — Лина // Информационные технологии. 2023. Т. 29, № 10. С. 503–511. DOI: 10.17587/it.29.503-511.
40. McElvain K. IWLS'93 Benchmark Set: Version 4.0. — Distributed as a part of IWLS'93 benchmark set, May 1993.
41. Collection of Digital Design Benchmarks [Электронный ресурс]. URL: <https://ddd.fit.cvut.cz/www/prj/Benchmarks/> (дата обновления: 10.02.2024).
42. Efanov D.V., Yelina Y.I. Synthesis of Concurrent Error-Detection Circuits Based on Boolean Signals Correction Using Modular Weight-Based Sum Codes // Proceedings of the 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICon). St. Petersburg, Russia. 29–30 January 2024. P. 350–355.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH. 2024. Vol. 10, No. 1. P. 74–99.  
DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-01-74-99

### Study of algorithms for synthesis of self-checking digital devices based on Boolean correction of signals using weighted Bose — Lin codes

#### Information about authors

**Efanov D. V.**, D. Sc., Professor, Full-member of International Transport Academy, IEEE Member, Professor<sup>1,3,4</sup>, General Director Deputy on Research<sup>2</sup>  
E-mail: TrES-4b@yandex.ru

**Yelina Y. I.**, Ph. D. student<sup>1</sup>. E-mail: eseniya-elina@mail.ru

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport, Higher School of Transport, St. Petersburg

<sup>2</sup> NIPI "TransStroybezopasnost" LLC, St. Petersburg

<sup>3</sup> Russian University of Transport, Department of Automation, Remote Control and Communications in Railway Transport, Moscow

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

**Abstract.** When synthesizing self-checking digital devices based on Boolean correction of signals, it is proposed to use weight-based Bose – Lin codes, the construction principles of which imply preliminary weighting of data symbols by natural numbers. Two "basic" structures are proposed for the synthesis of built-in control circuits for groups of six outputs of the diagnostic object. The structures are based on weight-based Bose — Lin codes with summation in the residue ring modulo  $M=4$ . There are 15 such noise-protected codes with the number of data symbols  $m=4$ , which allows to select the best option as a base code in the built-in control circuit according to various criteria, including achieving self-checking properties even in cases where this cannot be achieved using traditional approaches, including duplication. Two algorithms for the synthesis of built-in control circuits based on Boolean signal correction have been developed, allowing the use of correction of only two of the six functions in the basic structure. For basic structures, there are 720 ways to construct an integrated control circuit based on Boolean correction of signals using each weight-based Bose — Lin code, which makes it possible to choose the best way to implement a self-checking device, considering various indicators (structural redundancy, testability, etc.). The operation of the algorithms is demonstrated on simple examples. The results of experiments with test digital circuits from the *MCNC Benchmarks* set confirming the efficiency of the developed algorithms are given. It is shown that with a large number of outputs, there is an astronomical number of ways to organize built-in control circuits, which makes it possible to build self-checking devices with various characteristics. The use of Boolean correction of signals using weight-based Bose – Lin codes can be used in the development and design of self-checking digital devices on various element bases.

**Keywords:** testing of digital circuits; self-checking device; built-in control circuit; Boolean signal correction; weight-based sum code; weight-based Bose – Lin code.

#### References

- Sogomonyan E. S., Slabakov E. V. Samoproveryaemye ustrojstva i otkazoustojchivye sistemy. M.: Radio i svyaz', 1989. 208 s. (In Russian)
- Mitra S., McCluskey E. J. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? // Proceedings of International Test Conference, 2000, USA, Atlantic City, NJ, 3–5 October 2000. P. 985–994. DOI: 10.1109/TEST.2000.894311.
- Stempkovskij A. L., Telpuhov D. V., Zhukova T. D. i dr. Sintez skhemy funkcional'nogo kontrolya na osnove spektral'nogo R-koda s razbieniem vyhodov na gruppy // Mikroelektronika. 2019. T. 48, № 4. S. 284–294. (In Russian)

- Stempkovskij A. L., Zhukova T. D., Telpuhov D. V., et al. CICADA: A New Tool to Design Circuits with Correction and Detection Abilities // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 13–15 May 2021, Kazan, Russia. P. 1–5. DOI: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438900.
- Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V. Teoriya sinteza samoproveryaemykh cifrovyykh sistem na osnove kodov s summirovaniem. SPb.: Lan', 2021. 580 s. (In Russian)
- Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. Samoproveryaemye diskretnye ustrojstva. SPb.: Energoatomizdat, 1992. 224 s. (In Russian)
- Piestrak S. J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. 111 p.
- Ostanin S. A., Matrosova A. YU., Butorina N. B. i dr. Sintez monotonykh detektorov dlya podmnozhestva ravnovesnykh kodov // Izvestiya vuzov. Fizika. 2016. T. 59, № 8–2. S. 79–81. (In Russian)
- Butorina N., Burkatovskaya Yu., Pakhomova E. On the Self-Testing (m, n)-code Checker Design // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1019, 14<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019) 14th-17th October 2019, Tomsk, Russian Federation. P. 336–340. DOI: 10.1088/1757-899X/1019/1/012098.
- Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Dmitriev A. V. i dr. Organizatsiya funkcional'nogo kontrolya kombinatsionnykh skhem metodom logicheskogo dopolneniya // Elektronnoe modelirovanie. 2002. T. 24, № 6. S. 52–66. (In Russian)
- Gessel' M., Morozov A. V., Sapozhnikov V. V. i dr. Logicheskoe dopolnenie — novyy metod kontrolya kombinatsionnykh skhem // Avtomatika i telemekhanika. 2003. № 1. S. 167–176. (In Russian)
- Gessel' M., Morozov A. V., Sapozhnikov V. V. i dr. Kontrol' kombinatsionnykh skhem metodom logicheskogo dopolneniya // Avtomatika i telemekhanika. 2005. № 8. S. 161–172. (In Russian)
- Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., et al. New Methods of Concurrent Checking: Edition 1. Dordrecht: Springer Science + Business Media B. V., 2008. 184 p.
- Morosov A., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., et al. Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs // VLSI Design. 1998. Vol. 5, Issue 4. P. 333–345. DOI: 10.1155/1998/20389.
- Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. Usloviya obnaruzheniya neispravnosti logicheskogo elementa v kombinatsionnom ustrojstve pri funkcional'nom kontrole na osnove koda Bergera // Avtomatika i telemekhanika. 2017. № 5. S. 152–165. (In Russian)
- Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. Organization of a Fully Self-Checking Structure of a Combinational Device Based on Searching for Groups of Symmetrically Independent Outputs // Automatic Control and Computer Sciences. 2020. Vol. 54, Issue 4. P. 279–290. DOI: 10.3103/S0146411620040045.
- Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. Modificirovannyye kody s summirovaniem vzveshennykh perekhodov v sistemakh funkcional'nogo kontrolya kombinatsionnykh skhem // Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN. 2017. T. 29, № 5. S. 39–60. DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(5)-3. (In Russian)
- Das D. K., Roy S. S., Dmitriev A., et al. Constraint Don't Cares for Optimizing Designs for Concurrent Checking by 1-out-of-3 Codes // Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Workshops on Boolean Problems, Freiberg, Germany, September, 2012. P. 33–40.
- Pivovarov D. V. Postroenie sistem funkcional'nogo kontrolya mnogovyhodnykh kombinatsionnykh skhem metodom logicheskogo dopolneniya po ravnovesnym kodam // Avtomatika na transporte. 2018. T. 4, № 1. S. 131–149. (In Russian)
- Sapozhnikov V. I., Dmitriev A., Gessel' M., et al. Self-Dual Parity Checking — a New Method for on Line Testing // Proceedings of 14<sup>th</sup> IEEE VLSI Test Symposium, USA, Princeton, 1996. P. 162–168.
- Gessel' M., Dmitriev A. V., Sapozhnikov V. V., et al. Samotestiruemaya struktura dlya funkcional'nogo obnaruzheniya otkazov v kombinatsionnykh skhemah // Avtomatika i telemekhanika. 1999. № 11. S. 162–174. (In Russian)

22. Morozov M., Saposhnikov V. V., Saposhnikov VI. V., et al. New Self-Checking Circuits by Use of Berger-codes // Proceedings of 6<sup>th</sup> IEEE International On-Line Testing Workshop, Palma De Mallorca, Spain, 3–5 July 2000. P. 171–176.
23. Efanov D. V., Pogodina T. S. Issledovanie svoystv samodvoystvennykh kombinatsionnykh ustrojstv s kontrol'em vychislenij na osnove kodov Hemminga // Informatika i avtomatizaciya. 2023. T. 22, № 2. S. 349–392. DOI: 10.15622/ia.22.2.5. (In Russian)
24. Efanov D. V. Osobennosti realizatsii samoproveryaemykh struktur na osnove metoda invertirovaniya dannykh i lineynykh kodov // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika. 2023. № 65. S. 126–138. DOI: 10.17223/19988605/65/13. (In Russian)
25. Freiman C. V. Optimal Error Detection Codes for Completely Asymmetric Binary Channels // Information and Control. 1962. Vol. 5, Issue 1. P. 64–71. DOI: 10.1016/S0019-9958(62)90223-1.
26. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V., et al. The Synthesis Conditions of Completely Self-Testing Embedded-Control Circuits Based on the Boolean Complement Method to the «1-out-of-m» Constant-Weight Code // Automatic Control and Computer Sciences. 2020. Vol. 54, Issue 2. P. 89–99. DOI: 10.3103/S0146411620020042.
27. Berger J. M. A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels // Information and Control. 1961. Vol. 4, Issue 1. P. 68–73. DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
28. Carter W. C., Duke K. A., Schneider P. R. Self-Checking Error Checker for Two-Rail Coded Data // United States Patent Office, filed July 25, 1968, ser. No. 747533, patented Jan. 26, 1971, N. Y., 10 p.
29. Efanov D., Osadchy G., Zueva M. Special Aspects of Errors Definition via Sum Codes within Embedded Control Schemas Being Realized by Means of Boolean Complement Method // Proceedings of 11<sup>th</sup> IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2021). Cracow, Poland. September 22–25 2021. Vol. 1. P. 424–431. DOI: 10.1109/IDAACS53288.2021.9660837.
30. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V. The Self-Checking Concurrent Error-Detection Systems Synthesis Based on the Boolean Complement to the Bose — Lin Codes with the Modulo Value  $M=4$  // Electronic Modeling. 2021. Vol. 43, Issue 1. P. 28–45. DOI: 10.15407/emodel.43.01.028.
31. Efanov D., Osadchy G., Zueva M. Specifics of Error Detection with Modular Sum Codes in Concurrent Error-Detection Circuits Based on Boolean Complement Method // Proceedings of 19<sup>th</sup> IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2021), Batumi, Georgia, September 10–13 2021. P. 59–69. DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581036.
32. Bose B., Lin D. J. Systematic Unidirectional Error-Detection Codes // IEEE Transaction on Computers. Nov. 1985. Vol. C-34. P. 1026–1032.
33. Das D., Toubia N. A., Seuring M., et al. Low Cost Concurrent Error Detection Based on Modulo Weight-Based Codes // Proceedings of the IEEE 6th International On-Line Testing Workshop (IOLTW). Spain, Palma de Mallorca. July 3–5, 2000. P. 171–176. DOI: 10.1109/OLT.2000.856633.
34. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V., Efanov D. V. Ob odnom klasse kodov, prigodnykh dlya sinteza sistem funktsional'nogo kontrolya logicheskikh ustrojstv // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2014. № 2. S. 48–58. (In Russian)
35. Aksonova G. P. Neobhodimye i dostatochnye usloviya postroeniya polnost'yu proveryaemykh skhem svertki po modulyu 2 // Avtomatika i telemekhanika. 1979. № 9. S. 126–135. (In Russian)
36. Sentovich E. M., Singh K. J., Moon C., et al. Sequential Circuit Design Using Synthesis and Optimization // Proceedings IEEE International Conference on Computer Design: VLSI in Computers & Processors. Cambridge, MA, USA. 11–14 October 1992. P. 328–333. DOI: 10.1109/ICCD.1992.276282.
37. SIS: A System for Sequential Circuit Synthesis / E. M. Sentovich, K. J. Singh, L. Lavagno, et al. // Electronics Research Laboratory, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Berkeley. 4 May 1992. 45 p.
38. Zakrevskij A. D., Pottosin YU. V., Cherenisnina L. D. Logicheskie osnovy proektirovaniya diskretnykh ustrojstv. M.: Fizmatlit, 2007. 592 s. (In Russian)
39. Efanov D. V. Sintez samoproveryaemykh kombinatsionnykh ustrojstv na osnove metoda logicheskoy korrektsii signalov s primeneniem kodov Bouza – Lina // Informatsionnye tekhnologii. 2023. T. 29, № 10. S. 503–511. DOI: 10.17587/it.29.503-511. (In Russian)
40. McElvain K. IWLS'93 Benchmark Set: Version 4.0. — Distributed as a part of IWLS'93 benchmark set, May 1993.
41. Collection of Digital Design Benchmarks. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://ddd.fit.cvut.cz/www/prj/Benchmarks/> (data obnovleniya: 10.02.2024).
42. Efanov D. V., Yelina Y. I. Synthesis of Concurrent Error-Detection Circuits Based on Boolean Signals Correction Using Modular Weight-Based Sum Codes // Proceedings of the 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIcon). St. Petersburg, Russia. 29–30 January 2024. P. 350–355.

## ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОВЕДЕНИЯ ПРЕДСМЕННОГО ИНСТРУКТАЖА В ДИСТАНЦИИ СИГНАЛИЗАЦИИ, ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ И БЛОКИРОВКИ

**ТРИШИН Никита Алексеевич**, инженер производственно-технического отдела;  
e-mail: new3tion@yandex.com

Мурманская дистанция сигнализации, централизации и блокировки, г. Мурманск

Бесперебойная работа устройств сигнализации, централизации и блокировки обеспечивается работниками хозяйства автоматики и телемеханики, уровень квалификации которых напрямую влияет на возникновение отказов технических средств. Осознание этого приводит к разработке основополагающих нормативных документов в сфере непрерывного обучения персонала, в том числе для этапа подготовки к выполнению запланированных работ. Выполненный автором обзор действующей нормативной базы, регламентирующей прохождение персоналом хозяйства автоматики и телемеханики разных видов инструктажей, показал, что значительный несистематизированный объем материала требуется усвоить перед началом производства работ. В результате расстановку акцентов при доведении этого материала работником выполняет непосредственный руководитель. Он же принимает управленческое решение по допуску работника к выполнению запланированных работ, согласно плану-графику технологического процесса. Важной составляющей данной процедуры является объективная оценка уровня знаний и умений работника по результатам самоподготовки, к которой в хозяйстве автоматики и телемеханики не предъявляются четкие требования. Тем не менее в таких условиях принято решение о цифровизации процесса прохождения инструктажей, что выполнено с использованием таких корпоративных автоматизированных систем в области технической учебы, как КАСКОР, СДО, СЭЖ, АОС-Ш. Текущее положение дел при работе с ними рассмотрено и проанализировано на примере Мурманской дистанции сигнализации, централизации и блокировки. Особое внимание уделено рассмотрению и возможности совершенствования функционала АОС-Ш как основной системы в области технической учебы персонала, связанного с хозяйством автоматики и телемеханики. На основе полученных результатов исследования сформулированы рекомендации по построению эффективного производственного процесса применительно к проведению предсменного инструктажа, что является достижением цели данной статьи.

**Ключевые слова:** автоматизированная система, план-график технологического процесса, инструктаж, проверка знаний, тестирование, техническая учеба, сигнализация, централизация и блокировка.

DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-01-100-116

### ▼ Введение

Работники дистанции сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) являются непосредственными участниками производственного процесса в ОАО «РЖД». Они в значительной степени влияют на эффективность, надежность и безопасность производства работ в соответствии с возложенными трудовыми функциями. С точки зрения риск-ориентированного подхода, в данном случае принято говорить о наличии человеческого фактора в обеспечении бесперебойной работы устройств СЦБ. Только повышение уровня знаний и умений персонала поможет снизить риски возникновения отказов технических

средств эксплуатационного характера и, как следствие, задержек поездов. В связи с этим к числу наивысших приоритетов ОАО «РЖД» относятся процессы подготовки квалифицированных кадров. Это выражается значительным ростом и разнообразием использования форм, методов и дидактических инструментов для проведения занятий по технической учебе, что требует их систематизации и структуризации. Необходимость этих процессов вызвана тем, что затраты рабочего времени на обучение персонала непосредственно влияют на эффективность основного производственного процесса и должны по возможности минимизироваться [1]. Тема организации и контроля

технической учебы на полигонах железных дорог рассматривалась на Школе передового опыта служб технической политики в июне 2023 года [2, 3]. Было отмечено информационное перенапряжение годовых планов технической учебы большим количеством непрофильных тем, внесистемное добавление дополнительных тем, что оказывает негативное влияние на организацию проведения технических занятий. Возникает потребность в построении оптимальной модели учебного процесса в части баланса соотношения минимальных затрат времени и высокого качества проведения обучения, а также определении статуса приоритетности изучаемых тем в рамках технической учебы.

Кроме того, на сегодняшний день серьезным препятствием является практика построения корпоративных автоматизированных систем на принципиально различающихся требованиях к функционалу. На протяжении 13 лет в ОАО «РЖД», в частности по хозяйству автоматики и телемеханики, ведутся разработка и внедрение разного рода автоматизированных систем в области технической учебы. По состоянию дел на начало 2024 года ежедневное и практическое применение находят только единицы из них. Как итог, организовано разрозненное хранение больших объемов информации, что создает сложность доступа к нужным данным и невозможность оказания действенной помощи в работе специалистов, выступающих в роли преподавателя или обучаемого. Не обеспечивается упорядоченность, точность, достоверность представляемой информации, что исключает ее однозначность и удобство восприятия. Другими словами, отсутствует единое информационное пространство. Решение поставленной проблемы явится залогом эффективной, ритмичной и успешной деятельности как отдельных линейных предприятий, так и железнодорожного транспорта в целом.

Изучением проблем совершенствования процесса технической учебы, в том числе в отрасли железнодорожного транспорта, занимаются многие научные коллективы. Большой вклад в это направление внесли исследования таких специалистов, как Герасимова Е. А. (2004 год) [4], Пивоваров А. В. (2005 год) [5],

Карташев М. И. (2012 год) [6], Асадуллаев Р. Г. (2013 год) [7], Ягудаев Г. Г. (2013 год) [8], Лифанов А. Е. (2015 год) [9], Нгуен В. Н. (2016 год) [10], Седов М. С. (2017 год) [11], Бересток Н. О. (2022 год) [12] и многие другие.

Целью данной статьи является исследование возможности повышения качества проведения одного из элементов технической учебы в ОАО «РЖД» — инструктажа. Как следствие, изучается процесс принятия управленческого решения о допуске персонала к выполнению запланированных работ по итогам проведения инструктажа и его совершенствование (в том числе за счет применения разработанных корпоративных автоматизированных систем ОАО «РЖД»). Для достижения отмеченной цели поставлены следующие задачи:

1. Обзор действующей нормативной базы, регламентирующей прохождение персоналом хозяйства автоматики и телемеханики разных видов инструктажей;
2. Оценка и анализ существующей возможности прохождения инструктажа на базе дистанции СЦБ в автоматизированных системах ОАО «РЖД»;
3. Выработка предложений по совершенствованию системы оценки уровня теоретических знаний и умений работника дистанции СЦБ перед началом выполнения запланированных работ.

### **1. Инструктаж как элемент технической учебы в ОАО «РЖД»**

Перед началом производства работ, выполняемых по плану-графику технологического процесса, электромеханикам и электромонтерам СЦБ требуется выполнить определенные подготовительные мероприятия, одним из которых является самоподготовка. Она заключается в самостоятельном изучении материалов, подлежащих изучению на текущие сутки. На сегодняшний день нет четких требований к данной процедуре. Ранее основные положения самоподготовки были закреплены Методическими указаниями, утвержденными Департаментом СЦБ Министерства путей сообщения от 14 мая 2002 года № ЦШЦ-37/95.

Качество проводимой самоподготовки проверяет старший электромеханик СЦБ при проведении ежедневного инструктажа, что яв-

ляется одной из его функций. Во исполнение Инструкции по техническому обслуживанию и ремонту устройств и систем СЦБ, утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 30 декабря 2015 года № 3168/р [13], он проводит инструктажи по охране труда и технике безопасности, о мерах по обеспечению безопасности движения поездов, по пожарной безопасности и другие, в объеме выполняемых в этот день работ с оформлением их в соответствующих журналах.

Безусловно, охрана труда занимает наивысшую позицию по мере значимости на протяжении всей производственной деятельности железнодорожного транспорта. В итоге при исполнении закрепленных должностных обязанностей в первую очередь делается акцент на организации безопасного труда и только после на добросовестном и ответственном исполнении основных трудовых функций, связанных с обеспечением безопасности движения поездов. Инструктажи по охране труда проводятся во исполнение раздела II Постановления Правительства Российской Федерации от 24 декабря 2021 года № 2464 [14] как при приеме на работу (вводный, первичный), так и в процессе выполнения своих обязанностей (повторный, внеплановый, целевой).

Необходимость проведения ежедневного инструктажа о мерах по обеспечению безопасности движения поездов при производстве работ по техническому обслуживанию и ремонту устройств СЦБ впервые была установлена Министерством путей сообщения по итогам расследования схода вагонов грузового поезда на железнодорожной станции Анамакит Восточно-Сибирской железной дороги в 1998 году. В связи с упразднением Министерства путей сообщения порядок его проведения не действует. В современных реалиях он не пересматривался и не актуализировался, однако необходимость его проведения утверждается и по сей день. Суть, заложенная в данный вид инструктажа, дублируется с ежемесячным повторно-периодическим инструктажом (ППИ) и ежедневным предсменным тестовым 15-минутным инструктажом.

ППИ проводится в целях приобретения знаний о возможных видах происшествий, изучения причин нарушений рабочего про-

цесса и правил техники безопасности работникам хозяйства автоматики и телемеханики в соответствии с Методическими рекомендациями, утвержденными Управлением автоматики и телемеханики от 30 декабря 2020 года № ЦДИ-2778. В тематике ППИ использованы телеграммы, указания, фотоматериалы с мест происшествий и другие документы по случаям крушений, аварий и других событий, связанных с нарушением безопасности движения поездов. По мнению автора, данный вид инструктажа больше относится к полноценному ежемесячному теоретическому занятию, на которое затраты времени должны учитываться при формировании годового плана технической учебы.

В рамках прохождения ежедневного предсменного тестового 15-минутного инструктажа проверяется знание работником требований утвержденных карт технологического процесса, которыми он должен руководствоваться перед выполнением работ на текущие сутки. Здесь же повторно затрагиваются вопросы соблюдения охраны труда. Такое построение процесса инструктирования приводит к троекратному фиксации однотипной информации: в двух бумажных журналах и в автоматизированной обучающей системе.

Проведение противопожарного инструктажа (вводного, первичного на рабочем месте, повторного, внепланового и целевого) регламентируется Приказом Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий от 18 ноября 2021 года № 806 [15].

Что касается других видов инструктажей, на основании требований Положения о подготовке населения в области гражданской обороны, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 2 ноября 2000 года № 841 [16], в течение первого месяца работы обязательно проведение вводного инструктажа по гражданской обороне. Во исполнение требований СТО РЖД 08.030-2016 [17] проводятся еженедельные предсменные инструктажи, представляющие собой краткое (не более 15 минут) ознакомление работника с учебными материалами по действиям в нестандартных ситуациях с уче-

том требований безопасных условий труда. В соответствии с Перечнем организационно-технических мероприятий, утвержденным Управлением автоматики и телемеханики от 6 июня 2023 года № ЦДИ-3046, одним из приоритетных мероприятий в 2024 году является проведение инструктажа по распоряжению ОАО «РЖД» от 6 ноября 2019 года № 2435/р «О мерах по пресечению случаев хищений и умышленной порчи устройств СЦБ и обеспечению сохранности кабельных коммуникаций СЦБ».

## 2. Внедрение электронного формата предсменного инструктажа

В рамках цифровизации инструктажей руководством хозяйства автоматики и телемеханики уделено особое внимание процедуре прохождения такого вида инструктажа, как ежедневный предсменный тестовый 15-минутный инструктаж. При его проведении на текущий момент проверяется уровень знаний работником утвержденных карт технологического процесса. Широкое применение в этой области получили такие системы, как:

- корпоративная автоматизированная система контроля знаний работников ОАО «РЖД», связанных с обеспечением безопасности движения поездов (КАСКОР) [18, 19];
- система дистанционного обучения (СДО) [20];
- система электронного контроля проведения технической учебы (СЭЖ) [21];
- автоматизированная обучающая система для работников хозяйства автоматики и телемеханики (АОС-Ш) [22].

КАСКОР была создана в 2010 году Российским университетом транспорта (РУТ, бывший МИИТ) в рамках Программы информатизации ОАО «РЖД» в целях автоматизации процессов планирования и проведения проверок знаний работников ОАО «РЖД». Однако в связи с отсутствием требуемых проверочных схем, включающих в себя разработанные альбомы вопросов, в частности по технологиям производства работ, на текущий момент данная система широко применяется только в целях проведения аттестации работников по объему знаний правил технической эксплуатации, ут-

вержденных приказом Минтранса России от 23 июня 2022 года № 250. Интерфейс системы под ролью обучаемого и проверяющего представлен на рис. 1 и 2 соответственно.

22 декабря 2016 года была запущена в эксплуатацию система автоматического назначения ежедневных 15-минутных предсменных тестовых инструктажей в хозяйстве автоматики и телемеханики на базе СДО. Выполнена автоматизация назначения инструктажей на основе информации о запланированных работах по плану-графику технологического процесса на сутки и их исполнителях, полученной из Единой корпоративной автоматизированной системой управления инфраструктурой (ЕК АСУИ) [23]. После активации суточного плана исполнителям запланированных работ назначается электронный инструктаж: по каждой карте технологического процесса в автоматизированной системе формируется перечень тестовых вопросов. СДО оценивает полученные ответы на них и проверяет результат прохождения теста на соответствие проходному баллу (не менее 80 % правильных ответов). Система имеет возможность второго шанса и в случае наличия незначительного количества неверных ответов формирует блок теоретической части по неувоенному разделу. Далее системой предлагается повторный смежный вопрос, чтобы убедиться в закреплении информации в рамках работы над ошибками. Информация о статусе допуска работника (допущен, не допущен) заносится в базу данных СДО. Интерфейс системы представлен на рис. 3.

В случае отсутствия в системе разработанного электронного инструктажа на запланированный вид работ информация о результатах его прохождения может быть введена в ЕК АСУИ диспетчером или старшим электромехаником СЦБ вручную, что свидетельствует о допуске работника к выполнению запланированных работ. Эта система является несовершенной, поскольку подлинность вносимой информации зависит непосредственно от человека. Во-первых, допуск может быть проставлен как на текущую дату, так и за прошедшие периоды. Во-вторых, у старшего электромеханика СЦБ присутствует возможность проставления допуска самому себе. Такое положение дел создает дополнительную

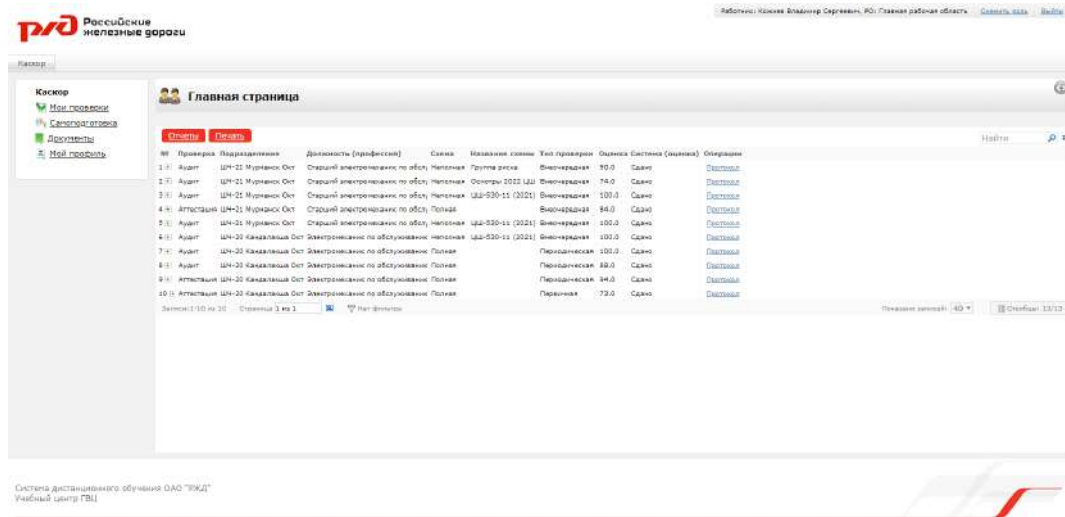


Рис. 1. Интерфейс КАСКОР в роли обучаемого

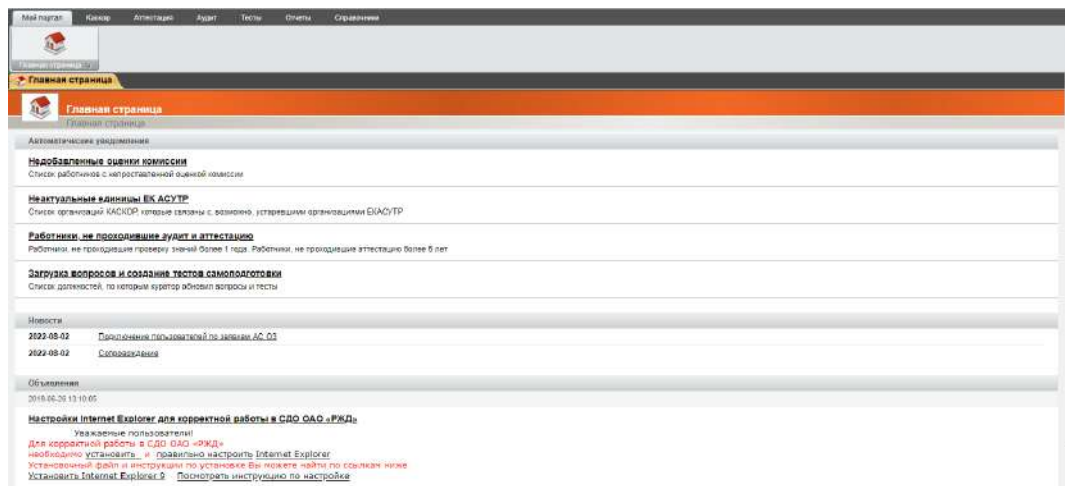


Рис. 2. Интерфейс КАСКОР в роли проверяющего

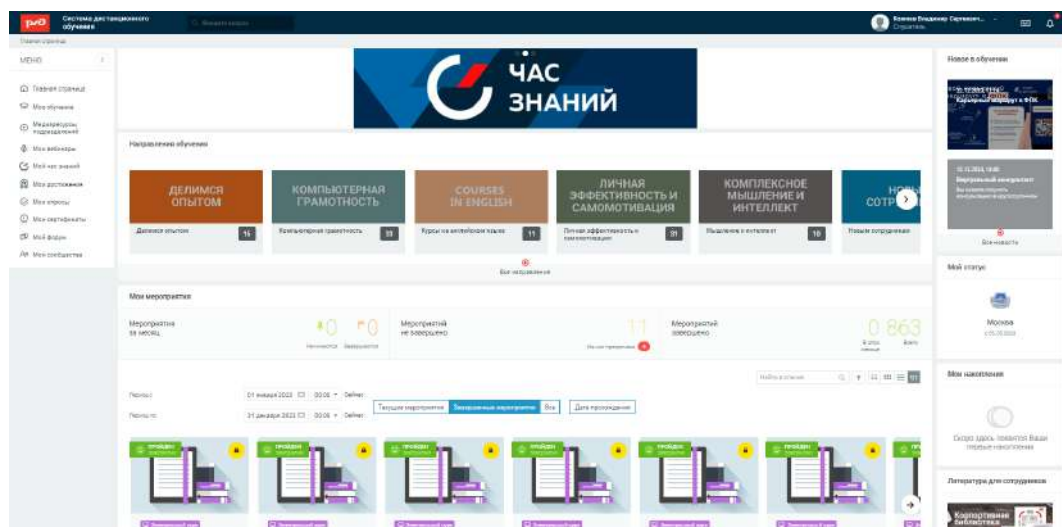


Рис. 3. Интерфейс СДО



необходимость контроля и сверки вносимой информации. Стоит уделить особое внимание, что обмен информацией о наличии допуска, проставленного вручную, между ЕК АСУИ, СДО и АОС-Ш не происходит. Кроме того, существенным недостатком в ЕК АСУИ является возможность закрытия выполненных работ по плану-графику технологического процесса без наличия допуска к работам (при отсутствии соответствующей отметки в системе). В итоге отсутствует барьер, который не позволял бы работнику отметить выполнение работы без успешного прохождения инструктажа. Указанные проблемные места решаются путем установки соответствующих ограничений на уровне системы.

Внешний вид раздела «Прохождение инструктажей (Ш)» в ЕК АСУИ представлен на рис. 4.

Дублирование отметок о прохождении инструктажа с печатного журнала в электронный также применяется в СЭЖ. Необходимо уточнить, что в данном случае сведения касаются только такого вида инструктажа, как еженедельный. Разработка системы выполнена в 2018 году Петербургским государственным университетом путей сообщения Императора Александра I (ФГБОУ ВО ПГУПС). Цель — организация автоматизированного просмотра

и редактирования результатов обучения сотрудников предприятия, в том числе за счет интеграции взаимосвязи с СДО. Внешний облик системы после успешной авторизации пользователя представлен на рис. 5. В части еженедельных инструктажей специалисту, ответственному за техническую учебу в структурном подразделении, необходимо перейти в раздел занятий «Инструктажи» и заполнить матрицу, в которой вертикально расположены лица из учебной группы, по горизонтали — номера недель (см. рис. 6).

Наибольший интерес вызывает разработанная в 2019 году АОС-Ш, поскольку на данный момент эта система активно используется в качестве основного инструмента при организации и проведении технической учебы персонала, связанного с хозяйством автоматики и телемеханики. Главное ее преимущество по сравнению с другими автоматизированными системами и ее отличительная черта — наличие формата обобщенного инструктажа. По сравнению с одиночным видом предсменного инструктажа на каждую запланированную работу по плану-графику технологического процесса на сутки АОС-Ш предлагает работнику прохождение одного обобщенного варианта тестирования путем комбинации вопросов из одиночных инструктажей, что сокращает нор-

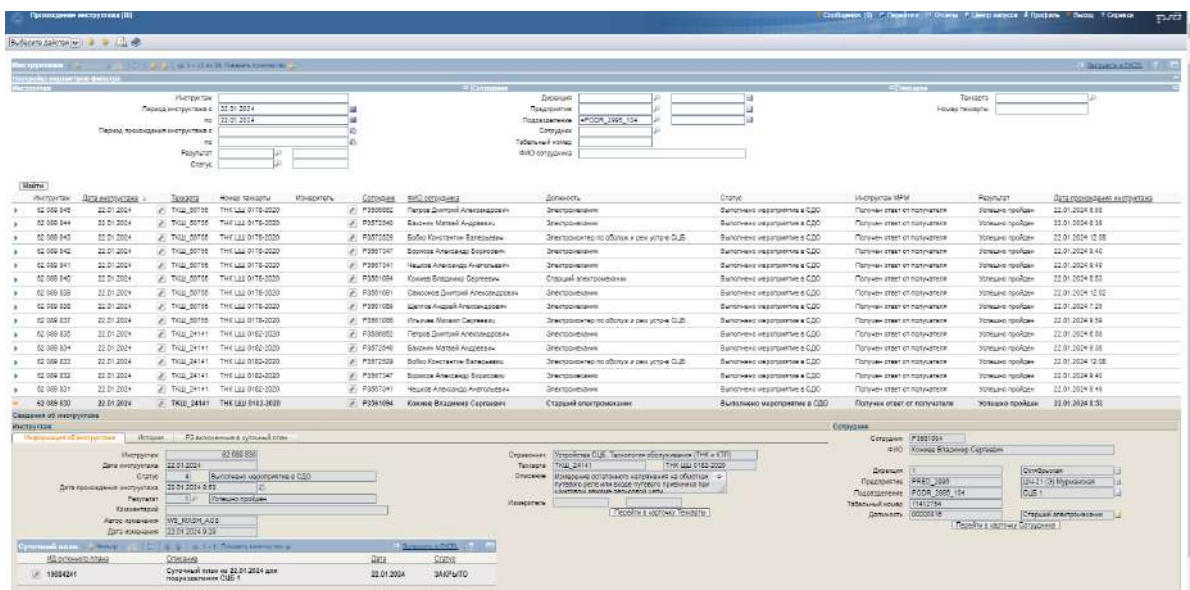


Рис. 4. Интерфейс ЕК АСУИ в части планирования и учета результатов прохождения инструктажей эксплуатационным штатом СЦБ

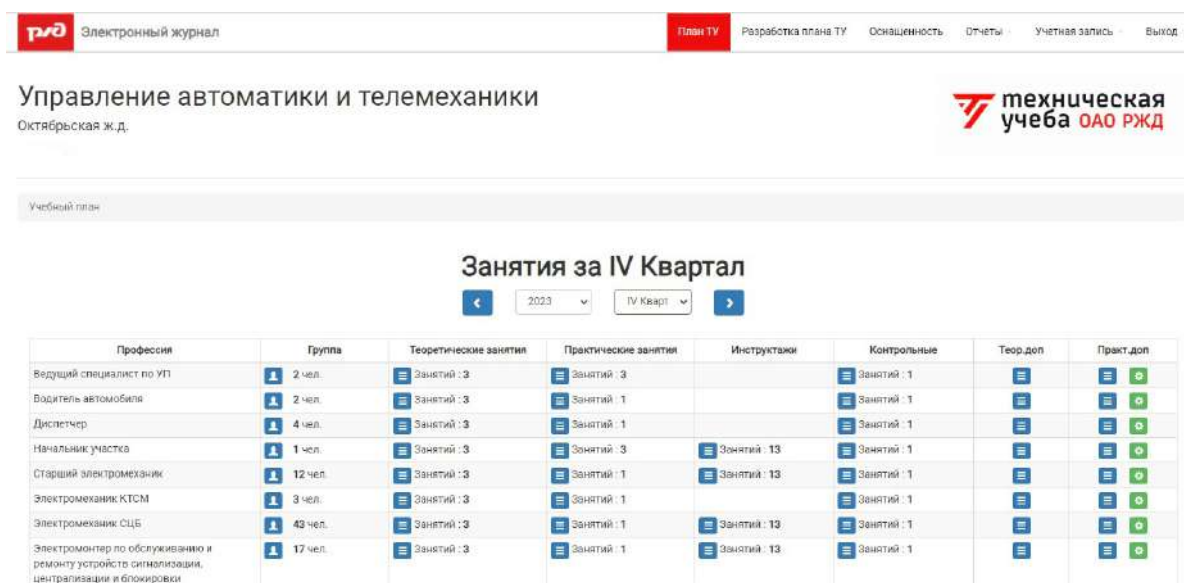


Рис. 5. Интерфейс раздела «Учебный план» в СЭЖ

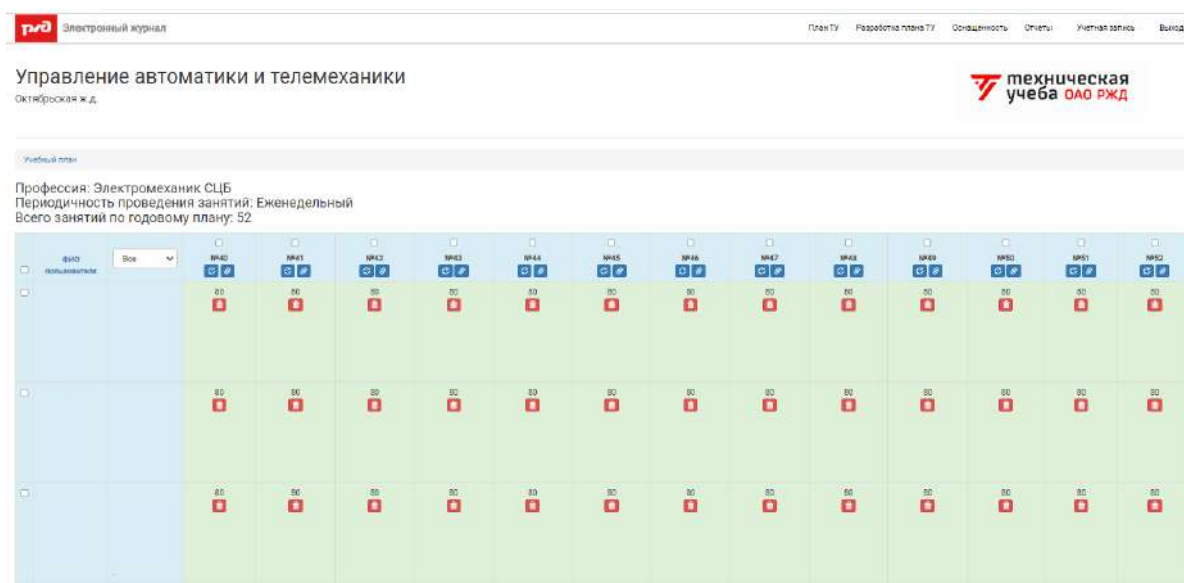


Рис. 6. Интерфейс СЭЖ в части еженедельных предсменных инструктажей

мативное время прохождения предсменного инструктажа. Основная информация о диапазоне количества вопросов, нормативном времени на прохождение одиночного и обобщенного инструктажей в зависимости от количества запланированных работ по плану-графику технологического процесса на сутки сведена в таблице.

Существенным недостатком АОС-Ш, с точки зрения пользователей, является ограничен-

ность доступа к системе. В целях прохождения предсменных инструктажей необходима установка специального программного обеспечения «Клиент АОС-Ш» на рабочее место старшего электромеханика СЦБ с операционной системой Windows и наличием сети интранет. Допускается вариант использования мобильного рабочего места Единой корпоративной автоматизированной системы управления инфраструктурой хозяйства автоматики и те-

### Диапазоны количества вопросов и нормативное время на прохождение одиночного и обобщенного инструктажей в зависимости от количества запланированных работ по плану-графику технологического процесса на сутки

Количество работ, шт.	Возможное количество вопросов, шт.		Нормативное время на инструктаж, мин	
	минимальное	максимальное	одиночный	обобщенный
1	7	14	15	15
2	8	16	30	20
3	10	21	45	25
4	12	24	60	25
5	14	24	75	25
6	16	28	90	28
7	18	25	105	28
8	20	28	120	30
9	22	31	135	30
10	24	34	150	30

лемеханики с расширенным функционалом (ЕК АСУИ МРМ-Ш) [24–28]. Однако стоит отметить, что на текущий момент использование настольной версии АОС-Ш предпочтительнее, поскольку наблюдаются частые сбои в работе и длительные процессы обновления данных между ЕК АСУИ, АОС-Ш и ЕК АСУИ МРМ-Ш, что создает препоны в оперативности выполнения поставленной задачи и принуждает проходить инструктаж повторно в настольной версии АОС-Ш. Такое положение дел требует рассмотрения возможности

реализации доступа к АОС-Ш в сети интернет с соблюдением установленных требований информационной безопасности, а также организации доступа на мобильном устройстве без передачи данных через системы-посредников в рамках повышения быстродействия работы до уровня, сопоставимого при использовании настольной версии.

Отображение раздела «Инструктажи» в настольной версии АОС-Ш и на мобильном рабочем месте представлены на рис. 7 и 8 соответственно.

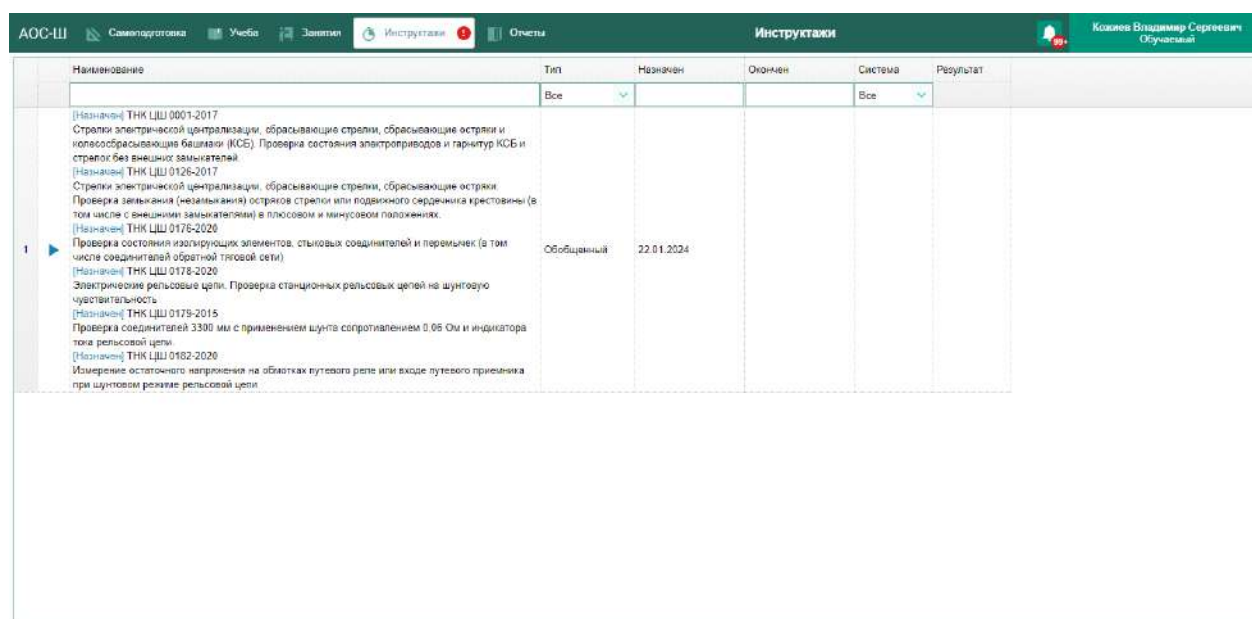


Рис. 7. Интерфейс АОС-Ш

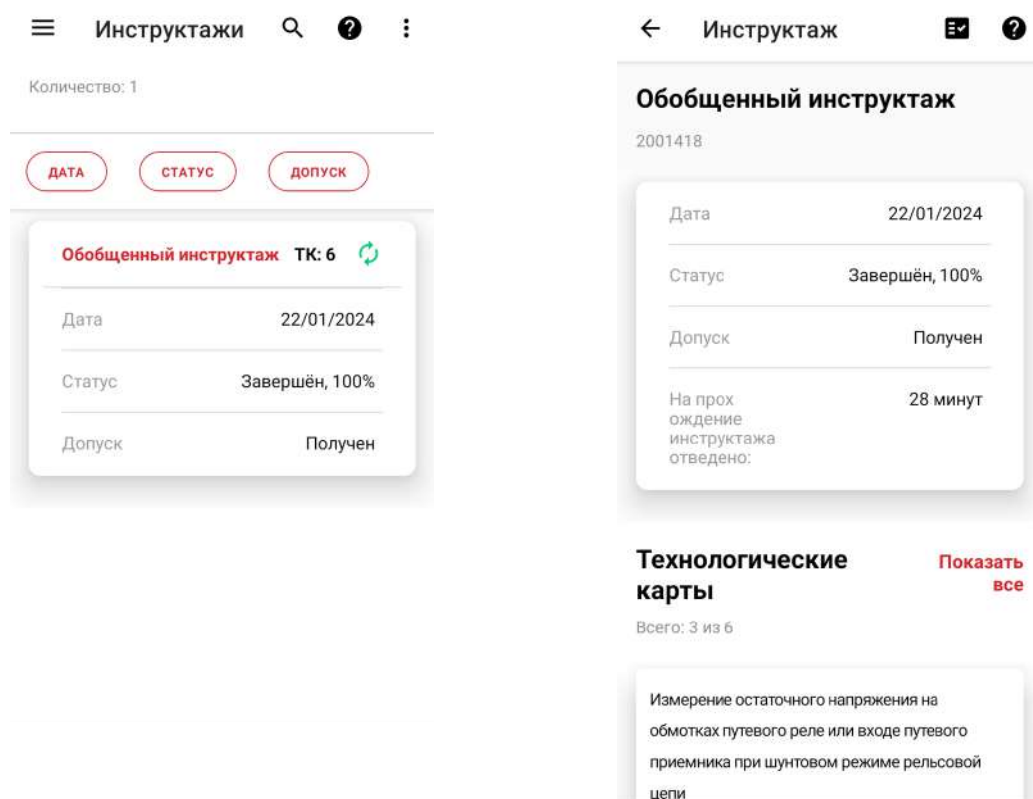


Рис. 8. Интерфейс ЕК АСУИ МРМ–Ш

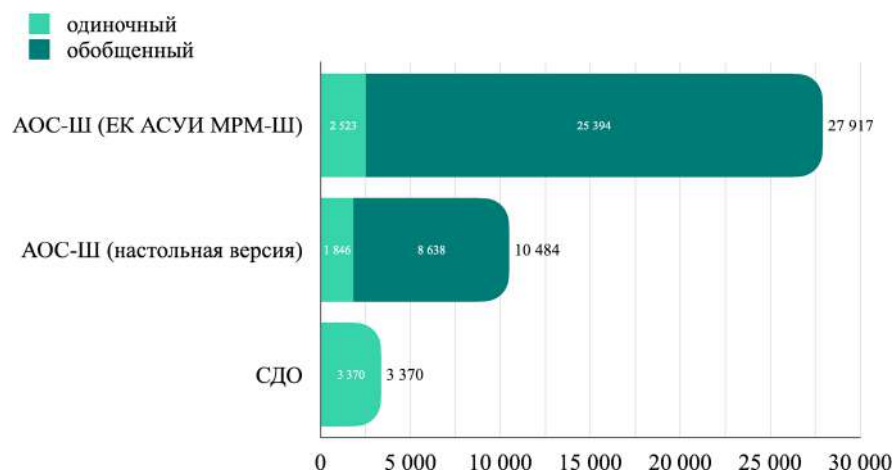
### 3. Статистические данные о прохождении предсменных инструктажей

По данным ЕК АСУИ, в 2023 году требовалось 138 работникам Мурманской дистанции СЦБ получить допуск на производство 75 509 работ в рамках изучения 285 карт технологического процесса. Среди них отсутствовала возможность тестирования в формате предсменного инструктажа АОС-Ш перед выполнением 20 347 работ (27 % от их общего числа), которые выполняются на основе 186 карт технологического процесса (65 % от их общего числа). По состоянию дел на 17 августа 2023 года установлено, что для 617 карт технологических процессов дистанции СЦБ со стороны разработчиков АОС-Ш создано 639 предсменных инструктажей. Как итог, предполагается, что алгоритм учета прохождения инструктажей в ЕК АСУИ осуществляется некорректно и более достоверная информация содержится непосредственно в АОС-Ш.

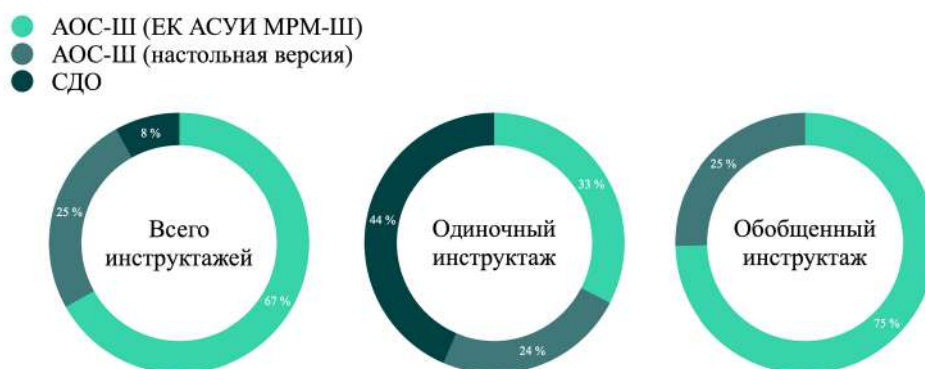
На основе данных, хранящихся в АОС-Ш (см. рис. 9, 10), тестирование в формате предсменного инструктажа охватило 132 работника,

которым в автоматизированной системе было назначено 50 517 инструктажей, составленных на основе 212 карт технологического процесса. Из этого числа пройдено эксплуатационным штатом 34 032 обобщенных инструктажа (67 % от общего числа назначенных инструктажей). Используя ЕК АСУИ МРМ-Ш, работники Мурманской дистанции СЦБ прошли 27 917 инструктажей (67 % от их общего числа). По диаграммам видно, что этим способом они предпочитали прохождение в основном только обобщенных инструктажей. Наибольшее число одиночных инструктажей все-таки выполнено в СДО вместо АОС-Ш по причине более стабильной работы системы и возможности к ней доступа в сети интернет.

Наличие в базе данных АОС-Ш статусов допуска работника «Не допущен», «Частично допущен» говорит о необходимости продолжения проведения инструктажа традиционным методом (с оформлением в бумажном журнале и последующим проставлением отметки в ЕК АСУИ), что в конечном итоге увеличивает затраты времени на проведение должного об-



**Рис. 9.** Количество пройденных одиночных и обобщенных предсменных инструктажей в разрезе автоматизированных систем по данным АОС-Ш для Мурманской дистанции СЦБ



**Рис. 10.** Процентное соотношение пройденных предсменных инструктажей в разрезе автоматизированных систем по данным АОС-Ш для Мурманской дистанции СЦБ

учения технологии производства работ и безопасным приемам труда. В результате возможность использования тестовых технологий контроля уровня подготовки персонала перед выполнением определенного вида работ не позволяет достигнуть снижения трудоемкости данной процедуры и не дает возможности отказа от традиционного метода инструктирования в полном объеме.

#### 4. Пути совершенствования АОС-Ш

По своей структуре предсменные инструктажи АОС-Ш в преобладающем большинстве строятся на основе простейшей модели теста, где допускается однородность множества вопросов и не допускается дихотомиче-

ская оценка ответа. Источником информации являются карты технологического процесса, заведомо не предполагающие разночтений и предписывающие четкий алгоритм выполнения работы. В качестве рекомендаций к совершенствованию процесса тестирования автор предлагает добавление уровней значимости вопросов. Это позволило бы говорить о том, что если работник ответил на сложный вопрос, то он тем более сможет ответить и на простой. В противном случае системой может быть зафиксирована инвертированность, что может свидетельствовать о неверной структуре знаний работника, о нарушении процедуры тестирования, о недостатках самих тестовых заданий.

Кроме фиксации доли полученных правильных ответов (см. рис. 11), рекомендуется принимать во внимание и долю времени, затраченного работником на прохождение предсменного инструктажа, в целях определения показателя уровня теоретических знаний работника [29]. Алгоритм его определения применительно к прохождению предсменного инструктажа представлен на рис. 12.

Долю правильных ответов  $q$  предлагается определять как отношение количества вопросов, на которые получены от работника правильные ответы, к общему количеству вопросов теста и вычислять по выражению:

$$q = \frac{Q_{np}}{Q_{общ}}$$

где  $Q_{np}$  — количество вопросов, на которые получены от работника правильные ответы, шт.;

$Q_{общ}$  — общее количество вопросов теста, шт.

В случае если показатель доли правильных ответов работника больше или равен 0,8 (80 % как действующее пороговое значение), то следующим шагом определять долю времени, затраченного работником на прохождение

тестирования. В противном случае принимать решение, что работник может совершать ошибочные действия по причине неуспеваемости теоретического материала.

Долю времени  $t$ , затраченного работником на прохождение тестирования, предлагается определять как:

$$t = \frac{t_{np}}{t_{общ}}$$

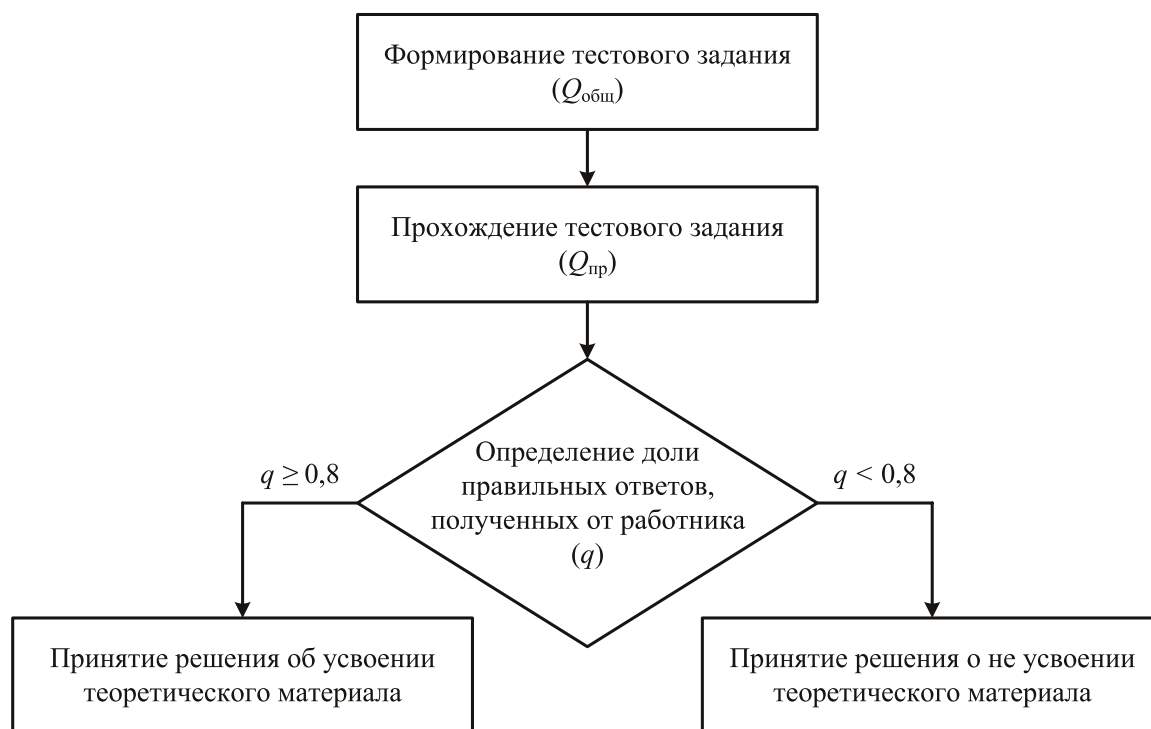
где  $t_{np}$  — время, затраченное работником на прохождение тестирования, с;

$t_{общ}$  — время, отведенное на прохождение тестирования и позволяющее объективно оценить уровень знаний работника с учетом его психологических и интеллектуальных особенностей, с (см. таблицу).

Показатель уровня теоретических знаний работника  $I$  (безразмерная величина) предлагается определять выражением:

$$I = \frac{q}{t}$$

Предложенный автором показатель представлен не самоцелью, а лишь средством поиска недочетов в работе всей системы контроля



**Рис. 11.** Текущий алгоритм определения уровня теоретических знаний работника применительно к прохождению предсменного инструктажа



**Рис. 12.** Предлагаемый алгоритм определения показателя уровня теоретических знаний работника применительно к прохождению предсменного инструктажа

уровня знаний, зон совершенствования и развития. Допустимые отклонения, погрешности в его определении требуют более детального исследования и не рассматриваются в рамках данной статьи. В условиях формирования качественной базы тестовых заданий и аккумуляирования достоверных результатов его применение позволит комплексно и дистанционно оценить уровень теоретических знаний работника (в том числе в части технологии производства работ), выявить систематическую направленность каждого работника по итогам самоподготовки и спрогнозировать возможность ошибочных действий в процессе его деятельности.

В качестве второй рекомендации автор предлагает выполнить централизованную разработку типовых конспектов проведения инструктажей по всем существующим видам, используемым в хозяйстве автоматике и телемеханики. На их основе определить статус приоритетности изучаемых тем в рамках предсменного инструктажа и принять решение об оптимизации его структуры проведения. В перспективе этот процесс можно автоматизировать в целях формирования единого комплексного инструктажа перед производством работ. Также это сократит затраты на печатную продукцию: приведет к ведению одного бумажного или электронного журнала.

В автоматизированной системе, выбранной руководством ОАО «РЖД» в качестве основной в области технической учебы, рекомендуется рассмотреть возможность реализации не только ознакомления с утвержденным типовым конспектом инструктажа, но и его прослушивания программными средствами. Внедрение цифровой подписи работника в систему позволило бы вести электронный журнал и выполнить перенос проведения инструктажа на безбумажные технологии в полном объеме, что обладает такой же юридической силой.

В борьбе за поддержание высокого уровня знаний и компетенций работников предлагается реализовать в автоматизированной системе оперативный доступ к необходимому теоретическому материалу путем автоматического предоставления из базы документов только необходимой документации на текущие сутки. В итоге будет достигнуто сокращение времени на поиск нужных материалов при самоподготовке. На текущий день подобный функционал не реализован ни в одной автоматизированной системе хозяйства автоматики и телемеханики.

В добавление, по мнению автора, успешные результаты пройденного теста в АОС-Ш неравнозначны управленческому решению по допуску работника к выполнению определенного вида работ. На данном этапе реализации применяется подмена понятий между процессами оценки самоподготовки работника и проведения инструктажа с получением допуска к работе, что недопустимо, приводит к формализму и не позволяет в полной мере гарантировать качество и безопасность выполнения работником поставленных задач при производственном процессе. Зачастую целью данного мероприятия ставится не восстановление пробелов в определенных знаниях, а предоставление отчета о том, что работники обучены. Тестирование может успешно применяться, но только как вспомогательная форма контроля (в том числе самоконтроля) знания теоретической части материала. Оценка правильного выполнения тестового задания осуществляется только по конечному результату без учета выполнения промежуточных действий, на основе которых он был получен, что

снижает субъективизм в оценке знаний работника. Результаты тестирования следует оценивать как итог самоподготовки и принимать их во внимание в процессе построения инструктажа. Необходимо уделять больше времени работе над ошибками и повторному изучению неусвоенного материала, что поможет пресечь ошибочные действия работника в процессе его деятельности.

### **Заключение**

В рамках проведенного исследования решены поставленные задачи и сформулированы следующие выводы на основе полученных результатов.

Непосредственный руководитель работ или автоматизированная система должны применять единый разработанный нормативно-методологический инструментарий, который может быть использован при организации обучения любого типа, в том числе при проведении должного обучения технологии производства работ и безопасным приемам труда. Задача состоит в том, чтобы осуществлялись признание полученного знания и готовность его использовать при производстве работ, а восприятие материала было по возможности более полным. Значительный задублированный объем материала требуется усвоить уже только перед производством работ вне годового плана технической учебы. Имеет место быть не один инструктаж, а одновременно несколько инструктажей за один день. Теряется грань между организацией изучения необходимого объема материала в рамках планового обучения и инструктированием перед началом работ. По мнению автора, чрезмерно большой объем информации даже при тщательном составлении одного подробного инструктажа может замедлить процесс восприятия и, соответственно, снизить положительный эффект процесса обучения, не говоря о совокупности инструктажей при текущем положении дел. Необходимо выделить основную информацию, акцентировать внимание на конкретных случаях и действиях, которые помогут обеспечить качество выполнения технологии производства работ и безопасность труда. Кроме того, действующая позиция с упором только на теоретическую базу в динамично изменяющихся ус-



ловиях может привести к потере возможности использования профессиональных навыков в практической деятельности.

Со стороны руководства трудовые ресурсы дистанции СЦБ требуют пристального внимания и осторожного обдуманного подхода, а также прогнозной аналитики на основе имеющейся информации, в том числе из автоматизированных систем. Сделан акцент на необходимости и важности постоянного технического сопровождения, совершенствования используемой автоматизированной системы. Автор рекомендует предотвратить построение новых автоматизированных систем без вывода из эксплуатации аналогичных функций в существующих. ▲

### Библиографический список

1. Тришин Н.А. Анализ применяемого по сети ОАО «РЖД» распределения баланса рабочего времени работников хозяйства автоматики и телемеханики // Перспективные исследования в современном мире: сборник статей международной научной конференции, Санкт-Петербург, 29 ноября 2022 года. СПб.: общество с ограниченной ответственностью «Международный институт перспективных исследований имени Ломоносова». 2022. С. 54–58. DOI: 10.58351/221129.2022.23.76.004. EDN BERBAQ.
2. Акимов Л. Инженеры представили проекты развития // [Электронный ресурс]. URL: [https://gudok.ru/content/luchshie\\_praktiki\\_obrazovanie/1638936/](https://gudok.ru/content/luchshie_praktiki_obrazovanie/1638936/) (дата обращения: 26.01.2024).
3. Соболев Л. Обучаться самим и обучать нейросети // [Электронный ресурс]. URL: <https://gudok.ru/zdr/177/?ID=1639324> (дата обращения: 26.01.2024).
4. Герасимова Е.А. Методологические основы формирования системы повышения квалификации персонала : автореф. дис. ... канд. эконом. наук. СПб., 2004. 21 с. EDN LZBMFG.
5. Пивоваров А.В. Управление стратегическим развитием кадрового потенциала железнодорожного транспорта на основе информационно-образовательных технологий : автореф. дис. ... канд. эконом. наук. М., 2005. 23 с. EDN NIEZGN.
6. Карташев М.И. Разработка инструментальной среды интеграции программных приложений для организации обучения персонала предприятий : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 26 с. EDN QIJCOZ.
7. Асадуллаев Р.Г. Автоматизация процесса индивидуальной подготовки кадров в системе управления персоналом промышленного предприятия : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Орел, 2013. 15 с. EDN ZOZVPJ.
8. Ягудаев Г.Г. Процессно-ориентированная концепция управления кадровым потенциалом в системе переподготовки персонала предприятий промышленности и транспортного комплекса : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2013. 41 с. EDN SVEYGL.
9. Лифанов А.Е. Модели и алгоритмы управления для автоматизированных систем дистанционного обучения : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2015. 22 с. EDN ZPQEOZ.
10. Нгуен В.Н. Методы и алгоритмы структуризации образовательного контента и управления процессом электронного обучения персонала промышленных предприятий на основе графовых моделей : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 2016. 22 с. EDN ZQHZCT.
11. Седов М.С. Модели и алгоритмы оценивания результатов технической учебы работников массовых специальностей в ОАО «РЖД» : автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2016. 22 с. EDN ZQBVVU.
12. Бересток Н.О. Повышение безопасности производственных процессов предприятий железнодорожного транспорта на основе снижения влияния человеческого фактора : дис. ... канд. техн. наук. 2022. 121 с. EDN ZQUCWU.
13. Инструкция по техническому обслуживанию и ремонту устройств и систем сигнализации, централизации и блокировки: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 30.12.2015 г. № 3168/п // [Электронный ресурс]. URL: [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru) (дата обращения: 26.01.2024).
14. Правила обучения по охране труда и проверки знания требований охраны труда: утв. Постановлением Правительства РФ от 24.12.2021 г. № 2464 // [Электронный ресурс]. URL: [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru) (дата обращения: 26.01.2024).
15. Порядок, виды, сроки обучения лиц, осуществляющих трудовую или служебную деятельность в организациях, по программам противопожарного инструктажа, требования к содержанию указанных программ и категорий лиц, проходящих обучение по дополнительным профессиональным программам в области пожарной безопасности: утв. Приказом МЧС России от 18.11.2021 г. № 806 // [Электронный ресурс]. URL: [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru) (дата обращения: 26.01.2024).
16. Положение о подготовке населения в области гражданской обороны: утв. Постановлением Правительства РФ от 02.11.2000 г. № 841 // [Электронный ресурс]. URL: [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru) (дата обращения: 26.01.2024).
17. СТО РЖД 08.030–2016 «Инструктажи предсменные работников основных профессий ОАО «РЖД». Требования к организации и правила проведения»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.02.2017 № 285/п // [Электронный ресурс]. URL: [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru) (дата обращения: 26.01.2024).

18. Корпоративная автоматизированная система контроля знаний работников ОАО «РЖД», связанных с обеспечением безопасности движения поездов на базе СДО (КАСКОР) // Прикладные информационные системы управления надежностью, безопасностью, рисками и ресурсами на железнодорожном транспорте. Ульяновск: Областная типография «Печатный двор», 2013. С. 112–130. EDN TDSOZZ.
19. Дубовицкая Е. А. Система «КАСКОР» на железнодорожном транспорте // Студент: наука, профессия, жизнь: материалы II Всероссийской студенческой научной конференции с международным участием, Омск, 20–30 апреля 2015 года / Ответственный редактор С. Г. Шантаренко. Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2015. С. 185–187. EDN VSNETJ.
20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021666868 Российская Федерация. Программное обеспечение системы дистанционного обучения в части разработки нового интерфейса для работников ОАО «РЖД». Очередь 2021: № 2021665662: заявл. 07.10.2021 г.: опубл. 21.10.2021 г. / В. А. Артемов, А. В. Благов, И. А. Борисов [и др.]; заявитель: Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». EDN BNUDFV.
21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019617587 Российская Федерация. Система Электронного контроля проведения технической учебы в Управлении пути и сооружений Центральной дирекции инфраструктуры (СЭЖ): № 2019616280: заявл. 29.05.2019 г.: опубл. 17.06.2019 г. / Е. В. Гуков, П. С. Карпунин, Е. Л. Киселев, О. Н. Куранова; заявитель: Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». EDN NVXFCD.
22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021664262 Российская Федерация. «Автоматизированная обучающая система для работников хозяйства автоматики и телемеханики (АОС-Ш). Очередь 2020» (АОС-Ш. Очередь 2020): № 2021663468: заявл. 26.08.2021 г.: опубл. 02.09.2021 г. / О. В. Березина, А. А. Веселов, А. А. Хюппинен [и др.]; заявитель: Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». EDN JKUUWS.
23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018665003. Типовая система управления текущим содержанием эксплуатационной инфраструктуры (ТС-2): № 2018662095: заявл. 01.11.2018 г.: опубл. 28.11.2018 г.; заявитель: Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». EDN QRTKLS.
24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021665807 Российская Федерация. ЕК АСУИ в части мобильного рабочего места хозяйства автоматики и телемеханики (ЕК АСУИ МРМ-Ш (Очередь 2020): № 2021665197: заявл. 04.10.2021 г.: опубл. 04.10.2021 г.; заявитель: Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». EDN JCGGKX.
25. Кленов А. В. Новые возможности с МРМ // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 2. С. 41–42. EDN BLVCIX.
26. Пультяков А. В., Гаврилова А. Г., Семчук А. А. Особенности технической эксплуатации устройств автоматики и телемеханики с применением МРМ-Ш // Молодая наука Сибири. 2022. № 3 (17). С. 150–158. EDN TNXEPX.
27. Солдатенков Е. Г. Опыт эксплуатации МРМ-Ш // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 2. С. 39–40. EDN ZUXNOY.
28. Толокнов А. В. Развитие функциональности МРМ-Ш // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 5. С. 16–17. EDN XNTXEX.
29. Орел Н. Д., Аверьянов Ю. И. Обоснование методики дифференцированной оценки уровня знаний работника из числа электротехнического персонала // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2022. № 2. С. 41–44. EDN LIHSLQ.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH. 2024. Vol. 10, no. 1. P. 100–116  
DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-01-100-116

## Process digitalization of providing pre-shift briefing in signals and interlocking division

### Information about authors

Trishin N. A., production and technical department engineer.

E-mail: new3tion@yandex.com

Murmansk signals and interlocking division

**Abstract:** The uninterrupted operation of railway signals and interlocking equipment is ensured by signal personnel, whose skill level directly affects the occurrence of failures of technical equipment. Awareness of it leads to the development of fundamental regulatory documents in the field of continuous studying of personnel, including for the stage of preparation for carrying out planned work. The author's review of the actual normative base, which regulates to be taken part in various types of briefings by signal personnel, has showed that a significant unsystematized amount of material must be mastered before starting work. As a result, the immediate supervisor is responsible for setting the emphasis during informing of this material to employees. He also makes a management decision about the admission of an employee to carry out planned work according to the maintenance and repair plan-schedule. An important component of this procedure is an objective assessment of the level of employee theoretical knowledge and skills according to the results of self-preparing which doesn't have clear requirements in the signals and interlocking division. However, on such unstable ground, a decision was made to digitalize the process of providing briefings, which has been done using such corporate automated systems in the field of technical study as KASKOR, SDO, SJeZh, AOS-Sh. Current state of affairs has been considered and analyzed on Murmansk signals and interlocking division, for example. Particular attention is paid to the consideration and possibility of improving the functionality of AOS-Sh as the main system in the field of technical study of signal personnel. Based on the obtained research results, recommendations have been formulated for creating the effective production process as applied to providing pre-shift briefing which is an achievement of the goal of this article.

**Keywords:** automated system, maintenance and repair plan-schedule, briefing, knowledge check, test, technical study, automation and remote control system.

### References

- Trishin N. A. Analiz primenyaemogo po seti OAO «RZHD» raspredeleniya balansa rabocheho vremeni rabotnikov hozyajstva avtomatiki i teleme-khaniki // Perspektivnye issledovaniya v sovremennom mire: sbornik statej mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, Sankt-Peterburg, 29.11.2022. Sankt-Peterburg: Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu «Mezhdunarodnyj institut perspektivnyh issledovanij imeni Lomonosova», 2022. S. 54–58. DOI: 10.58351/221129.2022.23.76.004. EDN BERBAQ. (In Russian)
- Akimov L. Inzheneri predstavili proekty razvitiya // [Elektronnyj resurs]. URL: [https://gudok.ru/content/luchshie\\_ praktiki\\_ obrazovanie/1638936/](https://gudok.ru/content/luchshie_praktiki_ obrazovanie/1638936/) (data obrashcheniya 26.01.2024). (In Russian)
- Sobolev L. Obuchat'sya samim i obuchat' nejroseti // [Elektronnyj resurs]. URL: <https://gudok.ru/zdr/177/?ID=1639324> (data obrashcheniya 26.01.2024). (In Russian)
- Gerasimova E. A. Metodologicheskie osnovy formirovaniya sistemy povysheniya kvalifikacii personala : avtoref. dis. ... kand. ekonom. nauk. SPb, 2004. 21 s. EDN LZBMFG. (In Russian)
- Pivovarov A. V. Upravlenie strategicheskimi razvitiem kadrovogo potentsiala zheleznodorozhnogo transporta na osnove informacionno-obrazovatel'nyh tekhnologij : avtoref. dis. ... kand. ekonom. nauk. M., 2005. 23 s. EDN NIEZGN. (In Russian)
- Kartashev M. I. Razrabotka instrumental'noj sredy integracii programmyh prilozhenij dlya organizacii obucheniya personala predpriyatij : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. M., 2012. 26 s. EDN QJICOZ. (In Russian)
- Asadullaev R. G. Avtomatizaciya processa individual'noj podgotovki kadrov v sisteme upravleniya personalom promyshlennogo predpriyatiya : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Orel, 2013. 15 s. EDN ZOZVPJ. (In Russian)
- Yagudaev G. G. Processno-orientirovannaya koncepciya upravleniya kadrovym potentsialom v sisteme perepodgotovki personala predpriyatij promyshlennosti i transportnogo kompleksa : avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk. M., 2013. 41 s. EDN SVEYGL. (In Russian)
- Lifanov A. E. Modeli i algoritmy upravleniya dlya avtomatizirovannyh sistem distancionnogo obucheniya : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Penza, 2015. 22 s. EDN ZPQEOZ. (In Russian)
- Nguen V. N. Metody i algoritmy strukturizacii obrazovatel'nogo kontenta i upravleniya processom elektronno obucheniya personala promyshlennyyh predpriyatij na osnove grafovyyh modelej : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Novocheboksak, 2016. 22 s. EDN ZQHZCT. (In Russian)
- Sedov M. S. Modeli i algoritmy ocenivaniya rezul'tatov tekhnicheskoy ucheby rabotnikov massovyh special'nostej v OAO «RZHD» : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2016. 22 s. EDN ZQBVUV. (In Russian)
- Berestok N. O. Povyshenie bezopasnosti proizvodstvennyh processov predpriyatij zheleznodorozhnogo transporta na osnove snizheniya vliyaniya chelovecheskogo faktora : dis. ... kand. tekhn. nauk. 2022. 121 s. EDN ZQUCWU. (In Russian)
- Instrukciya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu ustrojstv i sistem signalizacii, centralizacii i blokirovki: utv. rasporyazheniem OAO «RZHD» ot 30.12.2015 g. № 3168/r // [Elektronnyj resurs]. URL: [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru) (data obrashcheniya 26.01.2024). (In Russian)
- Pravila obucheniya po ohrane truda i proverki znaniya trebovanij ohrany truda: utv. Postanovleniem Pravitel'stva RF ot 24.12.2021 g. № 2464 // [Elektronnyj resurs]. URL: [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru) (data obrashcheniya 26.01.2024). (In Russian)
- Poryadok, vidy, sroki obucheniya lic, osushchestvlyayushchih trudovuyu ili sluzhebnyuyu deyatelnost' v organizacijah, po programmam protivopozharnogo instruktazha, trebovaniya k sodержaniyu ukazannyh program i kategorij lic, prohodyashchih obuchenie po dopolnitel'nyh professional'nyh programmam v oblasti pozharnoj bezopasnosti: utv. Prikazom MCHS Rossii ot 18.11.2021 g. № 806 // [Elektronnyj resurs]. URL: [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru) (data obrashcheniya 26.01.2024). (In Russian)
- Polozhenie o podgotovke naseleniya v oblasti grazhdanskoj oborony: utv. Postanovleniem Pravitel'stva RF ot 02.11.2000 g. № 841 // [Elektronnyj resurs]. URL: [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru) (data obrashcheniya 26.01.2024). (In Russian)
- STO RZHD 08.030–2016 «Instruktazhi predsmennye rabotnikov osnovnyh professij OAO «RZHD». Trebovaniya k organizacii i pravila provedeniya»: utv. rasporyazhenie OAO «RZHD» ot 14.02.2017 g. № 285/r // [Elektronnyj resurs]. URL: [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru) (data obrashcheniya 26.01.2024). (In Russian)
- Korporativnaya avtomatizirovannaya sistema kontrolya znaniy rabotnikov OAO «RZHD», svyazannyh s obespecheniem bezopasnosti dvizheniya poezdov na baze SDO (KASKOR) // Prikladnye informacionnye sistemy upravleniya nadezhnost'yu, bezopasnost'yu, riskami i resursami na zheleznodorozhnom transporte. Ul'yanovsk: Oblastnaya tipografiya «Pechatnyj dvor», 2013. S. 112–130. EDN TDSOZZ. (In Russian)
- Dubovickaya E. A. Sistema KASKOR na zheleznodorozhnom transporte // Student: nauka, professiya, zhizn': materialy II versosijskoj studencheskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, Omsk, 20–30 aprelya 2015 goda / Otvetstvennyj redaktor S.G. SHantarenko. Omsk: Omskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya, 2015. S. 185–187. EDN VSNETJ. (In Russian)
- Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2021666868 Rossijskaya Federaciya. Programmnoe obespechenie sistemy distancionnogo obucheniya v chasti razrabotki novogo interfejsa dlya rabotnikov OAO «RZHD». Ochered' 2021: № 2021665662: zayavl. 07.10.2021: opubl. 21.10.2021 / V. A. Artemov, A. V. Blagov, I. A. Borisov [i dr.]; zayavitel': Otkrytoe akcionerное obshchestvo «Rossijskie zheleznye dorogi». EDN BNUDFV. (In Russian)

21. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2019617587 Rossijskaya Federaciya. Sistema "Elektronnogo kontrolya provedeniya tekhnicheskoy ucheby v Upravlenii puti i sooruzhenij Central'noj direkcii infrastruktury" (SEZH): № 2019616280: zayavl. 29.05.2019: opubl. 17.06.2019 / E. V. Gukov, P. S. Karpunin, E. L. Kiselev, O. N. Kuranova; zayavitel': Otkrytoe akcionerное obshchestvo «Rossijskie zheleznye dorogi». EDN NVXFCF. (In Russian)
22. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2021664262 Rossijskaya Federaciya. «Avtomatizirovannaya obuchayushchaya sistema dlya rabotnikov hozyajstva avtomatiki i telemekhaniki (AOS-SH). Ochered' 2020» (AOS-SH. Ochered' 2020): № 2021663468: zayavl. 26.08.2021: opubl. 02.09.2021 / O. V. Berezina, A. A. Veselov, A. A. Hyuppinen [i dr.]; zayavitel': Otkrytoe akcionerное obshchestvo «Rossijskie zheleznye dorogi». EDN JKUUWS. (In Russian)
23. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2018665003. Tipovaya sistema upravleniya tekushchim sodержaniem ekspluatacionnoj infrastruktury (TS-2): № 2018662095: zayavl. 01.11.2018: opubl. 28.11.2018; zayavitel': Otkrytoe akcionerное obshchestvo «Rossijskie zheleznye dorogi». EDN QRTKLS. (In Russian)
24. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2021665807 Rossijskaya Federaciya. EK ASUI v chasti mobil'nogo raboche-go mesta hozyajstva avtomatiki i telemekhaniki (EK ASUI MRM-SH (Ochered' 2020)): № 2021665197: zayavl. 04.10.2021: opubl. 04.10.2021; zayavitel': Otkrytoe akcionerное obshchestvo «Rossijskie zheleznye dorogi». EDN JCGGKX. (In Russian)
25. Klenov A. V. Novye vozmozhnosti s MRM // Avtomatika, svyaz', informatika. 2022. № 2. S. 41–42. EDN BLVCIX. (In Russian)
26. Pul'tyakov A. V., Gavrilova A. G., Semchuk A. A. Osobennosti tekhnicheskoy ekspluatatsii ustrojstv avtomatiki i telemekhaniki s primeneniem MRM-SH // Molodaya nauka Sibiri. 2022. № 3 (17). S. 150–158. EDN TNXEPX. (In Russian)
27. Soldatenkov E. G. Opyt ekspluatatsii MRM-SH // Avtomatika, svyaz', informatika. 2022. № 2. S. 39–40. EDN ZUXNOY. (In Russian)
28. Toloknov A. V. Razvitie funkcional'nosti MRM-SH // Avtomatika, svyaz', informatika. 2022. № 5. S. 16–17. EDN XNTXEX. (In Russian)
29. Orel N. D., Aver'yanov YU. I. Obosnovanie metodiki differencirovannoj ocenki urovnya znaniy rabotnika iz chisla elektrotekhnicheskogo personala // Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti. 2022. № 2. S. 41–44. EDN LIHSLQ. (In Russian)