



Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

АВТОМАТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH

Том 11 Сентябрь 2025 № 3



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

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

ФЗ № 436-ФЗ	Издание не подлежит маркировке в соответствии с п. 1 ч. 2 ст. 1
----------------	--

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

Подписано в печать 12.09.2025. Выход в свет 25.09.2025. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 10,62. Тираж 200 экз. Заказ 3433. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ООО «БУКИ ВЕДИ»
г. Москва, Партийный пер., 1, корп. 58, стр. 3

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Александр Никитин	д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, главный редактор журнала «Автоматика на транспорте», Санкт-Петербург, Россия
Константин Бочков	д-р техн. наук, профессор, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Белоруссия
Марек Мезитис	д-р наук, доцент, Рижский технический университет, Рига, Латвия
Раймунд Убар	д-р техн. наук, академик Эстонской академии наук, Таллинский технический университет, Таллин, Эстония
Владимир Хаханов	д-р техн. наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина
Фуниан Ху	д-р наук, профессор, Школа электротехники педагогического университета Цзянсу, Сюйчжоу, Китай
Христо Христов	д-р техн. наук, профессор, Технический университет, София, Болгария

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL

Alexander Nikitin	D. Sc., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Editor-in-chief of "Transport automation research", St. Petersburg, Russia
Konstantin Bochkov	D. Sc., Professor, Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus
Marek Mezitis	Ph. D., Associate Professor, Riga Technical University, Riga, Latvia
Raimund Ubar	D. Sc., Member of Estonian Academy of Sciences, Tallinn Technical University, Tallinn, Estonia
Vladimir Hahanov	D. Sc., Professor, Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine
Funian Hu	Ph. D., Professor, School of Electrical Engineering of Jiangsu Normal University, Xuzhou City, China
Khristo Khrstov	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. Khodakovskiy	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
Учредитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС), Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»	ЖИВУЧЕСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ <i>Соколов С. В., Швалов Д. В.</i> Решение задачи автономного высокоточного позиционирования железнодорожных подвижных единиц на основе измерения рельсовых токов201 <i>Яшин М. Г., Пантелеев Р. А., Никитин А. Б., Кушпиль И. В.</i> Функционально-морфологическое описание способа восстановления прерванного движения поездов с применением мобильных восстановительных комплексов железнодорожной автоматики, телемеханики и связи.....210
Издатель ООО «Издательский Центр «РИОР» по договору № ЭА78751 от 28.12.2024	ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ <i>Сидоренко В. Г., Грачев Я. Л.</i> Реализация комплексного статистического стегодетектора в рамках интеллектуальных транспортных систем.....226 <i>Федоров В. А., Огородникова О. М.</i> Сегментация объектов техническим зрением в автоматизированных системах управления железнодорожным подвижным составом239
Главный редактор А. Б. Никитин, д-р техн. наук, профессор ПГУПС	АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ <i>Набоков А. С., Булавский П. Е., Марков Д. С.</i> Модель-описание процессов проектирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики250
Редакция журнала Научный редактор — И. В. Кушпиль, канд. техн. наук Перевод — И. Л. Лютомская Литературный редактор и корректор — Н. В. Юдина Верстка — И. Г. Иваньшина	ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ СИСТЕМЫ <i>Ефанов Д. В.</i> Синтез самопроверяемых дискретных устройств с использованием свойств кодов паритета и самодвойственных булевых функций.....264
Адрес учредителя и редакции 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	
Адрес издателя 127214, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1, оф. 402	
Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-61375 от 10.04.2015, выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий 18 декабря 2017 года ISSN 2412-9186 Индекс подписки Агентство «Урал-пресс» 33316 © ФГБОУ ВО ПГУПС, 2025	

Scientific and technical journal "Transport automation research"	CONTENTS
FOUNDER 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	VIABILITY, RELIABILITY, SAFETY <i>Sokolov S. V., Shvalov D. V.</i> Solutions for the Autonomous, High-Precision Positioning of Railway Rolling Stock, Based on Rail Current Measurement201 <i>Yashin M. G., Panteleev R. A., Nikitin A. B., Kushpil I. V.</i> Functional and Morphological Description of the Method for Recovering Disrupted Train Movement Using Mobile Recovery Systems of Railway Automation, Remote Control and Communications210
PUBLISHER "Publishing Center "RIOR", LLC № 78751, 28.12.2024	INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS <i>Sidorenko V. G., Grachev Ya. L.</i> Implementation of a Comprehensive Statistical Steganography Detector Within the Framework of Intelligent Transport Systems226 <i>Fedorov V. A., Ogorodnikova O. M.</i> Object Segmentation Using Machine Vision in Automated Control Systems of Railway Rolling Stock.....239
EDITOR-IN-CHIEF Nikitin A. B., Doctor in Engineering, Professor	DESIGN AUTOMATION <i>Nabokov A. S., Bulavsky P. E., Markov D. S.</i> A Comprehensive Model for Railway Automation and Remote Control Systems Design Processes250
JOURNAL STAFF Science editor: Igor V. Kushpil, Ph. D. English translation: Irina L. Liutomskaia. Editing and proofreading: Nadezhda V. Yudina Layout: Irina G. Ivanshina	TECHNICAL DIAGNOSTICS AND CONTROLLABLE SYSTEMS <i>Efanov D. V.</i> Self-Checking Discrete Device Synthesis Using Parity Code Properties and Self-Duality Boolean Functions264
FOUNDER'S AND EDITORIAL OFFICE ADDRESS 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	
PUBLISHER'S ADDRESS 127214, Russia, Moscow, Polyarnaya str., 31Bc1, of. 402	
MASS MEDIA REGISTRATION CERTIFICATE NUMBER PI № FS77-61375 dd. 10.04.2015 issued by the Federal service for the monitoring of communications, information technologies and mass communications The Journal is included in the Bulletin of leading peer-reviewed scientific journals and publications (18 December, 2017) ISSN 2412-9186 Index Direct Mail Agency "Ural-Press" 33316 © PGUPS, 2025	

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ АВТОНОМНОГО ВЫСОКОТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПОДВИЖНЫХ ЕДИНИЦ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ РЕЛЬСОВЫХ ТОКОВ

СОКОЛОВ Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой¹;
e-mail: s.v.s.888@yandex.ru

ШВАЛОВ Дмитрий Викторович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой²;
e-mail: d_shvalov@mail.ru

¹Московский технический университет связи и информатики, Северо-Кавказский филиал, кафедра «Информатика и вычислительная техника», Ростов-на-Дону

²Ростовский государственный университет путей сообщения, кафедра «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте», Ростов-на-Дону

Приведен обзор известных решений по автономному позиционированию железнодорожных и нежелезнодорожных подвижных единиц. Рассмотрен метод автономного позиционирования, который позволяет с высокой точностью производить вычисление текущей координаты подвижной железнодорожной единицы в пределах участка железной дороги известной длины. Метод основан на анализе измеренных параметров тока, непрерывно протекающего по рельсам, — сигнального тока рельсовых цепей или кодового тока автоматической локомотивной сигнализации, являющегося физической основой реализации алгоритмов функционирования современных устройств обеспечения безопасности движения. Предложенный метод позволяет решать задачу позиционирования подвижных единиц на протяжении всего маршрута их следования по перегонам и станциям без использования спутниковых навигационных систем, что актуально в реальных условиях эксплуатации. Основными преимуществами данного метода позиционирования, помимо высокой точности, являются его простота, отсутствие необходимости установки дополнительной аппаратуры вдоль железнодорожного пути, а также отсутствие необходимости использования дополнительных сигналов в рельсовых цепях. Приведен численный пример, иллюстрирующий высокую точность определения координат подвижных железнодорожных единиц предложенным методом.

Ключевые слова: позиционирование поездов; организация движения поездов; железнодорожная подвижная единица; бортовой измерительно-вычислительный комплекс.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-03-201-209

▼ Введение

Современные тенденции в организации движения поездов, в частности, необходимость увеличения интенсивности движения за счет сокращения межпоездных интервалов [1], а также необходимость составления и реализации оптимальных с точки зрения энергозатрат графиков перевозочного процесса [2, 3] определяют постоянный рост требований к повышению точности позиционирования подвижных единиц на протяжении всего маршрута их следования по перегонам и станциям. Использование спутниковых навигационных систем (СНС) для высокоточного решения этой задачи не всегда возможно в реальных условиях эксплуатации в связи с:

- неработоспособностью СНС в туннелях, в условиях горного рельефа, при высоком уровне атмосферных помех, при многократных отражениях и т.п.;
- необходимостью создания сложной сети дифференциальных поправок для повышения точности до требуемого уровня;
- зависимостью точности СНС от конфигурации наблюдаемой спутниковой группировки и особенностей работы каждого спутника, а также влияния помех при прохождении спутниковых сигналов через тропосферу и ионосферу и динамики объекта. Подобные обстоятельства делают чрезвычайно актуальной проблему разработки автономных методов точного позиционирования

подвижных единиц железнодорожного транспорта, причем по возможности на основе использования уже существующих устройств железнодорожной инфраструктуры.

1. Обзор известных решений по автономному позиционированию подвижных единиц железнодорожного транспорта

В настоящее время на сети железных дорог наиболее распространенными безопасными и надежными устройствами позиционирования подвижных единиц являются рельсовые цепи [4, 5], каждая из которых обеспечивает контроль состояния («свободен» или «занят») участка пути конечной длины. Длины применяемых рельсовых цепей варьируются в зависимости от их типа и составляют от 100 до 2600 м. Для обеспечения безопасности движения поездов (подвижных единиц) в системах управления достаточно определять местоположение каждой подвижной единицы с точностью до занимаемого участка пути. Но для обеспечения минимально допустимых интервалов попутного следования необходима точность позиционирования, равная (и выше) точности, обеспечиваемой при использовании только валидных измерений СНС, причем в дифференциальном режиме (то есть в субметровом диапазоне).

В основе известных разработанных алгоритмов позиционирования железнодорожных подвижных единиц, не использующих спутниковые навигационные системы, и устройств, их реализующих, лежит анализ измеренных значений параметров тока, протекающего по рельсам и колесным парам подвижных единиц в процессе их движения.

Так, например, в известном устройстве для определения местоположения рельсового транспортного средства расстояние от точки подключения аппаратуры к рельсовой линии до подвижной единицы, шунтирующей рельсовую линию своими колесными парами, определяется по результатам измерения времени между излучением (подачей в рельсовую линию) и приемом зондирующего сигнала (пат. SU 1162653 А, В61L 25/02. Авторы: Ю. А. Бакулин (SU), Ю. А. Ерохин (SU); 21.11.83). Недостатками

данного устройства являются: необходимость формирования и передачи в рельсовую линию дополнительных сигналов; непосредственное подключение к рельсовой линии контрольно-измерительной аппаратуры, не входящей в состав рельсовой цепи.

Известно также устройство для контроля местоположения подвижного состава по результатам восприятия передаваемого с него сигнала (пат. SU 1219441 А, В61L 25/02. Авторы: О. П. Мерсон (SU), К. Г. Павлов (SU), В. Н. Лысач (SU) и И. И. Шитов (SU); 23.03.86). Серьезными недостатками данного устройства являются: необходимость формирования и передачи сигналов в дополнительно укладываемый вдоль пути шлейф; недостаточная точность определения местоположения подвижного состава (точность до зоны укладки (длины) шлейфа).

Можно еще отметить устройство для определения координаты подвижного объекта по результатам анализа параметров сигналов, наводимых в индуктивной линии (пат. SU 1252223 А1, В61L 3/20, G08C 21/00. Авторы: М. А. Шевандин (SU), А. В. Волков (SU) и А. В. Крупеник (SU); 23.08.86). Традиционными недостатками данного устройства являются: необходимость формирования и передачи сигналов в дополнительно укладываемую вдоль пути индуктивную линию; определение местоположения подвижного состава с точностью до зоны укладки (длины) индуктивной линии.

В завершение обзора следует также упомянуть устройство для определения расстояния между двумя подвижными единицами по результатам измерения времени прохождения сигналов по рельсовой линии (пат. SU 1137001 А, В61L 23/18. Автор: Ю. А. Ерохин (SU); 30.01.85). Недостатком данного устройства является необходимость формирования и передачи в рельсовую линию дополнительных сигналов.

На зарубежных железных дорогах наибольшее распространение получил способ позиционирования подвижных единиц на основе использования так называемых «бализ», установленных в определенных точках пути [6].

Сущность этого способа заключается в следующем:

- при помощи установленной на подвижной единице аппаратуры фиксируется прохождение «бализы»;
- рассчитывается пройденное от места установки «бализы» расстояние.

Основным недостатком такого способа является необходимость установки дополнительных устройств вдоль рельсовой линии.

В статье [7] описана методика определения координаты подвижной единицы на участке пути по изменению входного сопротивления рельсовой линии. Недостатком предложенной методики является наличие погрешности, составляющей до 10 % от длины рельсовой линии, что обусловлено необходимостью использования в расчетах точного значения сопротивления поездного шунта.

На станциях может быть применен предложенный в статье [8] способ позиционирования, основанный на использовании цифровой модели, которая представляет собой описание элементов путевого развития — путей, стрелок, изолированных участков, то есть объектов, координаты которых не изменяются в выбранной системе координат. На перегонах такой способ позиционирования неприменим в связи с отсутствием путевого развития.

2. Обзор известных решений по автономному позиционированию нежелезнодорожных подвижных единиц

В статье [9] рассмотрена реализация автономного позиционирования с использованием видеопозиционирования с привязкой к известным изображениям стационарных объектов, расположенных в зоне движения (для урбанизированной местности), и динамической радионавигации (для открытой и слабопересеченной местности). Недостатком видеопозиционирования является существенная зависимость качества обработки изображений от характеристик окружающей среды, что требует использования сложных многоступенчатых алгоритмов обработки изображений. Реализация радионавигации предполагает установку приемопередающих устройств как на подвижных единицах, так и в опорных точках с известными координатами.

Метод позиционирования с использованием магнитных датчиков, которые

устанавливаются на транспортных средствах и фиксируют электромагнитные поля с известными параметрами от стационарных объектов с известным местоположением, рассмотрен в монографии [10] и статье [11]. В [10] качестве таких объектов выбраны линии электропередачи (ЛЭП), проходящие вблизи или пересекающие траекторию движения транспортного средства. Ограничение для применения такого способа позиционирования железнодорожных подвижных единиц обусловлено расположением ЛЭП относительно железнодорожного пути: пересечение путей и ЛЭП энергосистемы страны встречается редко, а линии электрооборудования объектов инфраструктуры расположены вдоль путей.

Акустическое позиционирование [12] позволяет определить взаимное расположение в пространстве рассредоточенных объектов на основании анализа совокупности параметров сигналов (время распространения сигналов между транспондерами), передаваемых с каждого объекта. Такой способ применим для группы объектов, находящихся на сравнительно небольших расстояниях друг от друга, и при отсутствии препятствий для распространения акустических сигналов.

Позиционирование подвижной единицы по радиосигналам от других объектов, описанное в статье [13], позволяет определить взаимное расположение нескольких подвижных объектов. Зависимость эффективности такого способа позиционирования от параметров среды распространения радиосигналов существенно ограничивает его использование на железнодорожном транспорте.

Предложенный в статье [14] способ позиционирования на основе оценки мощности (уровней) принимаемых сигналов пригоден только для неподвижных объектов.

3. Алгоритм автономного позиционирования подвижных единиц

Вышеперечисленные недостатки и ограничения по применению приведенных известных способов позиционирования подвижных единиц определяют в качестве одной из основных задач управления железнодорожным транспортом задачу его высокоточного *автономного*

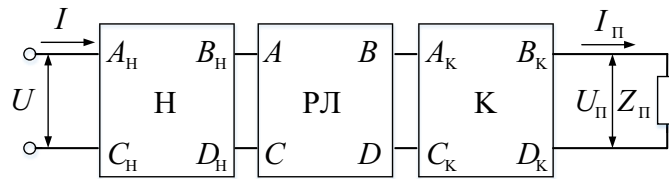


Рис. 1. Обобщенная схема замещения рельсовой цепи

позиционирования — то есть на основе использования только бортовой навигационной аппаратуры и соответствующего математического обеспечения.

В статье предлагается метод решения задачи автономного позиционирования железнодорожных подвижных единиц, основанный на бесконтактном измерении параметров рабочих сигналов рельсовых цепей с использованием бортовой измерительной аппаратуры. В процессе решения принимаем, что значения первичных параметров рельсовых линий, а также всех параметров других элементов рельсовых цепей не изменяются в пределах всего участка, на котором осуществляется позиционирование.

Рассмотрим математическую модель тока, протекающего по рельсам. Основными элементами рельсовой цепи являются источник питания и путевой приемник, подключенные к рельсовой линии. Принцип действия рельсовой цепи состоит в следующем. При свободном контролируемом участке пути ток от источника питания протекает по рельсовой линии к путевому приемнику. Приемник фиксирует свободное состояние участка (отсутствие на участке подвижных единиц). В процессе шунтирования рельсовой линии колесными парами подвижного состава наблюдается существенное снижение амплитуды входного сигнала путевого приемника, что приводит к регистрации занятого состояния контролируемого участка. Функционирование рельсовых цепей в непрерывном режиме обеспечивает постоянное протекание тока по рельсовой линии при корректной работе передающего оборудования и элементов сигнального тракта.

Напряжение U_x и сила тока I_x в любой точке рельсовой линии (на расстоянии x от конца) описываются уравнениями:

$$U_x = U_k \operatorname{ch} \gamma x + I_k Z_B \operatorname{sh} \gamma x,$$

$$I_x = \frac{U_k}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma x + I_k \operatorname{ch} \gamma x,$$

где γ — коэффициент распространения линии (комплексная величина);

Z_B — волновое сопротивление линии (комплексная величина).

Обобщенная типовая схема замещения рельсовой цепи [4] представляет собой последовательное соединение трех четырехполюсников (рис. 1): Н — замещающего аппаратуру входного (относительно источника питания) конца; РЛ — замещающего рельсовую линию; К — замещающего аппаратуру выходного (относительно источника питания) конца.

В схеме (рис. 1) использованы следующие обозначения: U и I — напряжение и сила тока источника питания рельсовой цепи; A_H, B_H, C_H, D_H — коэффициенты четырехполюсника Н; A, B, C, D — коэффициенты четырехполюсника, замещающего рельсовую линию; A_K, B_K, C_K, D_K — коэффициенты четырехполюсника К; $U_{\text{п}}, I_{\text{п}}$ — напряжение и сила тока на входе путевого приемника; $Z_{\text{п}}$ — эквивалентное входное сопротивление путевого приемника.

Напряжения и токи источника питания и на входе путевого приемника связаны выражением:

$$I = C_0 U_{\text{п}} + D_0 I_{\text{п}},$$

где A_0, B_0, C_0 и D_0 — коэффициенты общего четырехполюсника тракта передачи сигнального тока.

При движении подвижной единицы вдоль рельсовой линии через ее колесные пары (по пути «первый рельс — колесо — ось — колесо — второй рельс») протекает ток, сила которого определяется выражением [4]:

$$I = \frac{U}{|Z_{\Pi}|}, \quad (1)$$

где U — выходное напряжение источника тока рельсовой цепи;

$|Z_{\Pi}|$ — модуль сопротивления передачи рельсовой линии.

Сопротивление передачи рельсовой линии определяется как [4]:

$$Z_{\Pi} = K'_{\text{ТН}} [A \cdot R_{\text{Ш}} + B + (C \cdot R_{\text{Ш}} + D) Z'_{\text{ВХН}}], \quad (2)$$

где $K'_{\text{ТН}}$ — обратный коэффициент снижения тока в четырехполюснике Н (см. рис. 1),

$$K'_{\text{ТН}} = A_{\text{Н}};$$

$Z'_{\text{ВХН}}$ — обратное входное сопротивление

четырёхполюсника Н, $Z'_{\text{ВХН}} = \frac{B_{\text{Н}}}{A_{\text{Н}}}$;

$R_{\text{Ш}}$ — сопротивление поездного шунта.

Коэффициенты A , B , C , D определяются известными выражениями:

$$A = D = \text{ch } \gamma l; \quad C = \frac{\text{sh } \gamma l}{Z_{\dot{A}}}; \quad B = Z_{\dot{A}} \text{sh } \gamma l,$$

где l — длина рельсовой линии.

Для последующего решения задачи позиционирования подставим в (1) выражения для составляющих формулы (2), одновременно заменив l на x (x — расстояние от колесной пары до конца рельсовой линии длины l , расположенной под известным азимутальным углом A относительно местного меридиана и имеющей известные координаты $X_{\text{К}}$, $Y_{\text{К}}$ конца рельсовой линии в двумерной декартовой системе координат). В результате данной подстановки получим выражение для амплитудного значения силы тока I :

$$I = \frac{U}{|K_1 \cdot \text{ch } \gamma x + K_2 \cdot \text{sh } \gamma x|}, \quad (3)$$

где $K_1 = A_{\text{Н}} \cdot R_{\text{Ш}} + B_{\text{Н}}$; $K_2 = Z_{\text{В}} \cdot A_{\text{Н}} + \frac{R_{\text{Ш}} \cdot B_{\text{Н}}}{Z_{\text{В}} \cdot A_{\text{Н}}}$.

Учитывая комплексный характер величин K_1 , K_2 и γ ($\gamma = \alpha + j\beta$), запишем выражение (3) как

$$I = \frac{U}{|(K_{1a} + jK_{1b}) \text{ch}(\alpha + j\beta)x + (K_{2a} + jK_{2b}) \text{sh}(\alpha + j\beta)x|}.$$

В этом случае сила тока, протекающего через колесную пару, определяется выражением:

$$I = \frac{2U}{\sqrt{pe^{2\alpha x} + qe^{-2\alpha x} + s \cdot \cos(2\beta x) + r \cdot \sin(2\beta x)}},$$

где $p = (K_{1a} + K_{2a})^2 + (K_{1b} + K_{2b})^2$;

$$q = (K_{1a} - K_{2a})^2 + (K_{1b} - K_{2b})^2;$$

$$s = 2[(K_{1a}^2 - K_{2a}^2) + (K_{1b}^2 - K_{2b}^2)],$$

или

$$I = \frac{2U}{\sqrt{pe^{2\alpha x} + qe^{-2\alpha x} + w \cdot \sin(2\beta x + v)}}, \quad (4)$$

где $w = \sqrt{s^2 + r^2}$; $v = \tan^{-1} \frac{s}{r}$.

Нелинейное уравнение (4) решается с использованием известных итеративных методов, например путем предварительного умножения обеих частей выражения на знаменатель с последующим возведением в квадрат и использованием метода Ньютона — Рафсона [15]:

$$pe^{2\alpha x} + qe^{-2\alpha x} + w \cdot \sin(2\beta x + v) - \frac{4U^2}{I^2} = 0. \quad (5)$$

Так как начальное значение x известно точно ($x = l$), то данный алгоритм сходится за 2–4 шага (см. пример), что обеспечивает определение координаты x практически в реальном времени. После определения значения x рассчитываются текущие проекции расстояния колесной пары от конца рельсовой линии на оси двумерной декартовой системы координат по формулам:

$$x_t = x \cdot \sin A, \quad y_t = x \cdot \cos A,$$

и окончательно — текущие координаты колесной пары подвижной единицы в двумерной декартовой системе координат по формулам:

$$X_t = X_{\text{К}} - x \cdot \sin A, \quad Y_t = Y_{\text{К}} - x \cdot \cos A.$$

При прохождении колесной парой конца рельсовой линии, определяемого по

измеренному значению известной амплитуды тока, текущие координаты полагаются равными $X_t = X_K$, $Y_t = Y_K$, что обнуляет возможные ошибки определения текущих координат колесной пары в конце каждой рельсовой линии и наряду с приведенным выше определением ее текущих координат обеспечивает точное позиционирование подвижной единицы в пределах участка железнодорожного пути известной (конечной) длины.

4. Структура бортового измерительно-вычислительного комплекса автономного позиционирования подвижных единиц

Вариант структурной схемы бортового измерительно-вычислительного комплекса (БИВК), осуществляющего автономное позиционирование подвижной единицы, показан на рис. 2. Практическая реализация компонентов такого комплекса может быть осуществлена на базе типовых локомотивных устройств безопасности, широко применяющихся на сети железных дорог.

БИВК обеспечивает бесконтактное измерение параметров сигнала с оси колесной пары. Конструктивно система включает три основных блока, размещенных внутри корпуса подвижной единицы:

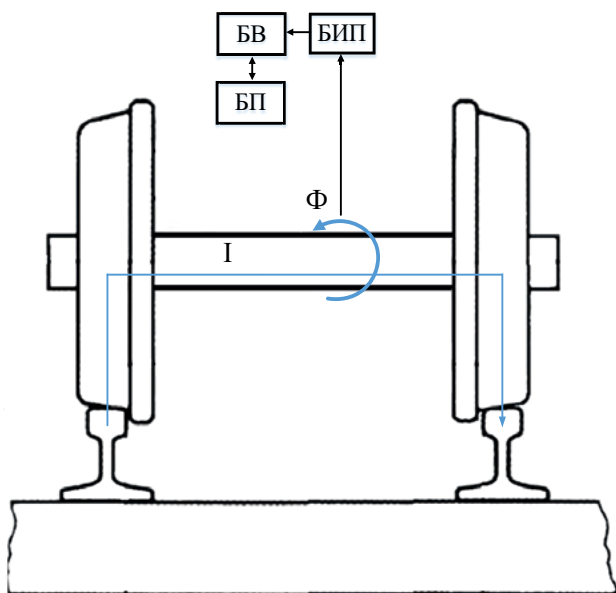


Рис. 2. Структурная схема бортового измерительно-вычислительного комплекса автономного позиционирования подвижных единиц

- измерительно-преобразовательный блок (БИП);
- вычислительный блок (БВ);
- блок памяти (БП), содержащий электронную карту маршрута.

В свою очередь, в состав блока БИП входят индуктивный датчик, полосовой фильтр, настроенный на частоту тока рельсовой цепи или автоматической локомотивной сигнализации, интегратор и аналого-цифровой преобразователь.

Работа БИВК организована следующим образом. Переменный ток, протекающий по оси колесной пары, создает переменное магнитное поле, магнитный поток которого определяется как $\Phi(t) = LI(x)\sin\omega t$, где L — известный масштабный коэффициент, определяемый величиной индуктивности цепи протекания тока; ω — частота тока рельсовой цепи. Данное магнитное поле наводит в катушке

индуктивности датчика ЭДС $\varepsilon = -k \frac{d\Phi(t)}{dt}$, где

k — известный масштабный коэффициент, определяемый параметрами катушки индуктивности датчика. После необходимых преобразований в блоке БИП (полосовая фильтрация, интегрирование и аналого-цифровое преобразование) сигнал, пропорциональный текущему значению $\Phi(t)$, поступает в вычислительный блок, где относительно переменной x в реальном масштабе времени решается нелинейное уравнение (5).

При реализации измерительно-вычислительного комплекса по любому из двух рассмотренных вариантов информация о контролируемых участках пути (длина рельсовой линии, координаты ее конца X_K , Y_K и азимутальный угол A наклона рельсового пути), размещенная в виде электронной карты в блоке памяти, перед началом движения считывается в вычислительный блок. Вычислительный блок также обращается к блоку памяти для получения необходимых данных об азимутальном угле A , длине рельсовой линии и координатах X_K , Y_K ее конца в случае перезапуска.

5. Пример

Для иллюстрации возможности эффективного использования предложенного метода

Таблица 1

№ итерации	x_n	$f(x_n)$	$f'(x_n)$	$ f(x_n) $	$ x_{n+1} - x_n $
0	1,9	-189 395,3199620799641943	$1,79850692241005929798 \cdot 10^6$	189 395,31996208	—
1	2,0053069730242038	10 220,2498283339846092	$1,9958671867855493643 \cdot 10^6$	10 220,24982833	0,105306973024204
2	2,00018626664854849	25,7675789641212683	$1,9858112018576206966 \cdot 10^6$	25,76757896	0,005120706375655
3	2,0001732908032415	0,0001649228215724	$1,9857857816222007647 \cdot 10^6$	0,00016492	0,000012975845307

автономного позиционирования рассмотрим следующий пример.

Для рельсовой цепи длиной $l = 2,5$ км с параметрами [4] $z_p = 0,5e^{j52^\circ}$ Ом, $\gamma = 0,745e^{j26^\circ}$ 1/км, $z_b = 0,67e^{j26^\circ}$ Ом, $A_H = 34,776e^{-j16^\circ 57'}$, $B_H = 9,38e^{j3^\circ 38'}$, $U = 150$ В при $R_{ш} = 0,03$ Ом, коэффициенты K_1 и K_2 из выражения (3) имеют значения

$$K_1 = -8,6201 - j3,4139,$$

$$K_2 = -21,6748 + j8,5382,$$

а коэффициенты уравнения (5) принимают следующие значения:

$$s = 965,7138; r = 590,3829; v = 58,56;$$

$$w = 1131,8812; p = 303\,197,8054; q = 160\,164,0878;$$

$$\alpha = 0,4819; \beta = 0,5681.$$

Уравнение вида (5)

$$303\,197,8 \exp(0,9638x) + 160\,164,1 \exp(-0,9638x) + 1131,9 \sin(1,1362x + 58,56) - (90\,000 : l^2) = 0$$

решалось относительно текущей координаты подвижной единицы x при различных значениях l методом Ньютона — Рафсона в программной среде *Mathforyou.net*¹. Значения x определялись с шагом 0,1 км с точностью $\varepsilon = 0,001$. В качестве начального приближения на текущем временном шаге использовалось значение координаты x , полученное на предыдущем временном шаге. На всем интервале моделирования сходимость к истинному решению с точностью до 1 м обеспечивалась за 3 итерации (табл. 1) при использовании в качестве останова вычислений как приращения ($|x_{n+1} - x_n| < \varepsilon$), так и отличия функции от нуля ($|f(x_n)| < \varepsilon$), что иллюстрирует высокую точность позиционирования с использованием предложенного

Таблица 2

x , км (фактическое)	l , А	x , км (рассчитанное)	Погрешность, м
0	0,4402	0	0
0,1	0,4329	0,0998	0,2
0,5	0,3904	0,5001	0,1
1,0	0,3242	1,0004	0,4
1,5	0,2607	1,5001	0,1
2,0	0,2067	2,0001	0,1
2,5	0,1630	2,5000	0

подхода и возможность его реализации в реальном масштабе времени. Фактические и рассчитанные значения x для рассматриваемого примера приведены в табл. 2.

Заключение

Предложенный метод автономного позиционирования характеризуется субметровой точностью определения координат подвижной единицы в пределах железнодорожного участка известной длины, оборудованного рельсовыми цепями любого типа. Принцип работы базируется на анализе параметров тока рельсовой цепи, который является фундаментальной основой функционирования современных систем обеспечения безопасности движения. Основными преимуществами данного метода позиционирования, помимо высокой точности, являются его простота, отсутствие необходимости установки дополнительной аппаратуры вдоль железнодорожного пути, а также использования в рельсовых цепях дополнительных сигналов. Для практической реализации метода необходимо предусмотреть механизмы автоматической корректировки принимаемых в расчетах значений параметров рельсовой линии при их изменении. При

¹ URL: <https://mathforyou.net/online/numerical/newton/>

этом влияние изменений значений параметров рельсовых цепей на точность расчетов требует дополнительных экспериментальных и практических исследований. Для дополнительного повышения помехоустойчивости каналов связи БИВК могут быть применены известные способы помехоустойчивого кодирования сигналов [16]. Метод позиционирования предлагается использовать в качестве резервного канала получения данных о местоположении подвижного состава, в частности в системах технического зрения [17], в спутниковых навигационных системах при отсутствии устойчивого сигнала. ▲

Список источников

1. Розенберг Е. Н. Комплексный подход к решению задачи повышения пропускной способности / Е. Н. Розенберг, А. В. Озеров, И. А. Панферов // Автоматика, связь, информатика. — 2022. — № 8. — С. 2–6. — DOI: <https://doi.org/10.34649/AT.2022.8.8.001>.
2. Баранов Л. А. Энергоэффективные алгоритмы централизованного управления движением поездов при компенсируемых возмущениях в интеллектуальных системах управления внеуличного транспорта / Л. А. Баранов, Е. П. Балакина, Л. Н. Логинова // Материалы Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные транспортные системы», Москва, 26 мая 2022. — М.: РУТ (МИИТ), 2022. — С. 49–53. — URL: <https://elibrary.ru/WCEWQQ>.
3. Баранов Л. А. Планирование движения поездов в интеллектуальных транспортных системах / Л. А. Баранов, А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Надежность. — 2022. — Т. 22. — № 3. — С. 35–43. — DOI: <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-3-35-43>.
4. Брылеев А. М. Теория, устройство и работа рельсовых цепей / А. М. Брылеев, А. В. Шишляков, Ю. А. Кравцов. — М.: Транспорт, 1978. — 344 с.
5. Anders E. Railway Signalling & Interlocking: international Compendium, 2-nd Edition / E. Anders, T. Berndt, I. Dolgij et al.; ed. S. V. Vlasenko, G. Theeg. — Hamburg: PMC Media House GmbH, 2018. — 456 p. — URL: <https://elibrary.ru/QGVDEZ>.
6. Irlík M. Linear positioning of railway objects / M. Irlík // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. — 2016. — Iss. 95. — Pp. 49–57. — DOI: <https://doi.org/10.20858/sjstst.2017.96.5>.
7. Лунев С. А. Применение аппарата конформных отображений для непрерывного контроля координаты подвижной единицы на пути / С. А. Лунев, С. С. Сероштанов, М. М. Соколов, А. Г. Ходкевич // Известия Транссиба. — 2014. — № 1. — С. 94–99. — URL: <https://elibrary.ru/SAEOMV>.
8. Долганюк С. И. Повышение точности навигационного решения при позиционировании маневровых локомотивов за счет использования цифровых моделей путевого развития / С. И. Долганюк // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2010. — № 2. — С. 46–50. — URL: <https://elibrary.ru/NCRQQP>.
9. Кириллов С. Н. Комплекс позиционирования роботов на основе систем технического зрения и автономной видео- и радионавигации / С. Н. Кириллов, В. М. Бердников, И. В. Косткин, Э. В. Акопов и др. // Радиотехника. — 2016. — № 8. — С. 110–116. — URL: <https://elibrary.ru/WWQTHX>.
10. Желамский М. В. Электромагнитное позиционирование подвижных объектов: монография / М. В. Желамский. — М.: Физматлит, 2013. — 320 с.
11. Степанов Д. В. Программно-аппаратный комплекс автономного позиционирования мобильных робототехнических систем специального назначения / Д. В. Степанов, Д. А. Ишутин // Сборник докладов II Всероссийского форума научной молодежи «Богатство России», Москва, 10–11 декабря 2018. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ), 2019. — С. 96–98. — URL: <https://elibrary.ru/ZBNDDN>.
12. Максимов Г. А. Результаты морских испытаний программно-аппаратного комплекса акустического позиционирования буксируемых сейсмоков / Г. А. Максимов, А. Г. Григорьев, З. А. Корольков, В. Н. Коновалов и др. // Сборник трудов XXXIV сессии Российского акустического общества. — М.: ГЕОС, 2022. — С. 439–446. — DOI: <https://doi.org/10.34756/GEOS.2021.17.38116>.
13. Корогодин И. В. Определение взаимной ориентации и положения транспортных средств с помощью DSRC сигналов / И. В. Корогодин, В. В. Днепров // Радиотехника. — 2017. — № 11. — С. 9–21. — URL: <https://elibrary.ru/YPKGRL>.
14. Восков Л. С. Позиционирование датчиков беспроводной сенсорной сети как способ энергосбережения / Л. С. Восков, М. М. Комаров // Датчики и системы. — 2012. — № 1(152). — С. 34–38. — URL: <https://elibrary.ru/ONZZOD>.
15. Самарский А. А. Численные методы / А. А. Самарский, А. В. Гулин. — М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. — 432 с.
16. Краснюк А. А. Помехоустойчивое кодирование в системах сбора и обработки потоковых данных / А. А. Краснюк, А. Г. Прозорова // Датчики и системы. — 2021. — № 5. — С. 30–35. — DOI: <https://doi.org/10.25728/datsys.2021.5.6>.
17. Баранов Л. А. Погрешности измерения расстояния до препятствия средствами технического зрения в беспилотных системах управления движением поездов / Л. А. Баранов, П. Ф. Бестемьянов, Е. П. Балакина, А. Л. Охотников // Мир транспорта. — 2021. — Т. 19. — № 6(97). — С. 6–12. — DOI: <https://doi.org/10.30932/19923252-2021-19-6-1>.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 3, pp. 201–209
DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-03-201-209

Solutions for the Autonomous, High-Precision Positioning of Railway Rolling Stock, Based on Rail Current Measurement

Information about authors

Sokolov S. V., Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department.
E-mail: s.v.s.888@yandex.ru

Shvalov D. V., PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department.
E-mail: d_shvalov@mail.ru

¹Moscow State Technical University of Communications and Informatics, North Caucasus Branch, "Informatics and Computer Science" Department, Rostov-on-Don

²Rostov State Transport University, "Railway Automation and Remote Control" Department, Rostov-on-Don

Abstract: The following paper will provide a comprehensive overview of the available solutions for autonomous positioning of railway and non-railway rolling stock. The paper sets out a method of autonomous positioning of railway transport that allows the real-time coordinates of any moving railway unit on a railway section of known length to be calculated with high accuracy. The method is predicated on the analysis of the measured rail current parameters. These may be either the track circuit signal current or the code current of automatic locomotive signalling. This method will ensure the physical implementation of the algorithms of modern device functionality, thus ensuring traffic safety. The proposed method facilitates the issue of positioning moving rolling stock throughout their entire route, including sections and stations, in the absence of satellite navigation systems, a crucial consideration in real-time operating conditions. The primary benefits of this method of positioning, in addition to its high accuracy, are its simplicity and the absence of the need for additional equipment along the railway bed and supplementary signals in the track circuits. A numerical example is provided to illustrate the high accuracy of determining the coordinates of moving railway units using the proposed method.

Keywords: autonomous rolling stock positioning; railway rolling units; on-board measuring and computing system.

References

- Rozenberg E. N., Ozerov A. V., Panferov I. A. Kompleksnyy podkhod k resheniyu zadachi povysheniya propusknoy sposobnosti [Complex approach to solving the problem of increasing capacity]. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, communication, informatics]. 2022, Iss. 8, pp. 2–6. DOI: <https://doi.org/10.34649/AT.2022.8.8.001>. (In Russian)
- Baranov L. A., Balakina E. P., Loginova L. N. Energoeffektivnyye algoritmy tsentralizovannogo upravleniya dvizheniya poezdov pri kompensiruemyykh vozmushcheniyakh v intellektual'nykh sistemakh upravleniya vneulichnogo transporta [Energy-efficient algorithms for centralized train traffic control with compensable disturbances in intelligent off-street transport control systems]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Intellektual'nye transportnye sistemy"*, Moskva, 26 maya 2022 [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Intelligent Transport Systems", Moscow, May 26, 2022]. Moscow: RUT (MIIT) Publ., 2022, pp. 49–53. Available at: <https://elibrary.ru/WCEWQQ>. (In Russian)
- Baranov L. A., Safronov A. I., Sidorenko V. G. Planirovaniye dvizheniya poezdov v intellektual'nykh transportnykh sistemakh [Train traffic planning in intelligent transport systems]. *Nadezhnost'* [Reliability]. 2022, vol. 22, Iss. 3, pp. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-3-35-43>. (In Russian)
- Bryleev A. M., Shishlyakov A. V., Kravtsov Yu. A. *Teoriya, ustroystvo i rabota rel'sovykh tsepey* [Theory, design and operation of track circuits]. Moscow: Transport Publ., 1978, 344 p. (In Russian)
- Anders E., Berndt T., Dolgij I. et al. Railway Signalling & Interlocking: international Compendium, 2nd Edition. Ed. by S. V. Vlasenko, G. Theeg. Hamburg: PMC Media House GmbH, 2018, 456 p. Available at: <https://elibrary.ru/QGVDEZ>.
- Irluk M. Linear positioning of railway objects. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2016, Iss. 95, pp. 49–57. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjstut.2017.96.5>.
- Lunev S. A., Seroshtanov S. S., Sokolov M. M., Khodkevich A. G. Primeneniye apparata konformnykh otobrazheniy dlya nepreryvnogo kontrolya koordinaty podvizhnoy edinitsy na puti [Application of conformal mapping apparatus for continuous monitoring of mobile unit coordinate on track]. *Izvestiya Transsiba* [Transsib News]. 2014, Iss. 1, pp. 94–99. Available at: <https://elibrary.ru/SAEOMV>. (In Russian)
- Dolganyuk S. I. Povysheniye tochnosti navigatsionnogo resheniya pri pozitsionirovaniy manevrovyykh lokomotivov za schet ispol'zovaniya tsifrovyykh modeley putevogo razvitiya [Improving the accuracy of navigation solution when positioning shunting locomotives using digital track development models]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tehnicheskii zhurnal)* [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)]. 2010, Iss. 2, pp. 46–50. Available at: <https://elibrary.ru/NCRQQP>. (In Russian)
- Kirillov S. N., Berdnikov V. M., Kostkin I. V., Akopov E. V. et al. Kompleks pozitsionirovaniya robotov na osnove sistem tekhnicheskogo zreniya i avtonomnoy video- i radionavigatsii [Robot positioning complex based on technical vision systems and autonomous video and radio navigation]. *Radiotekhnika* [Radio Engineering]. 2016, Iss. 8, pp. 110–116. Available at: <https://elibrary.ru/WWQTHX>. (In Russian)
- Zhelamskiy M. V. *Elektromagnitnoye pozitsionirovaniye podvizhnykh ob'ektov: monografiya* [Electromagnetic positioning of moving objects: monograph]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2013, 320 p. (In Russian)
- Stepanov D. V., Ishutin D. A. Programmno-apparatnyy kompleks avtonomnoy pozitsionirovaniya mobil'nykh robototekhnicheskikh sistem spetsial'nogo naznacheniya [Software and hardware complex for autonomous positioning of special-purpose mobile robotic systems]. *Sbornik dokladov II Vserossiyskogo foruma nauchnoy molodezhi "Bogatstvo Rossii"*, Moskva, 10–11 dekabrya 2018 [Collection of reports of the II All-Russian Forum of Scientific Youth "Wealth of Russia", Moscow, December 10–11, 2018]. Moscow: MGTU im. N. E. Baumana (NIU) Publ., 2019, pp. 96–98. Available at: <https://elibrary.ru/ZBNDDN>. (In Russian)
- Maksimov G. A., Grigor'ev A. G., Korol'kov Z. A., Konovalov V. N. et al. Rezul'taty morskikh ispytaniy programmno-apparatnogo kompleksa akusticheskogo pozitsionirovaniya buksiruemykh seismok [Results of sea trials of the acoustic positioning system for towed seismic cables]. *Sbornik trudov XXXIV sessii Rossiyskogo akusticheskogo obshchestva* [Collection of works of the XXXIV session of the Russian Acoustic Society]. Moscow: GEOS Publ., 2022, pp. 439–446. DOI: <https://doi.org/10.34756/GEOS.2021.17.38116>. (In Russian)
- Korogodin I. V., Dneprov V. V. Opreделение vzaimnoy orientatsii i polozheniya transportnykh sredstv s pomoshch'yu DSRC signalov [Determination of mutual orientation and position of vehicles using DSRC signals]. *Radiotekhnika* [Radio Engineering]. 2017, Iss. 11, pp. 9–21. Available at: <https://elibrary.ru/YPKGRG>. (In Russian)
- Voskov L. S., Komarov M. M. Pozitsionirovaniye datchikov besprovodnoy sensornoy seti kak sposob energosberezheniya [Positioning of wireless sensor network sensors as an energy saving method]. *Datchiki i sistemy* [Sensors and Systems]. 2012, Iss. 1(152), pp. 34–38. Available at: <https://elibrary.ru/ONZZOD>. (In Russian)
- Samarskiy A. A., Gulina A. V. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow: Nauka, Gl. red. fiz.-mat. lit. Publ., 1989, 432 p. (In Russian)
- Krasnyuk A. A., Prozorova A. G. Pomekhoustoychivoye kodirovaniye v sistemakh sbora i obrabotki potokovykh dannykh [Noise-resistant coding in data acquisition and processing systems]. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2021, Iss. 5, pp. 30–35. DOI: <https://doi.org/10.25728/datsy.2021.5.6>. (In Russian)
- Baranov L. A., Bestem'yanov P. F., Balakina E. P., Okhotnikov A. L. Pogreshnosti izmereniya rasstoyaniya do prep'yatstviya sredstvami tekhnicheskogo zreniya v bespilotnykh sistemakh upravleniya dvizheniem poezdov [Measurement errors of distance to obstacles using technical vision in unmanned train control systems]. *Mir transporta* [World of transport]. 2021, vol. 19, Iss. 6(97), pp. 6–12. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-6-1>. (In Russian)

ФУНКЦИОНАЛЬНО-МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СПОСОБА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРЕРВАННОГО ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОБИЛЬНЫХ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНИКИ И СВЯЗИ

ЯШИН Михаил Геннадьевич, канд. техн. наук, доцент, доцент¹; e-mail: maikl771@rambler.ru

ПАНТЕЛЕЕВ Роман Анатольевич, канд. техн. наук, доцент¹; e-mail: pantel98@mail.ru

НИКИТИН Александр Борисович, д-р техн. наук, профессор, профессор²; e-mail: nikitin@crtc.spb.ru

КУШПИЛЬ Игорь Васильевич, канд. техн. наук, доцент²; e-mail: i_kushpil@mail.ru

¹Военный институт (Железнодорожных войск и военных сообщений) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева, кафедра «Восстановления устройств автоматики, телемеханики и связи на железных дорогах», Петергоф

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

Статья посвящена исследованию и разработке методики применения мобильных восстановительных комплексов железнодорожной автоматики, телемеханики и связи для оперативного восстановления прерванного движения поездов после чрезвычайных ситуаций как в мирное, так и в военное время. Рассматриваются особенности современных существующих и перспективных мобильных восстановительных комплексов, их преимущества и недостатки, а также предлагаются подходы к повышению устойчивости и надежности функционирования железнодорожного транспорта в условиях чрезвычайных ситуаций. Особое внимание уделяется вопросам эффективности функционирования мобильных восстановительных комплексов железнодорожной автоматики, телемеханики и связи, их мобильности, автономности и возможности адаптации к различным ситуациям. Предлагается методика эффективного применения таких комплексов, основанная на последовательности действий при подготовке, развертывании и завершении аварийно-восстановительных работ и направленная на повышение оперативности и эффективности восстановления прерванного движения поездов.

Ключевые слова: инфраструктура железнодорожного транспорта; устройства железнодорожной автоматики и телемеханики; чрезвычайные ситуации; восстановление движения поездов; мобильный восстановительный комплекс; оперативность восстановления.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-03-210-225

▼ Введение

Железнодорожный транспорт (ЖДТ) является составной частью единой транспортной системы РФ. От состояния и качества работы ЖДТ зависят не только перспективы дальнейшего социально-экономического развития, но также возможности государства эффективно выполнять такие важнейшие функции, как защита национального суверенитета и безопасности страны. ЖДТ призван своевременно и качественно обеспечивать потребности физических лиц, юридических лиц и государства в перевозках, а также способствовать созданию условий для развития экономики и

обеспечения единства экономического пространства на территории РФ.

Одним из основных принципов стабильной работы ЖДТ является строгое соблюдение безопасности движения поездов при обеспечении эффективности перевозок, которая зависит от пропускной и провозной способности железнодорожных направлений. Для обеспечения заданных размеров перевозок и высокой пропускной способности, а также существенной степени безопасности движения поездов применяются системы и устройства железнодорожной автоматики, телемеханики и связи (ЖАТ), полноценное функционирование ЖДТ без них

невозможно. В то же время ЖДТ подвержен воздействию чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного, техногенного и биолого-социального характера, которые наносят ущерб железнодорожному хозяйству, снижают уровень безопасности перевозок, ухудшают качество предоставляемых услуг населению и бизнесу, создают финансовые потери государству и операторам транспортных компаний.

Для минимизации последствий ЧС важно развивать механизмы оперативного реагирования на возникающие угрозы, укрепляя устойчивость инфраструктуры ЖДТ и повышая готовность восстановительных систем. Вследствие этого определяющее значение играет оперативность восстановления системы ЖАТ, так как длительность цикла восстановления в зависимости от складывающейся обстановки и степени (объема) разрушений может составлять до нескольких суток, что скажется на эффективности работы ЖДТ.

Восстановление системы ЖАТ после воздействия ЧС возможно по трем принципиальным решениям (способам) [1, 2]:

- восстановление существующей системы ЖАТ;
- переход на другие (более простые) системы ЖАТ;
- монтаж взамен разрушенных устройств типовых инвентарных комплексов (комплектов).

Первое решение может быть принято при незначительном разрушении объекта инфраструктуры ЖДТ и частичном разрушении устройств ЖАТ, а также при наличии аварийно-восстановительного запаса и квалифицированных специалистов.

По второму решению выходит так, что если заранее договориться о переводе станций или участков дорог на упрощенную систему, то это означает вынужденное согласие со снижением размеров движения, срывом плана перевозок и необходимостью привлечения дополнительного количества персонала на объект инфраструктуры ЖДТ.

По мнению авторов, наилучшим решением остается поддержание существующих высокотехнологичных восстановительных систем управления и своевременное обновление

оборудования для повышения эффективности и надежности ЖДТ.

В [3] для оперативного развертывания управления устройствами (ЖАТ) в случаях повреждений при землетрясениях, взрывах, пожарах, затоплениях и других катаклизмах предлагается использовать мобильные восстановительные комплексы (МВК-ЖАТ).

В данной статье рассмотрены особенности современных МВК-ЖАТ, проанализированы существующие способы восстановления системы ЖАТ с применением МВК-ЖАТ после воздействия ЧС и предложены подходы для повышения устойчивости и надежности функционирования ЖДТ как в мирное, так и военное время.

1. Особенности современных МВК-ЖАТ

МВК-ЖАТ предназначен для решения широкого спектра задач, связанных с обеспечением безопасности движения поездов и оперативной восстановительной деятельностью при возникновении ЧС как в мирное, так и военное время. Основное назначение МВК-ЖАТ заключается в следующем:

- создание временных центров управления движением поездов для обеспечения бесперебойной работы устройств ЖАТ при выходе из строя стационарных систем вследствие аварий, ЧС или иных обстоятельств;
- оперативная проверка и устранение неисправностей в устройствах ЖАТ, включая тестирование и профилактику отказов, что существенно сокращает сроки восстановления прерванного движения поездов;
- поддержка эффективной связи и координации между всеми участниками процесса ликвидации последствий аварий и восстановление нормальных условий работы инфраструктуры ЖДТ;
- постоянный мониторинг выполнения мероприятий по восстановлению, фиксация выполненных работ и передача необходимой информации заинтересованным сторонам.

Исходя из общего предназначения МВК-ЖАТ формируются его ключевые цели, обеспечивающие безопасность и эффективность работы ЖДТ, из которых выводится ряд соответствующих функций, направленных на

Таблица 1. Взаимосвязь ключевых целей с основными функциями и выполняемыми задачами МВК-ЖАТ

Цели МВК-ЖАТ	Основные функции и задачи МВК-ЖАТ	
Обеспечение безопасности движения поездов	Организация временного центра управления	Обеспечение непрерывности транспортного процесса и минимизация негативных последствий ЧС
	Восстановление работоспособности	Оперативное восстановление работоспособности систем и устройств ЖАТ после аварий и повреждений после ЧС или износа
		Монтаж и подключение нового оборудования взамен вышедшего из строя для временного (краткосрочного) восстановления прерванного движения поездов
	Замена и ремонт оборудования	Замена неисправных элементов и целых систем ЖАТ при разрушениях в условиях ЧС, а также мелком и капитальном ремонте или реконструкции
		Наладка и тестирование оборудования после аварийно-восстановительных или ремонтных работ
	Экспресс-диагностика и тестирование	Диагностика состояния устройств ЖАТ с использованием специального оборудования
		Анализ состояния оборудования ЖАТ и выявление скрытых дефектов после воздействия ЧС
Сбор и анализ данных	Оперативное определение отказов, неисправности, отклонений в работе устройств ЖАТ и оценивание масштаба повреждений	
	Учет и анализ результатов диагностических мероприятий и аварийно-восстановительных (ремонтных) работ	
Обеспечение аварийно-восстановительных работ	Организация аварийно-спасательных работ, связи и коммуникации	Быстрое реагирование на аварии и катастрофы, связанные с воздействием ЧС
		Обеспечение надежной связи между различными элементами инфраструктуры ЖДТ
	Координация действий экстренных служб	Согласование работ различных служб и ведомств, участвующих в ликвидации последствий аварии при крупных ЧС
Повышение эффективности эксплуатации устройств ЖАТ	Внедрение новых технологий и материалов	Оперативное восстановление прерванного движения поездов с требуемой пропускной и провозной способностью всего железнодорожного направления (станций, перегонов)
		Монтаж и настройка новых систем ЖАТ, внедряемых в эксплуатацию впервые
		Тестирование и испытание новых систем перед началом их эксплуатации
Обслуживание и профилактика	Оказание содействия в проведении планового технического обслуживания и профилактики устройств ЖАТ для предотвращения отказов и аварий	
Снижение затрат на эксплуатацию	Контроль исполнения мероприятий	Рациональное использование ресурсов и материалов, оптимизация процессов ремонта и обслуживания
		Мониторинг текущих работ по устранению повреждений и контролю исправности вновь введенных в эксплуатацию устройств ЖАТ
		Автоматизация процессов и внедрение цифровых технологий для повышения производительности
Развитие кадрового потенциала	Подготовка и обучение персонала	Организация учебных полигонов и тренажеров для отработки навыков по применению МВК-ЖАТ с проведением тренингов и курсов повышения квалификации
		Создание условий для профессионального роста и карьерного продвижения сотрудников с привлечением молодых специалистов и стажеров
		Поддержка научных исследований и разработок в области восстановления устройств и систем ЖАТ

обеспечение оперативной и качественной работы в условиях воздействия ЧС, а также при ремонте и реконструкции систем и устройств ЖАТ. Цели, функции и задачи МВК-ЖАТ представлены в табл. 1.

Представленные функции с выполняемыми задачами делают МВК-ЖАТ важным инструментом для обеспечения безопасности и стабильности работы инфраструктуры ЖДТ в условиях воздействия ЧС, позволяя оперативно реагировать на сбои в управлении движением поездов.

Особенности МВК-ЖАТ реализуются через совокупность характерных показателей качества и эффективности функционирования, выраженную в показателе обеспечения непрерывности работы железнодорожного направления [4, 5].

Продуктом или результатом работы МВК-ЖАТ является потребная пропускная способность и обеспечение безопасности движения поездов при восстановлении разрушенных объектов ЖДТ. Эти задачи достигаются посредством сокращения и приведения к однотипности перечня допустимых элементов и технических решений в результате использования для разнородных систем и технологий. Приведение изделий к единообразию на основе установления рационального числа их разновидностей называется унификацией¹, которая вместе со стандартизацией является разновидностью систематизации и важным показателем функционирования МВК-ЖАТ.

Автономность МВК-ЖАТ — один из важнейших показателей, выражающийся в способности функционировать независимо, без помощи каких-либо вспомогательных внешних систем энергоснабжения, связи и поддержки. Помимо энергоснабжения, связи и передачи данных, к ключевым элементам автономности относится система управления ресурсами (расходными материалами, комплектующими, оборудованием и техникой).

Для повышения автономности МВК-ЖАТ, как правило, проектируется по модульному принципу [3, 6, 7], что делает его гибким,

масштабируемым и удобным в использовании. Это достигается путем применения функциональных блоков, выполняющих различные задачи, с возможностью их замены и изменения конфигурации, что обеспечивает способность системы адаптироваться к различным новым условиям эксплуатации. Внутренняя комплектация каждого модуля или блока также строится по модульному принципу [8]. При нештатных ситуациях, например при выходе из строя технического устройства, его можно быстро заменить аналогичным.

В то же время модульный принцип построения МВК-ЖАТ и его компактность позволяют повысить транспортабельность, подвижность и способность к быстрому передвижению, обеспечивая постоянную готовность к автономному использованию. Это, в свою очередь, делает комплекс более маневренным и мобильным, с возможностью перемещения между объектами и перехода из одного работоспособного состояния в другое в ответ на управляющие и возмущающие воздействия в допустимые сроки [5].

Все сказанное формирует обязательное требование к МВК-ЖАТ — оперативность, которая отражает скорость и точность реакции на скорейшее восстановление прерванного движения поездов и определяется способностью системы правильно и быстро выполнять различные практические задачи. Данный показатель влияет на производительность МВК-ЖАТ и зависит от маневренности, мобильности и транспортабельности комплекса.

Отдельные зависимости основных показателей эффективности функционирования МВК-ЖАТ представлены на рис. 1.

2. Анализ существующих и перспективных МВК-ЖАТ

История создания МВК-ЖАТ начинается в первой половине XX в., когда возникла необходимость в оперативном восстановлении прерванного движения поездов. Первоначально такие комплексы представляли собой специализированные поезда, оснащенные необходимым оборудованием и инструментами для ремонта, устранения последствий аварий и ликвидации повреждений, вызванных

¹ ГОСТ 23945.0—80. Унификация изделий. Основные положения. — М.: Издательство стандартов, 1991. Переиздание с Изменением № 1, утвержденным в июне 1988 г. (ИУС 11-88).

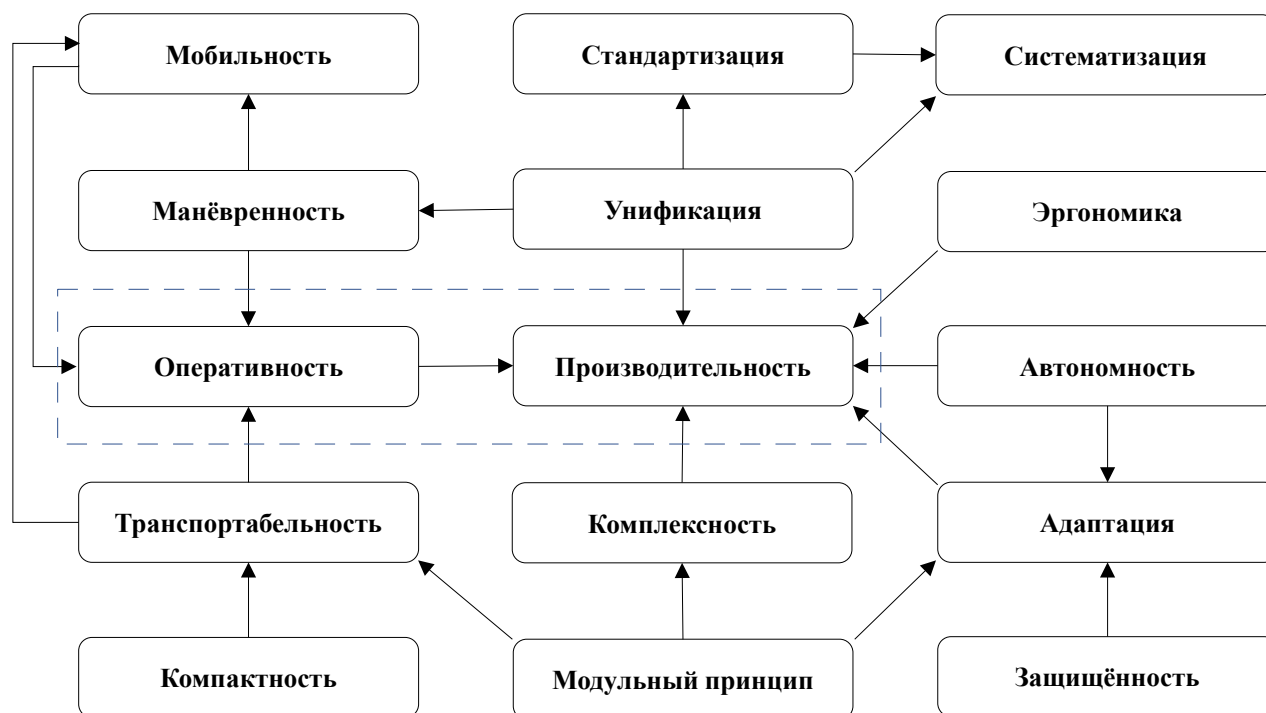


Рис. 1. Основные показатели эффективности функционирования МВК-ЖАТ

природными катаклизмами или техногенными катастрофами. В послевоенный период продолжилось развитие восстановительной техники. Так, в 70–80-х годах прошлого века были созданы типовые инвентарные комплекты:

- СЦДУ — система централизованного диспетчерского управления;
- точечная блокировка «Перегон»;
- передвижные комплекты ЩЦ-1-ДСК и ЩЦ-2-ДСК «Кама».

В настоящее время эти системы морально и физически устарели и не представляют интереса для рассмотрения.

В конце XX в. для замены разрушенных устройств регулирования движения поездов разработано семь типов комплектов [9], позволяющих быстро восстанавливать все виды железнодорожной связи, не затрагивая восстановление устройств ЖАТ. Экспериментальные образцы этих комплектов прошли испытания. Все они смонтированы в железнодорожных вагонах и имеют следующие специальные наименования: ШС-1-ОК, ШС-2-ОВК, ШС-3-ПВК, ШС-4-О2К, ШС-5-П2К, ШС-6, ШС-4/1-О2К.

Комплект ШС-1-ОК устанавливается на железнодорожной станции, где размещается

управление отделения дороги, или на крупной узловой станции. Он состоит из коммуникационной и оконечной аппаратуры для организации каналов телефонной и телеграфной связи. В его состав входят также два полукомплекта радиорелейной станции РРС-1М, которые могут применяться для устройства вставки в кабельную или воздушную линию связи.

ШС-2-ОВК и ШС-3-ПВК — комплекты аппаратуры для восстановления соответственно оконечных и промежуточных узлов связи на участках дорог с воздушными линиями.

На участках с кабельными линиями устанавливаются ШС-4-О2К (комплект оконечной аппаратуры) и ШС-5-П2К (комплект промежуточной аппаратуры). Комплект ШС-6 представляет собой аппаратную диспетчера. Комплект ШС-4/1-О2К включает аппаратуру крупного линейно-аппаратного зала для участков дорог с кабельными линиями связи.

На современном этапе особый интерес представляют системы, предназначенные для оперативного развертывания управления устройствами электрической централизации (ЭЦ) в случаях повреждения постов и устройств ЭЦ при ЧС [3].

К таким системам относится мобильный комплекс «Инвентарный пост управления МК ЭЦ-ИН» разработанный в ООО «ПОЛИВИД» [10], который представляет собой универсальный передвижной автономный комплекс поста ЭЦ на базе модулей «Север». Он состоит из модуля дежурного по станции (далее — ДСП), релейного модуля и модуля дизель-генератора (ДГА). В состав модуля также входят два релейных шкафа ШРУ-М. Базовый МК ЭЦ-ИН позволяет максимально управлять двенадцатью стрелками на четырех приемо-отправочных путях с помощью ЭЦ-9, в которой используются модернизированные блоки БМРЦ-БН. МК ЭЦ-ИН можно в короткие сроки (не более 8 часов) адаптировать без доработки под путевое развитие любой станции с действующим напольным оборудованием ЭЦ и перегонными устройствами для организации движения поездов.

Полагаем, что недостатком системы МК ЭЦ-ИН является применение рельсовых цепей, которые являются наименее живучими элементами в военное время [11]. Наиболее известной и достаточно хорошо проработанной альтернативой рельсовым цепям являются устройства электронной системы счета осей. Контроль свободного состояния участков пути после разрушения рельсовых цепей может быть осуществлен на принципе системы счета осей входящих и выходящих с участка колесных пар. Данный принцип применяется в ЭЦ-МПК-М и МК МПЦ, что является их преимуществом по сравнению с МК ЭЦ-ИН.

Мобильная ЭЦ стрелок и сигналов на базе микро-ЭВМ и программируемых контроллеров ЭЦ-МПК-М², которая представляет собой комплекс средств микропроцессорной техники, смонтированный в блок-контейнерах, и состоит из аппаратного модуля, технологического модуля и модуля ДГА. ЭЦ-МПК-М обеспечивает выполнение функций АРМ ДСП, ЭЦ и сопряжение с напольными объектами (стрелками, сигналами, устройствами

контроля свободности рельсовых участков и т. п.), системами интервального регулирования, переездной автоматикой, а также телеинформационного обмена с системами вышестоящего уровня. Благодаря реализации ряда функций средствами вычислительной техники достигается сокращение площадей служебно-технических помещений по сравнению с ЭЦ релейного типа.

Также известны:

- мобильный комплекс микропроцессорной системы управления стрелками и светофорами участка железной дороги МК МПЦ, разработанный в ОАО «РЖД» [12];
- мобильный восстановительный комплекс МВК-ЭЦ, предложенный институтом военно-системных исследований МТО ВС РФ [13], который использует микропроцессорную систему ОАО «Радиоавионика» ЭЦ-ЕМ с управляющим вычислительным комплексом УВК РА.

Достоинствами МК ЭЦ-ИН, МК МПЦ и МВК-ЭЦ являются:

- компактность;
- возможность использования бесконтактного интерфейса для управления устройствами регулирования движения поездов.

К основным недостаткам данных систем относятся:

- необходимость работоспособности действующих напольных устройств регулирования движения поездов;
- зависимость от состояния кабельной сети;
- отсутствие необходимых сил и средств для восстановления вышедших из строя устройств.

Модульный восстановительный пункт сигнализации, централизации и блокировки (МВП-СЦБ), разработанный в Военном институте Железнодорожных войск и военных сообщений [14], представляет собой комплекс прогрессивных технических решений для поэтапного наращивания пропускной способности железнодорожной станции.

Все представленные выше МВК-ЖАТ объединяет один значительный недостаток — отсутствие возможности организовать восстановление регулирования движения поездов на перегоне.

² Мобильная электрическая централизация стрелок и сигналов на базе микро-ЭВМ и программируемых контроллеров ЭЦ-МПК-М: Техническое описание. Том I. Пояснительная записка. — СПб.: ПГУПС, 2002. — 23 с.

Для устранения данного недостатка был специально разработан модульный восстановительный пункт регулирования движения поездов (МВП-РДП) [15]. Для увеличения пропускной способности на перегонах совместно с МВП-РДП может быть применены несколько мобильных автоматизированных блок-постов, аппаратура которых размещается в транспортабельных модулях [16]. Как и представленные ранее МВК-ЖАТ (за исключением МВП-СЦБ), данный восстановительный пункт не имеет возможностей для мелкого ремонта и восстановления напольных устройств.

На представленные для анализа системы распространяются общие технические условия³, применяемые к системам, устройствам и аппаратуре ЖАТ. Такие восстановительные комплекты, как ШС-1-ОК, ШС-2-ОВК, ШС-3-ПВК, ШС-4-О2К, ШС-5-П2К, ШС-6, ШС-4/1-О2К, в сравнительном анализе участие не принимали, так как у них отсутствует оборудование для регулирования движения поездов. Для сравнительного анализа были использованы критерии, характеризующие МВК-ЖАТ, которые были рассмотрены ранее. Сравнительная характеристика анализируемых образцов МВК-ЖАТ представлена в табл. 2.

Из сравнительного анализа, выполненного по многочисленным критериям, видно, что представленные технические решения:

- имеют ограниченные функциональные возможности (постовое оборудование, регулирование движением поездов на станции, зависимость от местного электропитания и т. п.), что требует их доукомплектования для увеличения производительности и

повышения эффективности в процессе восстановления прерванного движения поездов;

- основная масса представленных систем ЖАТ реализует выполнение алгоритмов на базе микропроцессорной техники, благодаря чему достигается существенная экономия пространства для обеспечения компактности, упрощается обслуживание оборудования и значительно повышается производительность за счет возможности унификации;
- используют модульный принцип и могут размещаться в транспортабельных модулях, повышая мобильность, что, в свою очередь, влияет на оперативность восстановления прерванного движения поездов.

Таким образом, по совокупности основных показателей все представленные технические решения имеют предпосылки стать основой МВК-ЖАТ, который может быть принят в качестве инвентарного восстановительного средства в системе железнодорожного транспорта (ОАО «РЖД», Железнодорожные войска и т. п.).

3. Разработка методики применения МВК-ЖАТ

Жизненный цикл МВК-ЖАТ состоит из нескольких ключевых этапов, каждый из которых играет важную роль в обеспечении бесперебойной работы комплекса и поддержании его в постоянной готовности.

На этапах проектирования, разработки и создания особое внимание уделяется формированию оптимального состава МВК-ЖАТ. На наш взгляд, с помощью предложенного в [2] подхода оценки и значимости отдельных компонентов структуры, а также выполненного анализа основных функциональных задач, МВК-ЖАТ должен включать следующие основные элементы:

- временную систему управления движением поездов на станциях, соответствующую требованиям⁴ и включающую: постовой комплект аппаратуры (устройства управления и

³ ОСТ 32.146—2000. Аппаратура железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. Общие технические условия. — URL: http://static.scbist.com/scb/uploaded/1_1388549311.pdf (свободный, дата обращения 29.10.2019); ГОСТ Р 55369—2012. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики. Общие технические требования. — М.: Стандартинформ, 2014. — 40 с.; ГОСТ Р 53431—2009. Автоматика и телемеханика железнодорожная. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2010. — 25 с.; ГОСТ 15150—69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. — М.: Стандартинформ, 2006. — 57 с.

⁴ ГОСТ 33894—2016. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на железнодорожных станциях. Требования безопасности и методы контроля. — М.: Стандартинформ, 2017. — 27 с.

Таблица 2. Сравнительная характеристика анализируемых образцов МВК-ЖАТ

Критерии качества	МК ЭЦ-ИН	ЭЦ-МПК-М	МК МПЦ	МВК-ЭЦ	МВП-СЦБ	МВП-РДП
Восстановление технических средств (создание избыточности, резервирование)	Слабо (или не предусмотрено)	Да (среднее время восстановления системы не более 2 часов)				
Воздействие климатических условий (температура, влага и т. п.)	Класс МС1					
Электромагнитная совместимость (помехоустойчивость, помехоэмиссия, воздействие РЭБ)	Помехоустойчивость — А3, помехоэмиссия — Д1, защита от воздействия РЭБ — не предусмотрена			А3, Д1, +		
Воздействие кибератак (повреждение, кража информации)	Нет	ГОСТ 24.402—80 ¹ и ГОСТ Р 56205—2014 ²				
Суммарная интенсивность отказов технических средств	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-5}$			$5 \cdot 10^{-6}$	
Интенсивность опасных отказов технических средств	$1,8 \cdot 10^{-7}$ (без учета напольного оборудования)					
Наличие/отсутствие электроэнергии (электроопасность)	Полная автономность	Зависимость от местного электропитания			Полная автономность	
Действия персонала (наличие квалифицированных работников, дисциплина обслуживания)	Не предусмотрено			Штат ЖДВ		Не предусмотрено
Условия монтажа и демонтажа устройств (постового и напольного оборудования)	Да/да	Да/нет	Да/нет	Да/нет	Да/да	Да/нет
Механические воздействия (вибрационные и ударные нагрузки)	класс К4.1					
Воздействие ЧС (непреднамеренное)	Нет	Нет	Нет	Да	Да	Да
Применение ВТО (МРАУ)	Нет	Нет	Нет	Да	Да	Да
Применения ОМП (РХБ воздействие)	Нет	Нет	Нет	Да	Да	Да
Пожаровзрывоопасность	ГОСТ 12.1.00491 ССБТ ³					
Эргономика	ГОСТ Р 56274—2014 ⁴					
Уровень шума	ГОСТ 12.1.003—83 ССБТ ⁵					
Унификация и стандартизация: станции/перегоны (возможность)/перегоны (наличие)	Да/нет/нет	Да/да/нет	Да/нет/нет	Да/нет/нет	Да/да/нет	Да/да/да
Мобильность/маневренность (использование радиоканала) возможность/наличие	Да/нет/нет	Да/да/нет	Да/да/нет	Да/да/нет	Да/да/да	Да/да/да

¹ ГОСТ 24.402—80. Система технической документации на АСУ. Учет, хранение и обращение. — М.: Стандартинформ, 2009. — 10 с.

² ГОСТ Р 56205—2014. Сети коммуникационные промышленные. Защищенность (кибербезопасность) сети и системы Терминология, концептуальные положения и модели. — М.: Стандартинформ, 2014. — 81 с.

³ ГОСТ 12.1.004—91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. — М.: Стандартинформ, 2006. — 64 с.

⁴ ГОСТ Р 56274—2014. Общие показатели и требования в эргономике. — М.: Стандартинформ, 2016. — 27 с.

⁵ ГОСТ 12.1.003—83. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. — 12 с.

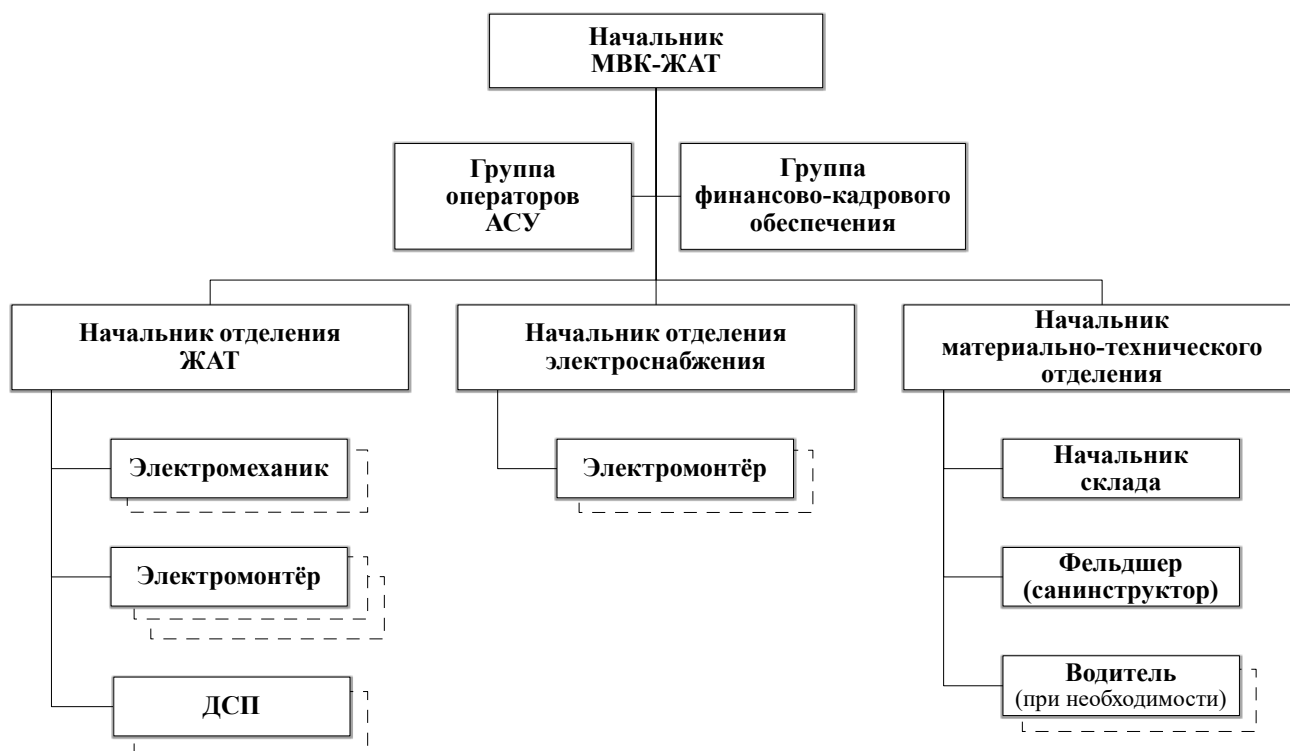


Рис. 2. Организационно-штатная структура МВК-ЖАТ (вариант)

контроля, средства отображения информации и ведения диалога, устройства резервирования и дублирования и т. п.); комплект напольного оборудования (устройства контроля свободности состояния участков, стрелочные приводы, станционные светофоры и т. п.);

- временную систему интервального регулирования движения поездов на перегонах, соответствующую требованиям⁵ и предусматривающую: возможность быстрого перехода как на ручные (телефонные средства связи), так и на альтернативные способы (например, мобильные сигнальные точки [17, 18]); наличие центра управления движением; оборудование блок-участков; алгоритмы расчета интервалов движения; прочие необходимые компоненты;
- систему связи, содержащую каналобразующие устройства (проводные, радио-, радиорелейные, спутниковые), которые обеспечивают: работу систем управления движением

⁵ ГОСТ 33895—2016. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на перегонах железнодорожных линий. Требования безопасности и методы контроля. — М.: Стандартинформ, 2017. — 10 с.

поездов на станциях и перегонах; железнодорожную электросвязь (поездную, диспетчерскую и т. п.); коммуникацию между участниками восстановительного процесса; взаимодействие экстренных служб; передачу данных;

- независимую систему энергоснабжения, включающую автономные генераторы электроэнергии и источники бесперебойного питания для систем и устройств ЖАТ, восстановительных работ с использованием электроинструмента, освещения, отопления и т. п.;
- комплексную автоматизированную систему поддержки принятия решений при восстановлении объектов инфраструктуры ЖДТ [19], содержащую: АРМ операторов мобильной группы, объединенных в локальную сеть, где используются специальное программное обеспечение и базы данных, например [20, 21];
- средства контроля и диагностики, применяемые для проведения обследования разрушенных объектов инфраструктуры ЖДТ при возникновении ЧС, выявления неисправностей и оценки состояния

оборудования ЖАТ, в том числе используемого для временного восстановления прерванного движения поездов;

- пространство для хранения инструментов, измерительных приборов, средств индивидуальной защиты, оборудования и запасных частей, необходимых для выполнения восстановительных работ с возможностью выполнять мелкий и средний ремонт устройств ЖАТ (склад, мастерская, аддитивное производство и т. п.);
- медицинское отделение с аптечкой первой помощи и оборудованием для экстренной доврачебной медицинской помощи работникам, занятым на восстановительных работах (при травмах, ожогах, отравлениях и других несчастных случаях);
- специальные транспортные средства (при необходимости) повышенной проходимости, оборудованные всем необходимым для автономного размещения техники и персонала и служащие базой для размещения оборудования и инструментов.

Мы полагаем, что такое техническое оснащение позволяет МВК-ЖАТ эффективно и качественно выполнять задачи по диагностике, ремонту и восстановлению устройств ЖАТ, обеспечивая безопасность и бесперебойность работы инфраструктуры ЖДТ.

В состав МВК-ЖАТ, кроме технического оснащения, входят сотрудники разного профиля, обладающие необходимыми компетенциями для диагностики, ремонта и восстановления устройств ЖАТ. Организационно-штатная структура МВК-ЖАТ предполагает несколько основных отделений (по ремонту и восстановлению ЖАТ, энергоснабжению, материально-техническому обеспечению, группы автоматизированных систем управления (АСУ) и т. п.) и может быть представлена в виде схемы (рис. 2).

Таким образом, минимальное количество сотрудников МВК-ЖАТ составляет около 12–15 человек. Количество штата, необходимого для полноценного функционирования МВК-ЖАТ, зависит от объема возложенных задач, его специализации и региональных особенностей.

На каждом МВК-ЖАТ должны находиться определенные документы, подтверждающие его техническую исправность, порядок эксплуатации и правила безопасности (паспорта изделий, руководства по эксплуатации, сертификаты соответствия, акты приема-передачи, различные книги учета, графики проведения технических осмотров и ремонтов, формы отчетности, каталоги запасных частей, таблицы регламента и другие нормативно-справочные материалы, необходимые для качественного выполнения задач). Наличие вышеуказанных документов является обязательным для каждого МВК-ЖАТ, что обеспечивает прозрачность и законность его эксплуатации. Отсутствие или неправильное заполнение любого из документов может привести к проблемам при проведении официальных проверок и оценке качества проводимых работ. В целях экономии времени и затрат получают развитие некоторые элементы электронной системы документооборота (например, комплексная автоматизированная система поддержки принятия решений при восстановлении объектов инфраструктуры ЖДТ [19]).

Совокупность технического оснащения, персонала и документации, необходимая для решения широкого спектра задач по обеспечению безопасности движения поездов и оперативной восстановительной деятельности при возникновении ЧС, образует целостную гибкую производственную систему МВК-ЖАТ.

Одним из центральных этапов жизненного цикла МВК-ЖАТ является его эксплуатация. Эксплуатационный этап охватывает весь период использования МВК-ЖАТ, где он может находиться в двух основных состояниях (активный, ожидания). Методика применения МВК-ЖАТ представлена на рис. 3.

Под режимом ожидания МВК-ЖАТ будем понимать организационно-технические мероприятия для обеспечения сохранности и постоянной готовности мгновенно перейти к выполнению задач по функциональному предназначению при возникновении ЧС. Данное состояние (режим ожидания) занимает наибольшую продолжительность в эксплуатационном этапе и является крайне важным, поскольку от него зависит общая

эффективность процесса восстановления прерванного движения поездов в целом. На этой стадии организовывается хранение, техническое обслуживание и ремонт МВК-ЖАТ, проводятся мероприятия по поддержанию постоянного уровня готовности не только техники, но и персонала (учения, инструктажи, тренировки и т. п.), разрабатываются четкие регламенты действий при ЧС, ведется документооборот.

Организация правильного хранения чрезвычайно важна для обеспечения их сохранности и готовности. Она осуществляется с соблюдением определенных правил и норм (выбор и подготовка места хранения, правила и условия хранения, маркировка и инвентарный учет, порядок выдачи и возврата оборудования и т. п.).

Для обеспечения исправности МВК-ЖАТ и его постоянной готовности к выполнению задач по функциональному назначению при возникновении ЧС в любое время суток и при любых погодных условиях необходимо:

- регулярное проведение технического обслуживания;
- осуществление ремонтных работ;
- постоянный контроль состояния всего оборудования и устройств, входящих в состав комплекса.

Частота проверок зависит от ряда факторов, таких как интенсивность эксплуатации, окружающая среда и специфика региона. Однако общая практика предусматривает еженедельные, ежемесячные, ежеквартальные и годовые проверки, на которых осуществляют внешний осмотр, тестирование и испытание аппаратуры ЖАТ, ревизию электрооборудования и источников питания, замену изношенных деталей и расходных материалов, проверку уровня жидкостей (при наличии), обновление программного обеспечения и инструкций.

Для оперативного, безопасного и грамотного восстановления прерванного движения поездов в условиях воздействия ЧС и минимизации сбоев и простоев ЖДТ с персоналом МВК-ЖАТ организуется и проводится непрерывный процесс подготовки, сочетающий теоретическое обучение (изучение устройств и принципа работы МВК-ЖАТ, нормативных документов, техники безопасности и т. п.),

практические вопросы (работа на тренажерах, выездные учения, тренировки по взаимодействию и т. п.), регулярные проверки квалификации (аттестация, внезапные проверки, совместные тренировки с МЧС и т. п.) и особые формы подготовки (стажировки, разбор реальных аварийных случаев, обучение новым технологиям и т. п.). Обучение и тренировки должны проводиться на учебных полигонах, специализированных тренажерах и реальных объектах инфраструктуры ЖДТ.

В целях совершенствования и внедрения перспективных технологий аварийно-восстановительных работ (цифровизация, искусственный интеллект, квантовая связь, новые материалы и т. п.) научно-исследовательская работа в области восстановления устройств и систем ЖАТ является важнейшим элементом подготовки МВК-ЖАТ в режиме ожидания.

Таким образом, режим ожидания МВК-ЖАТ — это комплексное состояние, обеспечивающее максимальную оперативность и надежность в работе техники и персонала, направленное на минимизацию последствий ЧС на ЖДТ.

Под активным режимом МВК-ЖАТ будем понимать организационно-технические мероприятия от возникновения необходимости восстановления прерванного движения поездов до возвращения его в режим ожидания.

На подготовительном этапе активного режима, когда возникает необходимость восстановить поврежденную инфраструктуру ЖДТ, происходит получение информации о возникновении ЧС, выполняется сбор информации о произошедшем событии, исходя из величины нанесенного ущерба и ресурсных ограничений принимается решение о применении МВК-ЖАТ (в полном составе или частичном). Далее в рамках подготовительного этапа оповещается руководящий состав о принятом решении, формируется восстановительная команда и проверяется готовность МВК-ЖАТ к выходу на место происшествия.

На втором этапе активного режима прокладывается маршрут с учетом расчета расстояний по различным видам дорог, способам доставки МВК-ЖАТ и доступности (дорожные условия, ограничения и т. п.). Транспортировка

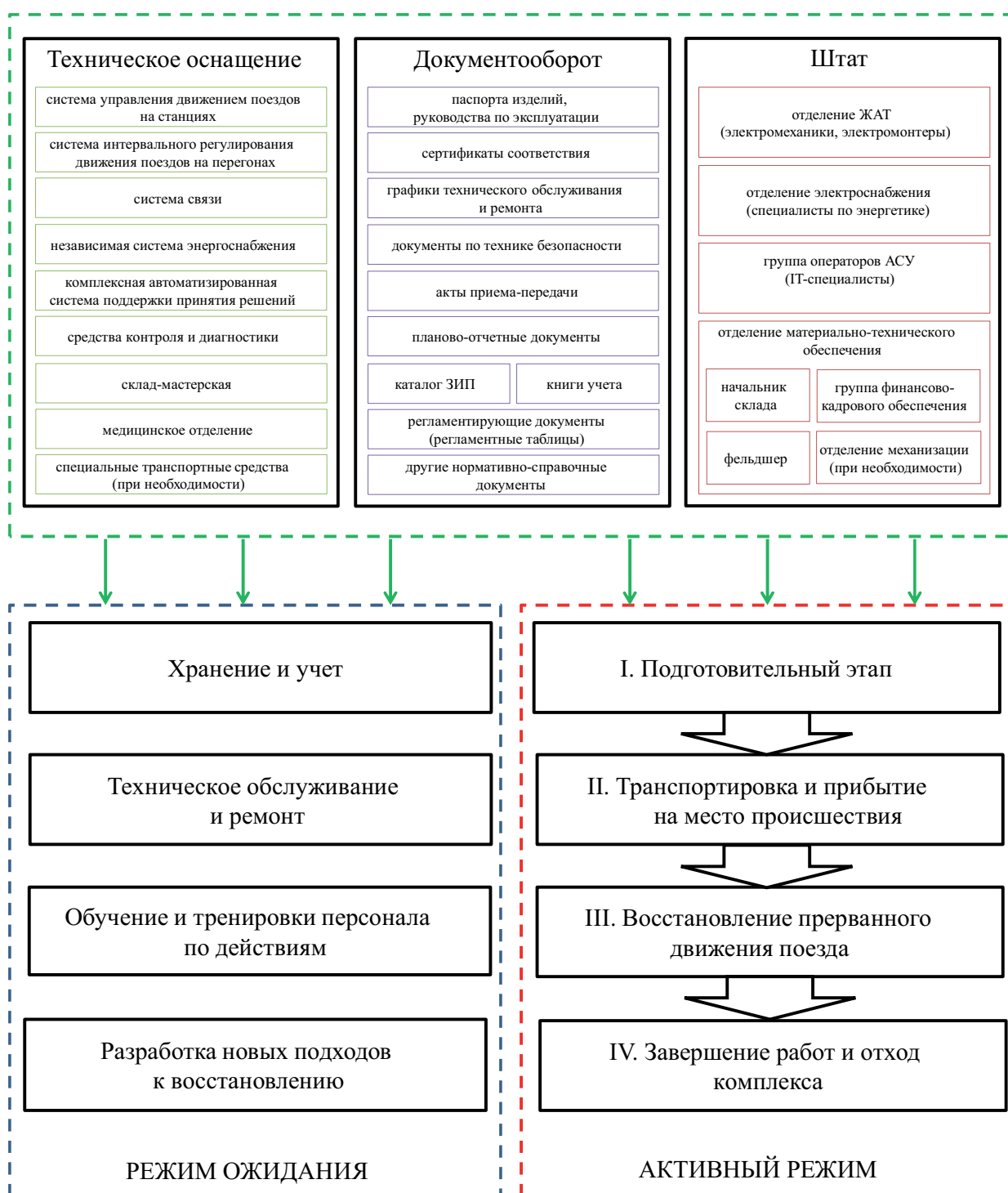


Рис. 3. Методика применения МВК-ЖАТ

МВК-ЖАТ на место происшествия может осуществляться следующими способами:

- железнодорожным транспортом — при удаленных ЧС, если пути не разрушены;
- автомобильным транспортом повышенной проходимости — для доставки вне железнодорожных путей;

- комбинированным способом, включая использование вертолетов — для труднодоступных зон.

По прибытии на место происшествия осуществляется оценка обстановки, организуется связь между участниками восстановительного процесса и взаимодействия экстренных служб,

подготавливается площадка для оборудования, разворачивается система энергоснабжения, выполняется монтаж оборудования, налаживается работа операторов мобильной группы АСУ, а также изучается состояние пострадавших объектов инфраструктуры ЖДТ.

На следующем этапе после технической разведки выполняются первоочередные аварийно-восстановительные работы, связанные с расчисткой завалов; локализацией пораженных объектов; их изоляцией от работающих систем.

Развертываются необходимые временные системы управления движением поездов и железнодорожной электросвязи, подключаются к внешним источникам питания и водообеспечения (независимой системе энергоснабжения). Параллельно реализуется: демонтаж разрушенных напольных устройств; монтаж новых взамен поврежденных; прокладка кабелей (радиоканала) для установления связей между компонентами.

После монтажа и подключения всех устройств ЖАТ выполняются: окончательная настройка оборудования; проверка его работоспособности; организация пробного пуска восстановленного объекта инфраструктуры ЖДТ; подтверждение его пригодности к использованию.

Затем осуществляется движение поездов с использованием временных систем управления до полного восстановления объекта инфраструктуры ЖДТ.

На завершающем этапе подготавливаются и подписываются акты приемки выполненных работ с фото- и видеофиксацией, выполняется свертывание и отход МВК-ЖАТ обратно на базу с параллельной утилизацией отходов и уборкой территории вокруг объекта инфраструктуры ЖДТ. По завершении работ осуществляется комплексный анализ эффективности проведенных аварийно-восстановительных мероприятий, формируется отчетная документация для руководства и разрабатываются рекомендации по оптимизации последующих операций.

Таким образом, активный режим состоит из четких последовательных действий (подготовительный этап, транспортировка и прибытие на место происшествия, восстановление инфраструктуры ЖДТ, завершение работ и

«отход» комплекса), направленных на эффективное восстановление прерванного движения поездов.

Из анализа разработанной методики применения МВК-ЖАТ, представленной на рис. 3, видно, что целостная гибкая производственная система представляет собой живой организационно-технический организм, который может находиться в одном из двух основных состояний (активном режиме или режиме ожидания); способен адаптироваться к внешним условиям; обеспечивает устойчивое функционирование ЖДТ.

При этом режим ожидания, занимающий по времени большую часть жизненного цикла, является не менее важным, чем активный режим. Разделение режимов на активный и ожидания помогает обеспечить максимальную готовность МВК-ЖАТ к немедленному реагированию и эффективному решению любых проблем на ЖДТ. Данная методика обеспечивает:

- систематизацию действий при применении МВК-ЖАТ;
- упорядочивание процессов как в активном режиме, так и в режиме ожидания;
- повышение эффективности работы комплекса;
- снижение рисков при выполнении аварийно-восстановительных работ;
- обеспечение безопасности в условиях воздействия ЧС.

Заключение

Проведенное исследование показало, что наиболее эффективным способом оперативного восстановления прерванного движения поездов после воздействия ЧС является применение МВК-ЖАТ. Из рассмотренных особенностей современных МВК-ЖАТ видно, что производительность и оперативность тесно связаны с другими основными показателями эффективности функционирования, такими как мобильность, автономность и возможность адаптации к различным ситуациям. Это позволяет при создании инвентарного восстановительного средства в системе ЖДТ сформировать целостную гибкую производственную систему МВК-ЖАТ, состоящую из совокупности технического оснащения, персонала,

документооборота и четкой организации действий по применению.

Разработанная методика применения МВК-ЖАТ обеспечивает высокую степень готовности комплекса к действиям в условиях воздействия ЧС, оптимальное распределение ресурсов и повышение эффективности аварийно-восстановительных работ, так как основана на комплексном подходе, который включает проектирование, создание, эксплуатацию и подготовку персонала. Важно отметить, что режим ожидания, занимающий значительную часть жизненного цикла МВК-ЖАТ, столь же важен, как и активный режим действий по предназначению. Правильная организация хранения, технического обслуживания и подготовки персонала позволяет достичь максимальной готовности к незамедлительному реагированию и эффективному решению возникающих проблем. Таким образом, данная методика способствует повышению эффективности и снижению рисков при выполнении аварийно-восстановительных работ, обеспечивая надежную работу ЖДТ в сложных условиях. Следовательно, современные способы и технологии позволяют сократить сроки восстановления, повысить безопасность и надежность функционирования ЖДТ даже в экстремальных ситуациях, а МВК-ЖАТ становятся незаменимым инструментом для обеспечения безопасности и непрерывности железнодорожного движения в условиях воздействия ЧС. ▲

Список источников

1. Яшин М. Г. Моделирование работы инфраструктуры железнодорожного транспорта в условиях чрезвычайных ситуаций с учетом применения инвентарных комплектов / Р. А. Пантелеев, И. В. Кушпиль, Н. Н. Фомин // Автоматика на транспорте. — 2022. — Т. 8. — № 4. — С. 354–366. — DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-354-366.
2. Савинов К. Н. Обоснование гибридного (нетрадиционного) способа восстановления прерванного движения поездов с применением аддитивных и информационных технологий: отчет о НИР «Комплект — 23» (заключ.) / М. Г. Яшин, Р. А. Пантелеев и др.; рук. К. Н. Савинов. — Петергоф: ВИ (ЖДВ и ВОСО), 2024. — 150 с.
3. Никитин А. Б. Транспортабельные модули электрической централизации как средство восстановления систем управления движением поездов / М. Г. Яшин, Р. А. Пантелеев // Автоматика на транспорте. — 2015. — Т. 1. — № 2. — С. 127–142.
4. Кочнев Д. В. Обоснование показателя системы обеспечения безопасного регулирования движения поездов на железнодорожной станции / Д. В. Кочнев, Р. А. Пантелеев // Специальная техника и технологии транспорта. — 2020. — № 5(43). — С. 101–110.
5. Рябинин И. А. Надежность и эффективность структуры сложных технических систем / И. А. Рябинин, Ю. М. Парфенов // Основные вопросы теории и практики надежности. — Минск: Наука и техника, 1982. — С. 25–39.
6. Савинов К. Н. Современные конструктивно-технологические решения для восстановления систем регулирования движения поездов / К. Н. Савинов, Р. А. Пантелеев // Специальная техника и технологии транспорта. — 2019. — № 4(42). — С. 112–120.
7. Пантелеев Р. А. Современный подход к восстановлению регулирования движения поездов на отдельных пунктах / Р. А. Пантелеев // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации: сб. науч. тр. / под общ. ред. д-ра экон. наук, проф. В. С. Ивановского. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. — С. 332–341.
8. Бабошин В. А. Современные модульные технологии для восстановления железных дорог (Modern Modular Technologies for Railway Rehabilitation) / В. А. Бабошин, Р. А. Пантелеев, П. Н. Фомин // INTERNATIONAL Symposium Rail Transport in The Modern World. — 2019. — С. 117–123.
9. Организация восстановления железных дорог: учебное пособие. Часть I. Организация восстановления участка отдельной железнодорожной бригады. — СПб.: БАТТ, 2007. — 174 с.
10. Загидуллин Э. З. Мобильный комплекс МКЭЦ-ИН/Э. З. Загидуллин, А. Г. Карпунин // Автоматика, связь, информатика. — 2009. — № 1. — С. 32–35.
11. Яшин М. Г. Восстановление регулирования движения поездов по участкам железнодорожных направлений в условиях военных действий / М. Г. Яшин, Р. А. Пантелеев // Транспорт Урала. — 2016. — № 2(49). — С. 99–104. — DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-99-104.
12. Смагин Ю. С. Мобильный комплекс микропроцессорной системы управления стрелками и светофорами участка железной дороги: пат. 2622522. С1 Российская Федерация / Ю. С. Смагин, О. Ю. Шатковский, Я. Ю. Плавник и др. — № 2016115775; заявл. 22.04.2016; опубл. 16.06.2017.
13. Ласточкин Н. Н. Мобильный восстановительный комплекс электрической централизации: пат. на полезную модель 172264. U1 Российская Федерация / Н. Н. Ласточкин, С. И. Завальнюк, К. С. Кононов и др. — № 2016116226; заявл. 25.04.2016; опубл. 03.07.2017. — заявитель ФГКВУ ВО «ВА МТО имени генерала армии А. В. Хрулева».
14. Пантелеев Р. А. Модульный восстановительный пункт централизации, централизации и блокировки: пат. 2747520. С1 Российская Федерация / Р. А. Пантелеев, М. Г. Яшин, В. А. Грошев и др. — № 2020111008; заявл. 19.11.2019; опубл. 06.05.2021.

15. Никитин А. Б. Модульный восстановительный пункт регулирования движения поездов: пат. 2790210. С1 Российская Федерация / А. Б. Никитин, И. В. Кушпиль, М. Г. Яшин и др. — № 2022126857; заявл. 14.10.2022; опубл. 15.02.2023. — заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

16. Гелашвили О. Г. Комплекс транспортальный оборудования железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: пат. на полезную модель 109722. U1 Российская Федерация / О. Г. Гелашвили, Б. Т. Кондратьев-Черкасов, В. Б. Мехов и др. — № 2010148496/11; заявл. 19.11.2010; опубл. 27.10.2011.

17. Яшин М. Г. Мобильная сигнальная точка: пат. на полезную модель 198136. U1 Российская Федерация / М. Г. Яшин, Р. А. Пантелеев, А. В. Мелешко и др. — № 2020101177; заявл. 10.01.2020; опубл. 19.06.2020.

18. Пантелеев Р. А. Мобильная сигнальная точка усовершенствованная: пат. на полезную модель 210536. U1 Российская Федерация / Р. А. Пантелеев, М. Г. Яшин, К. Н. Савинов и др. — № 2021128363; заявл. 27.09.2021; опубл. 19.04.2022.

19. Савинов К. Н. Комплексная автоматизированная система поддержки принятия решений при восстановлении объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта: монография / К. Н. Савинов, М. Г. Яшин, Р. А. Пантелеев, А. В. Коновалова. — СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2025. — 100 с.

20. Пантелеев Р. А. База данных инфраструктуры железнодорожного транспорта для решения задач в области предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций: свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024621344 Российская Федерация / Р. А. Пантелеев, А. А. Сапко, А. В. Коновалова и др. — № 2024620996; заявл. 19.03.2024; опубл. 28.03.2024.

21. Пантелеев Р. А. База данных технологических процессов эксплуатации и восстановления устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2019620594 Российская Федерация / Р. А. Пантелеев, К. Н. Савинов, В. В. Трубицин и др. — № 2019620505; заявл. 04.04.2019; опубл. 15.04.2019.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 3, pp. 210–225
DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-03-210-225

Functional and Morphological Description of the Method for Recovering Disrupted Train Movement Using Mobile Recovery Systems of Railway Automation, Remote Control and Communications

Information about authors

Yashin M. G., PhD in Engineering, Associate Professor¹. E-mail: maik1771@rambler.ru
Panteleev R. A., PhD in Engineering, Associate Professor¹. E-mail: pantel98@mail.ru
Nikitin A. B., D. Sci. in Engineering, Professor². E-mail: nikitin@crtc.spb.ru
Kushpil I. V., PhD in Engineering, Associate Professor². E-mail: i_kushpil@mail.ru

¹Military Institute of Railway Troops and Military Communications of the Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev, "Restoration of Automation and Remote Control devices and Communication on Railways" Department, Petergof
²Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, "Automation and remote control on railways" Department, Saint Petersburg

Abstract: The present paper is devoted to the study and development of the methodology for using a mobile recovery system of railway automation, remote control and communications for prompt restoration of disrupted train traffic due to emergencies, both in peacetime and in wartime. The features of contemporary and future mobile recovery systems, in addition to their respective advantages and disadvantages, have been thoroughly examined. Furthermore, approaches to enhancing the stability and reliability of railway transport in emergency situations have been proposed. A particular focus has been placed on the efficiency of mobile recovery systems in the context of railway automation, remote control and communications. The discussion has encompassed the mobility, autonomy and adaptability of these systems to diverse scenarios. A methodology for the effective use of such systems is proposed, based on the sequence of actions during the preparation, deployment and completion of emergency recovery operations. The aim of this methodology is to increase the efficiency and effectiveness of restoring interrupted train traffic.

Keywords: railway transport infrastructure; railway automation and remote control devices; emergency situations; recovery of train traffic; mobile recovery system; restoration efficiency.

References

1. Yashin M. G., Panteleev R. A., Kushpil I. V., Fomin N. N. Modelirovanie raboty infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta v usloviyakh chrezvychaynykh situatsiy s uchetom primeneniya inventarnykh komplektov [Modeling of railway transport infrastructure operation in emergency situations taking into account the use of inventory sets]. *Avtomatika na transporte* [Automation in Transport]. 2022, vol. 8, Iss. 4, pp. 354–366. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-354-366. (In Russian)
2. Savinov K. N., Yashin M. G., Panteleev R. A. et al. *Obosnovanie gibridnogo (netraditsionnogo) sposoba vosstanovleniya prervannogo dvizheniya poezdov s primeneniem additivnykh i informatsionnykh tekhnologiy: otchet o NIR "Komplekt — 23" (zaklyuch.)* [Justification of a hybrid (non-traditional) method for restoring interrupted train traffic using additive and information technologies]: report on research work "Komplekt — 23" (final)]. Petergof: VI (ZhDV i VOSO) Publ., 2024, 150 p. (In Russian)
3. Nikitin A. B., Yashin M. G., Panteleev R. A. Transportabel'nye moduli elektricheskoy tsentralizatsii kak sredstvo vosstanovleniya sistem upravleniya dvizheniem poezdov [Transportable modules of electrical centralization as a means of restoring train control systems]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2015, vol. 1, Iss. 2, pp. 127–142. (In Russian)
4. Kochnev D. V., Panteleev R. A. Obosnovanie pokazatelya sistemy obespecheniya bezopasnogo regulirovaniya dvizheniya poezdov na zheleznodorozhnoy stantsii [Justification of the indicator of the system for ensuring safe train traffic control at a railway station]. *Spetsial'naya tekhnika i tekhnologii transporta* [Special Equipment and Technologies of Transport]. 2020, Iss. 5(43), pp. 101–110. (In Russian)
5. Ryabinin I. A., Parfenov Yu. M. Nadezhnost' i effektivnost' struktury slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Reliability and efficiency of the structure of complex technical systems]. *Osnovnye voprosy teorii i praktiki nadezhnosti* [Basic Issues of Theory and Practice of Reliability]. Minsk: Nauka i tekhnika Publ., 1982, pp. 25–39. (In Russian)

6. Savinov K. N., Pantelev R. A. *Sovremennyye konstruktivno-tekhnologicheskie resheniya dlya vosstanovleniya sistem regulirovaniya dvizheniya poezdov* [Modern design and technological solutions for restoring train control systems]. *Spetsial'naya tekhnika i tekhnologii transporta* [Special Equipment and Technologies of Transport]. 2019, Iss. 4(42), pp. 112–120. (In Russian)
7. Pantelev R. A. *Sovremennyy podkhod k vosstanovleniyu regulirovaniya dvizheniya poezdov na razdel'nykh punktakh: sb. nauch. tr.; pod obshch. red. d-ra ekon. nauk, prof. V. S. Ivanovskogo* [Modern approach to restoring train traffic control at dividing points]. *Nauchnye problemy material'no-tekhnicheskogo obespecheniya Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii* [Scientific Problems of Material and Technical Support of the Armed Forces of the Russian Federation: collection of scientific papers; ed. by V. S. Ivanovskiy]. St. Petersburg: Politekh. un-t Publ., 2015, pp. 332–341. (In Russian)
8. Baboshin V. A., Pantelev R. A., Fomin P. N. *Sovremennyye modul'nye tekhnologii dlya vosstanovleniya zheleznykh dorog* [Modern Modular Technologies for Railway Rehabilitation]. INTERNATIONAL Symposium Rail Transport in The Modern World. 2019, pp. 117–123. (In Russian)
9. *Organizatsiya vosstanovleniya zheleznykh dorog: uchebnoe posobie. Chast' I. Organizatsiya vosstanovleniya uchastka otdel'noy zheleznodorozhnoy brigady* [Organization of Railway Restoration: A Tutorial. Part I. Organization of Restoration of a Section of a Separate Railway Brigade]. St. Petersburg: VATT Publ., 2007. 174 p. (In Russian)
10. Zagidullin E. Z., Karpukhin A. G. *Mobil'nyy kompleks MK ETs-IN* [Mobile Complex MK EC-IN]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, Communications, Informatics]. 2009, Iss. 1, pp. 32–35. (In Russian)
11. Yashin M. G., Pantelev R. A. *Vosstanovlenie regulirovaniya dvizheniya poezdov po uchastkam zheleznodorozhnykh napravleniy v usloviyakh voennykh deystviy* [Restoration of train traffic control in railway sections during military operations]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2016, Iss. 2(49), pp. 99–104. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-2-99-104. (In Russian)
12. Smagin Yu. S., Shatkovskiy O. Yu., Plavnik Ya. Yu. et al. *Mobil'nyy kompleks mikroprotsessornoy sistemy upravleniya strelkami i svetoforami uchastka zheleznoy dorogi* [Mobile complex of microprocessor control system for switches and traffic lights of a railway section]. Patent RF, no. 2016115775, 2017. (In Russian)
13. Lastochkin N. N., Zaval'nyuk S. I., Kononov K. S. et al. *Mobil'nyy vosstanovitel'nyy kompleks elektricheskoy tsentralizatsii* [Mobile recovery complex for electrical centralization]. Patent RF, no. 2016116226, 2017. (In Russian)
14. Pantelev R. A., Yashin M. G., Groshev V. A. et al. *Modul'nyy vosstanovitel'nyy punkt signalizatsii, tsentralizatsii i blokirovki* [Modular recovery point for signaling, centralization, and blocking]. Patent RF, no. 2020111008, 2021. (In Russian)
15. Nikitin A. B., Kushpil' I. V., Yashin M. G. et al. *Modul'nyy vosstanovitel'nyy punkt regulirovaniya dvizheniya poezdov* [Modular recovery point for train traffic control]. Patent RF, no. 2022126857, 2023. (In Russian)
16. Gelashvili O. G., Kondrat'ev-Cherkasov B. T., Mekhov V. B. et al. *Kompleks transportabel'nyy oborudovaniya zheleznodorozhnoy avtomatiki, telemekhaniki i svyazi* [Transportable complex of railway automation, remote control and communications equipment]. Patent RF, no. 2010148496/11, 2011. (In Russian)
17. Yashin M. G., Pantelev R. A., Meleshko A. V. et al. *Mobil'naya signal'naya tochka* [Mobile signal point]. Patent RF, no. 2020101177, 2020. (In Russian)
18. Pantelev R. A., Yashin M. G., Savinov K. N. et al. *Mobil'naya signal'naya tochka usovershenstvovannaya* [Improved mobile signal point]. Patent RF, no. 2021128363, 2022. (In Russian)
19. Savinov K. N., Yashin M. G., Pantelev R. A., Konovalova A. V. *Kompleksnaya avtomatizirovannaya sistema podderzhki prinyatiya resheniy pri vosstanovlenii ob'ektov infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta: monografiya* [Integrated automated decision support system for the restoration of railway infrastructure facilities: monograph]. St. Petersburg: Izdatel'sko-poligraficheskaya assotsiatsiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Publ., 2025, 100 p. (In Russian)
20. Pantelev R. A., Sapko A. A., Konovalova A. V. et al. *Baza dannykh infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta dlya resheniya zadach v oblasti preduprezhdeniya i likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy* [Database of railway transport infrastructure for solving problems in the field of prevention and elimination of emergency situations: certificate of state registration of database]. Svidetel'stvo RF, no. 2024620996, 2024. (In Russian)
21. Pantelev R. A., Savinov K. N., Trubitsin V. V. et al. *Baza dannykh tekhnologicheskikh protsessov ekspluatatsii i vosstanovleniya ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki* [Database of technological processes for the operation and restoration of railway automation and remote control devices]. Svidetel'stvo RF, no. 2019620505, 2019. (In Russian)

РЕАЛИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСНОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО СТЕГОДЕТЕКТОРА В РАМКАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

СИДОРЕНКО Валентина Геннадьевна, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры;

e-mail: valenfalk@mail.ru

ГРАЧЕВ Ярослав Леонидович, аспирант; e-mail: yaroslav446@mail.ru

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

В статье рассмотрен вопрос разработки комплексного статистического стегодетектора и его внедрения в модуль анализа достоверности графических данных автоматизированных систем управления технологическими процессами и интеллектуальных транспортных систем для проверки подлинности и подтверждения достоверности циркулирующих в этих системах графических данных, поступающих от средств технического зрения и иных средств фотофиксации и фотосенсоров, и повышения надежности функционирования систем. Разработанный программный стегодетектор реализован в форме сервера API, что позволяет интегрировать его в рассматриваемые системы и в автоматическом режиме осуществлять стеганографический анализ с формированием бинарного вывода о наличии либо отсутствии встроенных данных в анализируемых файлах изображений. Разработанный стегодетектор представлен программным комплексом StegoRevealer, зарегистрированным в Роспатенте, который демонстрирует возможности стегоанализа на тестовом стенде с производительностью 656 гигафлопс: изображение с разрешением около 1,2 мегапикселя обрабатывается за 300 мс. Комплекс также эффективно обрабатывает до 100 поступающих запросов в секунду (*RPS*) с 2 % деградации производительности. Это позволяет осуществлять стегоанализ изображений в режиме, близком к режиму реального времени, особенно при использовании современного серверного микропроцессорного оборудования.

Ключевые слова: стегоанализ; стеганография; стегодетектор; изображения; автоматизированные системы.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-03-226-238

▼ Введение

Работа современных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) и интеллектуальных транспортных систем (ИТС) связана с использованием средств технического зрения для визуального мониторинга и фотофиксации. В этой связи в данных системах, как правило, присутствует циркуляция графической информации в форме файлов изображений, получаемых с камер и сенсоров. Они возникают, в частности, в рамках:

- систем дистанционного видеоконтроля при движении вагонами вперед (в блоках индикации, где графические данные передаются по радиоканалу с камер машинисту) [1];
- систем определения препятствий [2];
- систем дистанционного наблюдения (в частности, визуального контроля за свободностью пути, диагностики дефектов пути и т. п.) [3, 4];

- бортовых систем тягового подвижного состава, работающих, например, в рамках пилотных проектов на Московском центральном кольце и обеспечивающих автоматическую передачу ограничений скорости, в том числе при обнаружении препятствий, расшифровке знаков и сигналов [5];
- подсистемы интеллектуального коммерческого осмотра поездов и вагонов, которая использует средства технического зрения для осуществления фотодиагностики при осмотре состояния вагонов, контейнеров и грузов [6];
- интеллектуальных систем обнаружения нарушений в соблюдении требований безопасности при работах на объектах железнодорожной инфраструктуры [7];
- модулей Цифровой железнодорожной станции, где файлы графических данных могут быть частью информации, циркулирующей

в модуле электронного документооборота, модуле автоматизированной диагностики технического состояния и коммерческих неисправностей, а также в других модулях, использующих средства технического зрения для автоматического управления работой станции [8, 9].

Угроза наличия несанкционированных скрытых данных или их повреждения в файлах изображений, циркулирующих в подсистемах сбора и обработки данных АСУ ТП и ИТС, повышает вероятность принятия ложных управляющих решений, особенно при формировании сигналов в автоматическом режиме.

Целью работы является автоматизация стегоанализа путем создания программного комплекса для АСУ ТП и ИТС, обеспечивающего достоверность и аутентичность графической информации. Для достижения цели решены следующие задачи:

- определение задач автоматизации стегоанализа;
- выбор автоматизируемой методики осуществления стегоанализа изображений;
- разработка схемы интеграции стегодетектора в АСУ ТП и ИТС;
- проектирование и программная реализация стегодетектора;
- тестирование разработанного стегодетектора.

1. Обзор проблемы

В настоящее время стеганография является перспективным средством обеспечения защищенных и надежных каналов связи в рамках ИТС [10]. Помимо уже существующих и активно развивающихся направлений, связанных с использованием цифровых водяных знаков (ЦВЗ) [11, 12] на основе стеганографии, ведется также разработка систем стеганографической передачи изображений между транспортными средствами и инфраструктурой [10, 13].

При этом рост популярности стеганографии как средства обеспечения надежных и защищенных каналов передачи данных сказывается также и на росте инцидентов информационной безопасности, связанной со встраиванием данных в файлы изображений [14]. Цифровые системы транспорта все чаще сталкиваются

со злоумышленным применением стеганографии в файлах изображений [15, 16], что ведет к нарушению подлинности и достоверности графических данных, циркулирующих в системе.

Так как ИТС являются объектами критической информационной инфраструктуры, циркулирующие в них данные передаются по защищенным каналам связи. Существуют решения, нацеленные на предотвращение возможности интегрирования вредоносного программного обеспечения в управляющие программы на стадии разработки — например, за счет применения технологии *Security-by-Design* [17].

Тем не менее ИТС регулярно подвергаются кибератакам на узлы подсистем технического зрения, сбора и обработки графических данных. Зачастую атакам подвергаются камеры [18, 19], что позволяет злоумышленникам осуществлять подмену или модификацию графических данных. Подобные инциденты представляют угрозу для любых систем, использующих средства технического зрения, например — комплексов контроля скорости [20]. Уязвимости могут возникать в разных узлах и на различных этапах работы систем сбора, передачи и обработки графической информации, что позволяет подменять, обрезать и иным образом модифицировать визуальные данные [21].

Таким образом, возникает необходимость в разработке средств независимого (от уже используемых средств работы со стеганографией или проверки достоверности) контроля за наличием стеганографически встроенных в файлы изображений данных в целях обеспечения надежности АСУ ТП и ИТС.

2. Обеспечение достоверности графических данных

Задача обеспечения надежности АСУ ТП включает поддержание аутентичности (подлинности¹) и анализ достоверности графических данных в подсистемах сбора, хранения и обработки информации. В рамках систем железнодорожного транспорта такие данные могут поступать от бортовых систем в

¹ ГОСТ Р 43.0.26—2022. Информационное обеспечение техники и операторской деятельности. Качество информации в технической деятельности.

информационные системы ОАО «РЖД», где происходит накопление и сохранение диагностических и эксплуатационных данных [8].

Комплексная программа развития ОАО «РЖД» ставит соответствующие задачи обеспечения надежности и безопасности в рамках цифровизации транспортной инфраструктуры [22]. Аналогичные требования устанавливаются и для других ИТС и АСУ ТП, особенно связанных с отраслями, объектами и производствами, отнесенными к перечню объектов критической информационной инфраструктуры².

Применительно к файлам изображений важную роль в обеспечении достоверности и подлинности может играть стеганография. В этой связи можно выделить два основных аспекта, не исключая друг друга:

1. Злоумышленное использование стеганографии, приводящее к нарушению подлинности и/или достоверности графической информации.

2. Использование стеганографии для установки ЦВЗ в целях подтверждения подлинности файлов изображений и предотвращения возможных нарушений или искажений (как случайных, так и умышленных), приводящих к невозможности корректной интерпретации ЦВЗ.

В обоих случаях решение возникающих проблем требует применения средств стеганографического анализа. Слепые методы стегоанализа позволяют идентифицировать стеганографическое встраивание на основе исследования лишь самого файла изображения без использования дополнительных входных данных. Это позволяет:

1. Обнаруживать несанкционированное применение стеганографии в файлах изображений.

2. Быстро проверять наличие либо отсутствие встроенной информации в случае ее ожидания (например, не пытаться извлекать встроенный ЦВЗ, если он отсутствует, и идентифицировать проблему подтверждения подлинности файла на основе ЦВЗ как возникающую из-за отсутствия ЦВЗ как такового, а не

его повреждения или нарушения протоколов встраивания и извлечения данных).

3. Осуществлять проверку отсутствия стеганографического встраивания, в том числе:

- проверять устойчивость к анализу и обнаруживаемость используемых стеганографических алгоритмов (например, используемых для установки ЦВЗ);
- разделять следование графических данных по разным каналам передачи данных при необходимости отправки их на различные конвейеры обработки в зависимости от наличия или отсутствия встроенной информации (в данном случае независимо от целей использования стеганографии).

Таким образом, методы стегоанализа должны применяться в системах, связанных с обработкой графической информации и реализующих функционал технического зрения, совместно с методами стеганографии или для потенциального противодействия ее использованию.

Отдельную проблему может представлять использование нейросетевых технологий для осуществления фотодиагностики [6] в связи с появлением различного рода адверсариальных атак [23, 24], способных за счет незначительных преднамеренных искажений нарушать корректную работу распознающих моделей, построенных на основе искусственных нейросетей и других методов машинного обучения.

Передача недостоверных графических данных в упомянутых системах может вести к формированию некорректных выводов и ошибкам, непосредственно ухудшающим надежность и безопасность функционирующих автоматизированных систем. Достоверность данных — в том числе графических — на основе которых выполняются оценки и принимаются решения, является базовым фактором, определяющим эффективность формирования управляющих сигналов.

3. Особенности реализации автоматизированного стегоанализа в рамках ИТС

Реализация автоматизированного стегоанализа в рамках ИТС требует формального выделения задач автоматизации стегоанализа

² ГОСТ 24.701—86. Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Надежность автоматизированных систем управления. Основные положения.

с целью обеспечения возможности внедрения стегоаналитического детектора изображений в ИТС [25]. Ключевыми являются две задачи:

1. Обеспечение автоматизации процессов стегоанализа и вычисления дополнительных характеристик — в частности, оценок качества изображений.

2. Возможность осуществления автоматизированного анализа графических данных — то есть предоставление программного или аппаратно-программного интерфейса для запуска анализа и получения в результате стегоаналитического вывода (в бинарной форме («встраивание обнаружено» / «встраивание не обнаружено») и/или в виде числовой оценки вероятности наличия встроенной информации).

Рассмотрим варианты решения первой задачи.

В связи с наличием угроз адверсарияльных атак (и, возможно, схожих с ними непреднамеренных искажений, также способных нарушать работу модулей нейросетевой фотодиагностики) затруднительным выглядит использование нейросетевых методов стегоанализа: помимо прочих проблем, они могут быть крайне чувствительны к такого рода искажениям [26]. С точки зрения надежности автоматизированной системы приоритет следует отдавать более «стабильным» методам стегоанализа. Они в меньшей степени подвержены резкому снижению точности при искажениях во входных данных и универсальны в обнаружении непредусмотренных видов встраивания. Хотя их точность при анализе известных методов стеганографии ниже, чем у нейросетевых, зато они нацелены на обнаружение конкретных данных.

Этим условиям отвечает стегоаналитический подход с применением «богатых моделей» признаков, бинарных классификаторов и ансамблевых моделей [26–29].

Для обнаружения наиболее частого типа стеганографии в пространственной области (значения цветовой интенсивности пикселей) предлагается методика комплексного статистического стегоанализа. Она основана на совместном применении методов *Chi-Square Attack (CSA)* и *Regular-Singular (RS)*, а также учете оценок качества изображения в бинарном

классификаторе на основе модели случайного леса [29].

В соответствии с классификацией, представленной в [30], методы *CSA* и *RS* являются слепыми, не требуют для своей работы иных данных, кроме непосредственно файла графического формата, задействуют статистический аппарат и не предполагают использование процедур машинного обучения.

Методика комплексного статистического стегоанализа основана на формировании совместного вывода согласно оценкам относительного объема скрытой информации, полученным с применением методов *CSA* и *RS*.

В рамках метода *CSA* анализируется статистика *pair of values (PoV)* — пар из двух байт цветовой интенсивности, которые между собой отличаются на один наименее значащий бит (НЗБ) [31]. В незаполненном стегоконтейнере вероятность одновременного появления обоих значений каждой *PoV* мала, поэтому частоты значений одной пары существенно различаются. Таким образом, применение стеганографии приближает значение каждой из частот пары к их среднему арифметическому в рамках *PoV*. Для оценки существенности приближения частот пар значений к их средним значениям используется критерий Хи-квадрат.

Метод *Regular-Singular (RS)* основан на анализе небольших непересекающихся групп смежных пикселей и их подсчете [32]. Для классификации этих групп по трем категориям — обычные, необычные и непригодные — осуществляется вычисление функции регулярности для оригинальной и перевернутой группы (переворот эмулирует добавление обратимого шума, уменьшая регулярность группы) по выбранной маске и инвертированной версии этой же маски.

Таким образом, подсчитываются четыре ключевых значения: R_M — относительное количество обычных групп (доля от общего количества групп) для обычной маски, S_M — относительное количество необычных групп для обычной маски, R_{-M} — относительное количество обычных групп для инвертированной маски, S_{-M} — относительное количество необычных групп для инвертированной маски. Метод *RS* основывается на утверждении, что в

незаполненном стегоконтейнере количества групп одного класса для обычной и инвертированной маски должны быть равны: $R_M \approx R_{-M}$ и $S_M \approx S_{-M}$ [32].

Первый метод точнее при анализе последовательного встраивания в НЗБ пикселей, второй — при псевдослучайном. Их совместное применение дает более точную оценку, чем использование каждого метода по отдельности [33].

Помимо этого, созданная авторами методика использует ряд дополнительных оценок и параметров изображения в целях повышения итоговой точности результата — в особенности при небольших значениях относительного объема встроенных данных. Для этого используются:

- оценка стегоанализа потенциального встраивания по методу Коха — Жао, снижающая влияние статистических аномалий в частотной области изображения на точность метода *RS*;
- суммарное количество пикселей изображения, влияющее на точность статистических методов стегоанализа в связи с тем, что именно значения интенсивности цвета пикселей изображения составляют набор данных, к которому применяются методы математической статистики и теории вероятности.

Ключевой особенностью методики комплексного статистического стегоанализа является учет абсолютных количественных оценок качества изображения: зашумленности, резкости, размытости, контраста и энтропии. Традиционные статистические методы стегоанализа чувствительны к визуальному качеству изображений. Учет этих оценок увеличивает точность стегоанализа (особенно для низкокачественных изображений) и снижает вероятность ложноположительных результатов.

Это важно при анализе изображений систем технического зрения, где съемка может вестись в движении (что вызывает размытость), в плохую погоду, при недостаточной освещенности или переэкспозиции. Все это влияет на контрастность и оценку энтропии.

В этой связи именно предлагаемая методика оценивается как рекомендуемая для осуществления стегоанализа изображений в условиях возможного наличия изображений низкого качества — в частности, в модулях анализа

достоверности графических данных в системах АСУ ТП и ИТС.

Для формирования окончательного вывода о наличии либо отсутствии стеганографического встраивания в изображении в рамках методики комплексного статистического стегоанализа используются методы машинного обучения: а именно обученная модель бинарной классификации на основе алгоритма случайного леса [29]. Ее точность на тестовых выборках (изображения разного качества и разрешения со встраиванием в НЗБ и пустыми стегоконтейнерами) составляет 95,9 % при анализе изображений с одним НЗБ и 95,7 % — с двумя НЗБ.

В рамках конкретного внедрения в те или иные АСУ ТП или ИТС данные, используемые для обучения модели, могут быть уточнены на основе массивов реальных накопленных в таких системах графических данных с целью увеличения эффективности стегоанализа для конкретных автоматизированных систем.

Решение второй задачи представляет собой стандартный подход в виде развертывания прикладного программного интерфейса (*API*) — например, в форме развертывания сервера *API*, который будет принимать стегоаналитические запросы и возвращать запрашивающей системе или пользователю требуемый, соответствующий поставленной задаче машинно-интерпретируемый результат.

Данный интерфейс основан на клиент-серверной архитектуре, где сервером выступает *API*, иницирующий по запросу от клиента осуществление стегоаналитической процедуры. Так как отсутствует необходимость хранения информации о состоянии клиентов между запросами, разумной является реализация такого сервера *API* с применением архитектурного стиля *REST*, соответствие которому отвечает возможностям повышения надежности, производительности и масштабируемости [34].

Таким образом, решение обеих задач — это программный комплекс с функцией детектирования стеганографии, или стегодетектор.

Схема интеграции такого стегодетектора в АСУ ТП или ИТС представлена на рис. 1.

В качестве реализации методики комплексного статистического стегоанализа был

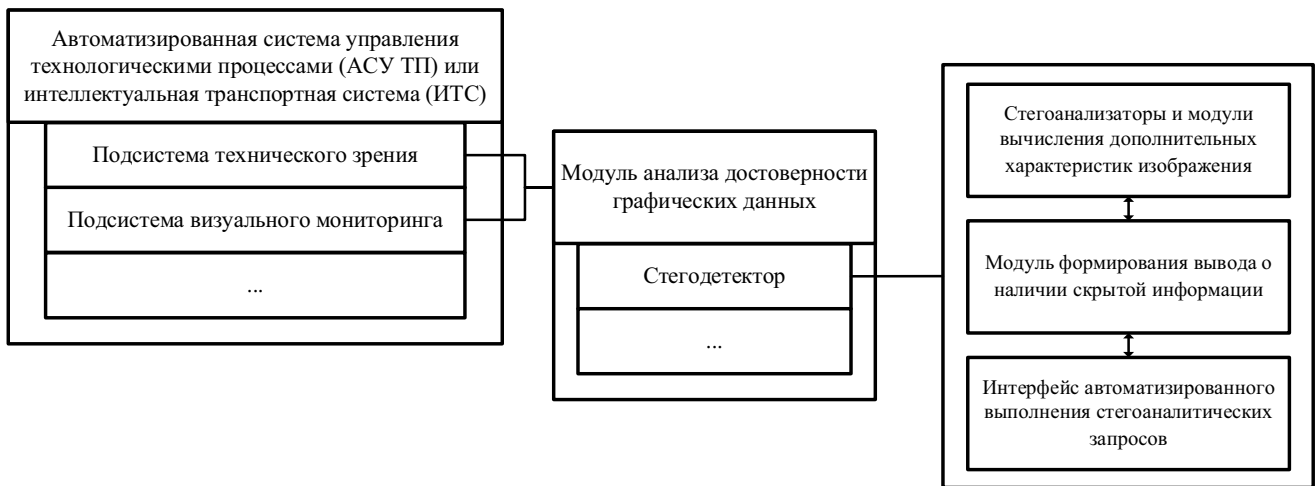


Рис. 1. Схема интеграции стегодетектора в АСУ ТП или ИТС

разработан программный стегодетектирующий комплекс StegoRevealer, зарегистрированный в Роспатенте [35].

4. Программный стегодетектирующий комплекс StegoRevealer

Разработанный программный комплекс имеет несколько форм взаимодействия с ним — интерфейсов. Ключевым в рамках решения поставленных задач автоматизации выполнения стеганографического анализа является интерфейс взаимодействия посредством сервера *API*: развертывание данного сервера позволяет осуществлять в автоматизированном режиме запросы на выполнение стегоанализа изображения и получать бинарный ответ — вывод о наличии либо отсутствии встроенной информации согласно результату работы реализованного алгоритма методики комплексного статистического стегоанализа.

Помимо этого, предоставляются и два интерфейса ручного взаимодействия с программным комплексом — консольный (*CLI*) и графический (*GUI*) (рис. 2). Это необходимо для поддержки возможности выполнения стегоаналитических операций аналитиком или оператором системы в случае возникновения инцидентов или спорных ситуаций, в рамках которых именно оператор должен принять то или иное управляющее решение — в том числе на основе выводов о достоверности учитываемой графической информации.

CLI- и *GUI*-интерфейсы обеспечивают возможность ручного выполнения стегоанализа

как в системах без графического интерфейса, так и с ним.

В рамках программной реализации необходима выработка решений по ряду ключевых вопросов:

1. Выбор языка программирования и фреймворков, ключевых библиотек.
2. Выбор архитектурных паттернов.

В рамках разработки комплекса StegoRevealer используются:

- язык программирования *C#* и среда *.NET 9.0*;
- *UI*-фреймворк *Avalonia* и архитектура *MVVM*;
- *API*-фреймворк *ASP.NET* и архитектура *MVC*.

Выбор языка, среды и фреймворков в первую очередь обуславливался возможностями кроссплатформенной разработки и развертывания приложения на операционных системах как семейства *Windows*, так и *Linux* для возможности использования программного обеспечения в рамках современных отечественных систем (реализующих программы импортозамещения и имеющих сертификаты Минцифры) — таких как *Astra Linux*, *Red OS*, *Alt*. Выбранный технологический стек позволил вести разработку универсальным способом, практически не прибегая к ветвлению и вызовам различных функций и операторов в зависимости от операционной системы. Большинство различий в реализации уже инкапсулированы внутри используемых фреймворков и среды *.NET*.

На рис. 3 представлена архитектурная схема основных компонентов разработанного программного комплекса.

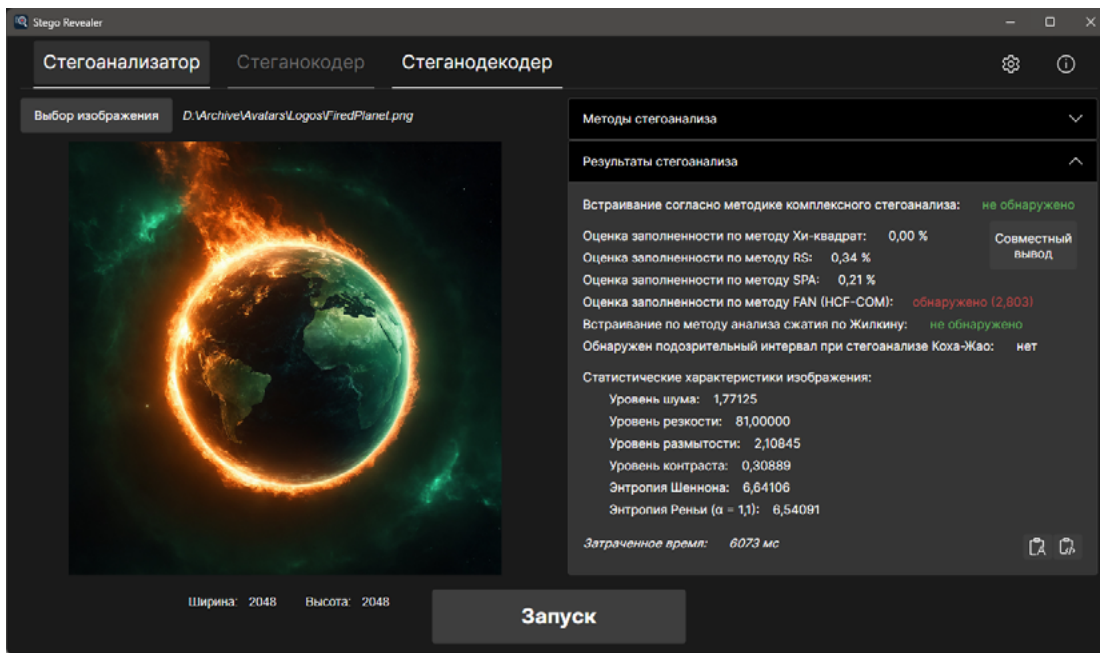


Рис. 2. Скриншот GUI-интерфейса программы

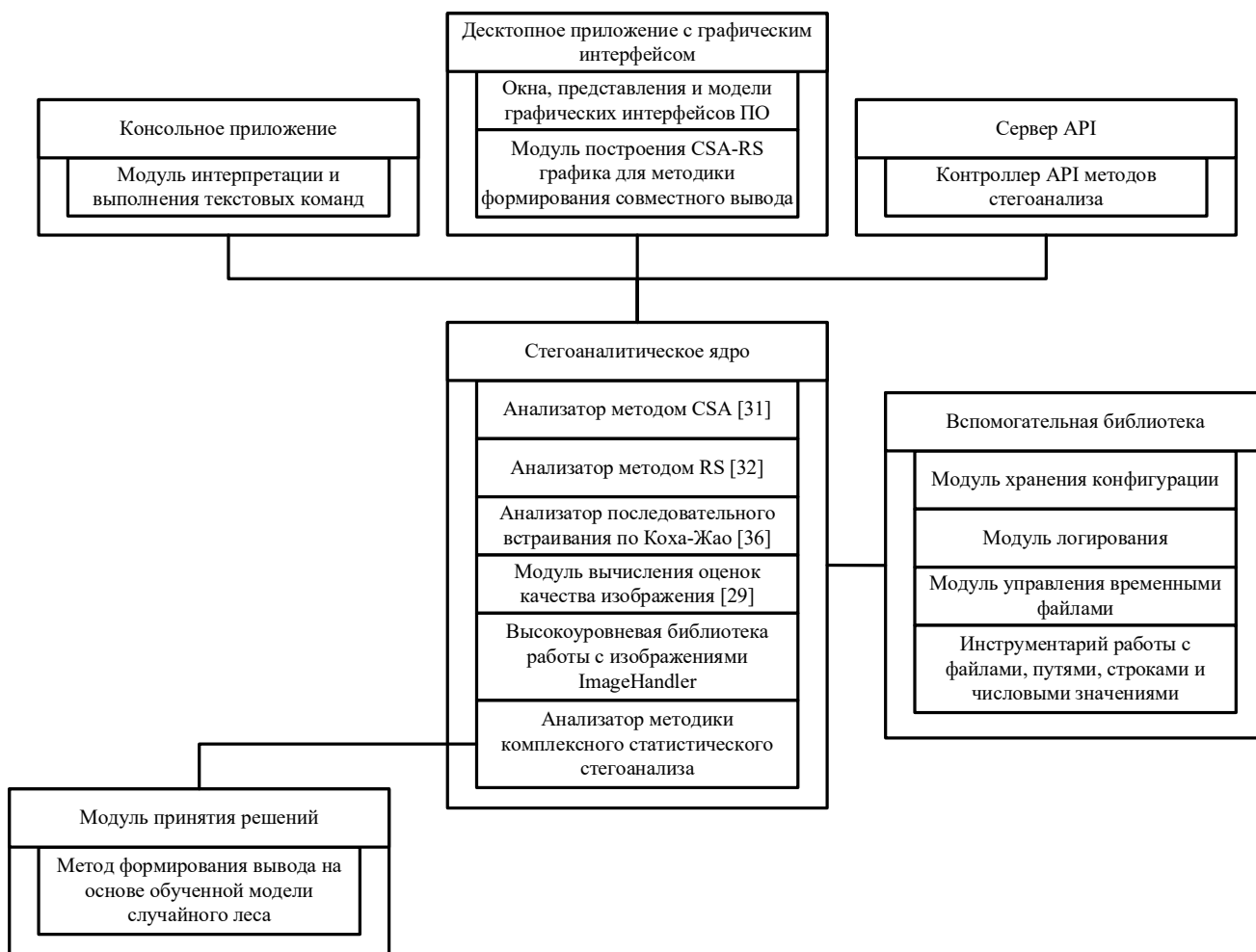


Рис. 3. Архитектурная схема организации модулей StegoRevealer

Точность работы стегодетектора определяется модулем принятия решений — то есть результатами использования методики комплексного статистического стегоанализа, точностью обученного бинарного классификатора на основе модели случайного леса [37]. Вторым по важности ключевым фактором оценки применимости стегодетектора следует считать скорость стегоанализа файлов изображений, что соответствует адекватности решения задачи выполнения автоматизированного анализа трафика в системе. Слишком долгое выполнение стегоаналитических операций будет приводить к существенным задержкам на этапе анализа достоверности и, соответственно, общему увеличению задержек передачи информации в системе.

Так как в рамках АСУ ТП первоочередной является эффективность и скорость работы стегодетектора, развернутого в форме сервера *API*, было выполнено тестирование скорости работы данного компонента. Тестирование производилось на макете, представляющем собой два персональных компьютера (стенда), связанных по локальной сети со скоростью не менее 1 Гбит/с. Стенд, на котором было выполнено развертывание сервера *API* StegoRevealer, обладает процессором с производительностью около 656 Гигафлопс (при точности *FP32*) и 20 логическими потоками. Так как осуществленная реализация стегодетектора использует именно процессорные вычисления для выполнения алгоритмов, производительность центрального процессора является ключевым фактором, определяющим быстродействие.

В рамках тестирования было выполнено несколько тестовых испытаний.

Первое включало в себя последовательный стегоанализ 2642 файлов изображений различного разрешения, как включающих встроенные данные, так и являющиеся пустыми контейнерами. Общее время выполнения составило 799,99 с, среднее арифметическое время выполнения одного стегоаналитического запроса — 302,75 мс.

Второе испытание было направлено на проверку быстродействия при параллельном выполнении стегоаналитических запросов. Для одинаковой по составу выборки из 1000

Таблица 1. Испытание быстродействия сервера *API* при различном числе одновременно отправленных запросов

Количество параллельных запросов	Среднее время выполнения одного запроса, мс	Суммарное время анализа тестируемого набора изображений, с
1	264,99	265,29
2	360,49	180,5
5	683,67	137,16
10	1 300,09	130,78
100	11 223,4	118,79
1000	94 096,96	171,72

Таблица 2. Результаты нагрузочного тестирования

$RPS_{ц}$	$RPS_{ф}$	$e, \%$	Средняя нагрузка на процессор, %
1	1	0	5,69
5	5	0	9,99
10	9,8	2	26,49
20	18,9	5,5	63,45
50	43,2	13,6	78,49
100	82,4	17,6	78,38
200	143,3	28,35	78,29
500	256,3	48,74	79,13
1000	410,7	58,93	79,59

изображений формировалось и направлялось к стенду с сервером *API* различное количество одновременных запросов. После отправки запросов ожидалась все ответы, после чего направлялась следующая группа запросов. Таким образом была осуществлена фактически пакетная обработка всего тестового набора. Результаты испытания приведены в табл. 1.

Заметно, что при тестировании до 100 запросов включительно эффективность растет — суммарное время анализа всей выборки уменьшается, однако при выполнении одновременно 1000 запросов производительность сервера *API* начинает деградировать.

В рамках третьего тестового испытания было организовано нагрузочное тестирование сервера с различными целевыми значениями запросов в секунду (*RPS*). Такой вид тестирования подразумевает направление определенного количества

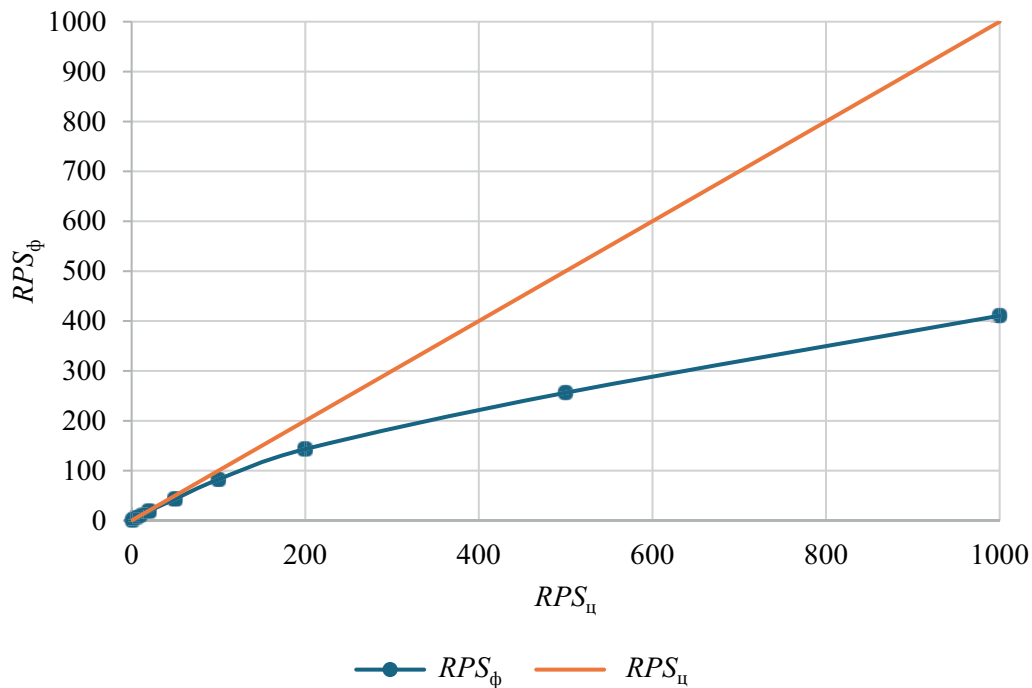


Рис. 4. График RPS при нагрузочном тестировании

запросов обработки в секунду вне зависимости от скорости их выполнения. Для каждого RPS была вычислена степень деградации производительности, отражающая относительную величину падения фактического RPS по сравнению с целевым:

$$e = 100 \left(1 - \frac{RPS_{ф}}{RPS_{ц}} \right), \quad (1)$$

где e — степень деградации (относительная величина падения фактического RPS в %);

$RPS_{ф}$ — фактическое значение RPS ;

$RPS_{ц}$ — целевое значение RPS .

В табл. 2 представлены результаты тестового испытания, на рис. 4 — график зависимости между целевым и фактическим значением RPS .

В ходе всех трех проведенных испытаний значение пиковой нагрузки на центральный процессор при осуществлении стегаанализа составляло 100 % рабочего времени. Как видно из результатов нагрузочного тестирования, в среднем это значение составляет почти 80 %. Это отражает достаточно высокую эффективность использованных методов многопоточной реализации алгоритмов стегаанализа, позволяющих в полной мере задействовать все доступные ядра и логические потоки

процессора, исключая редкие логические ситуации вынужденного ожидания (например, ожидания завершения вычисления всех оценок методами стегаанализа и оценок качества изображения перед выполнением процедуры формирования итогового вывода — в этом случае время выполнения параллельных операций определяется временем выполнения самого долгого из методов; или в рамках алгоритма стегаанализа методом *CSA*, где выполняется обход строк матрицы пикселей последовательно с учетом значений всех предыдущих строк).

Для оценки быстродействия стегадетектора при анализе изображений конкретных размеров (имеющих практическую значимость с точки зрения применения в реальных системах технического зрения) были выполнены аналогичные первым двум испытаниям тесты на выборке, состоящей из изображений одинакового разрешения. Для выборки использован датасет [38], состоящий из графических файлов размера 1280×960 , то есть с общим разрешением в 1,23 мегапикселя. Выбор подобного разрешения в целях тестирования обусловлен наличием требований к источникам видеосигнала в рамках технических средств обеспечения транспортной безопасности, согласно которым разрешение кадра должно составлять

не менее 1200×1000 пикселей, то есть не менее 1,2 мегапикселя³.

Выполнение последовательного стегоанализа на вышеописанной выборке из 8570 изображений составило 2568 с в сумме и 299,75 мс в среднем на изображение. Продолжительность стегоанализа всей выборки при пакетной отправке по 10 запросов одновременно составила 214 с, при отправке по 100 запросов — 200 с, при этом средняя нагрузка на центральный процессор составляла 88,76 и 86,27 % рабочего времени соответственно. Таким образом, при отправке параллельно по 100 запросов для данной выборки среднее арифметическое времени обработки на одно изображение составило около 43 с (данное значение синтетическое и не отражает реально затраченного времени на анализ одного изображения (что демонстрировалось первым тестом) ввиду распределения нагрузки во время простоев и ожиданий на выполнение операций для параллельно обрабатываемых изображений).

При пакетной отправке на обработку одновременно по 200 запросов ранее продемонстрированная деградация производительности (около 30 %) уже начала оказывать существенное влияние на общее время работы: суммарное время выполнения составило 522 с.

Аналогичные тесты были выполнены для выборки из 2096 изображений из датасета [39] с разрешением 1920×1080 (свыше 2 мегапикселей), которые являются распространенным разрешением съемки камер — например, изображения такого размера снимаются блоками индикации мобильных блоков видеоконтроля, используемых на поездах для передачи изображений машинисту. Для них время стегоанализа одного изображения составило в среднем 495 мс, при этом последовательный стегоанализ составил в сумме 1038 с, а анализ пакетами по 100 одновременных запросов — 128 с.

Заключение

Современные серверные процессоры имеют производительность при вычислениях с плавающей точкой (*FP32*) на уровне 2 Терафлопс

и более, что превышает производительность процессора использованного тестового стенда более чем в 3 и раза. Поскольку стегодетектор выполняет вычисления только с помощью процессора, а большинство операций — это вычисления с плавающей точкой *FP32*, при широком использовании многопоточности можно предположить, что на современном серверном оборудовании StegoRevealer выдержит нагрузку 25–30 *RPS* без потери производительности. Это подтверждается тестированием: при целевом значении 10 *RPS* деградация составила 2 %. Дальнейшее увеличение производительности может достигаться за счет установки балансировщиков нагрузки и распределения стегоаналитических запросов между несколькими копиями стегодетектора, развернутыми параллельно на нескольких серверах.

Для применяемых в настоящее время систем технического зрения характерна частота кадров не менее 15 кадров в секунду. Таким образом, имеющаяся у разработанного программного стегодетектора производительность при использовании в реальных производственных системах, предназначенных для обработки графических данных от систем технического зрения, позволяет осуществлять стегоанализ поступающих изображений в режиме реального времени при съемке с частотой 15–25 кадров в секунду, что соответствует техническим характеристикам камер, используемых в таких системах.

Стегодетектор StegoRevealer реализует разработанную авторами методику комплексного статистического стегоанализа, основанную на совместном применении ряда традиционных статистических стегоаналитических методов. При использовании бинарной классификации для формирования вывода точность (*precision*) стегодетектора на тестовых выборках составляет 96 %, правильность (*accuracy*) — 95 % при анализе встраивания в 1 НЗБ и 92 % при анализе встраивания в 2 НЗБ.

Разработанный программный комплекс StegoRevealer внедрен в процесс обучения студентов кафедры «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ) в 2022 году. Использование его студентами при решении стегоаналитических задач позволило

³ Постановление Правительства Российской Федерации от 26 сентября 2016 г. № 969.

осуществить его апробацию при выполнении анализа изображений через графический интерфейс в ручном режиме (эмулируя действия стегоаналитика — специалиста или оператора, которому требуется осуществить проверку подозрительного файла графического формата). Поскольку и графический интерфейс, и *API* комплекса используют одно и то же программное ядро для выполнения стегоаналитических операции, успешное использование комплекса студентами в образовательных целях подтверждает корректность работы реализации выбранных методов и методики комплексного статистического стегоанализа.

Благодарности

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания от 20.03.2025 № 103-00001-25-02. ▲

Список источников

1. Александров Е. А. Система дистанционного видеоконтроля при движении вагонами вперед / Е. А. Александров // Железные дороги мира. — 2025. — № 4. — С. 48–50.
2. Патент на полезную модель № 212718 U1 Российская Федерация, МПК В61L 29/00. Устройство обнаружения препятствий на пути движения рельсового транспортного средства: № 2022111729: заявл. 28.04.2022: опубл. 03.08.2022 / И. А. Дейлид, И. Н. Королев, С. В. Кудряшов, П. А. Попов; заявитель ОАО «РЖД».
3. Малинский С. В. Автоматическое определение границ опасных участков железнодорожного пути / С. В. Малинский, А. В. Абрамов, В. О. Шарова // Интеллектуальные транспортные системы: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 22 мая 2025 г. — М.: РУТ (МИИТ), 2025. — С. 624–630.
4. Патент № 2680927 С1 Российская Федерация, МПК В61К 9/08, G01N 27/82, G01N 29/04. Способ диагностики рельсового пути и синхронизации результатов измерений: № 2018104776: заявл. 07.02.2018: опубл. 28.02.2019 / А. А. Марков, А. Г. Антипов, А. Ю. Веревкин; заявитель ОАО «Радиоавионика».
5. Розенберг Е. Н. Актуальность и этапы перехода на интеллектуальное управление эксплуатационной работой железнодорожного транспорта / Е. Н. Розенберг, М. А. Дежков, А. А. Никонюк // Интеллектуальные транспортные системы: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 22 мая 2025 г. — М.: РУТ (МИИТ), 2025. — С. 369–375.
6. Нутович В. Е. Формализованные методы обработки информации, анализа и синтеза системы интеллектуального коммерческого осмотра вагонов / В. Е. Нутович // Наука и техника транспорта. — 2023. — № 3. — С. 77–85.
7. Сидоренко В. Г. Интеллектуальная система обнаружения нарушений в соблюдении требований безопасности при работах на объектах железнодорожной инфраструктуры / В. Г. Сидоренко, М. А. Кулагин, Д. М. Родина // Автоматика на транспорте. — 2025. — Т. 11. — № 1. — С. 55–65.
8. Андреев В. Е. Цифровая железнодорожная станция — от концепции к реальному внедрению / В. Е. Андреев, А. И. Долгий, В. В. Кудюкин и др. // Автоматика, связь, информатика. — 2023. — № 9. — С. 2–6.
9. Кудюкин В. В. Имитационное моделирование работы робототехнических комплексов, предназначенных для расформирования составов на сортировочных горках / В. В. Кудюкин, А. В. Вуколов, В. С. Кузьмин // Автоматика на транспорте. — 2025. — Т. 11. — № 1. — С. 16–29.
10. Ansari A. S. A Review on the Recent Trends of Image Steganography for VANET Applications / A. S. Ansari // Computers, Materials and Continua. — 2024. — Vol. 78. — Iss. 3. — Pp. 2865–2892.
11. Shedole S. M. A Comprehensive Study on Digital Watermarking for Security Threats and Research Directions / S. M. Shedole, V. Santhi // International Journal of Data Informatics and Intelligent Computing. — 2025. — Vol. 4. — Iss. 1. — Pp. 54–72.
12. Hu K. Learning-based image steganography and watermarking: A survey / K. Hu, M. Wang, X. Ma, J. Chen // Expert Systems with Applications. — 2024. — Iss. 249.
13. Hahn D. Security and Privacy Issues in Intelligent Transportation Systems: Classification and Challenges / D. Hahn, A. Munir, V. Behzadan // IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine. — 2021. — Vol. 13. — Iss. 1. — Pp. 181–196.
14. Сидоренко В. Г. Противодействие угрозам информационной безопасности, связанным с применением средств стеганографии / В. Г. Сидоренко, Я. Л. Грачев // Автоматика, связь, информатика. — 2025. — № 1. — С. 17–22.
15. Security Brief: Actor Uses Compromised Accounts, Customized Social Engineering to Target Transport and Logistics Firms with Malware. — URL: <https://www.proofpoint.com/us/blog/threat-insight/security-brief-actor-uses-compromised-accounts-customized-social-engineering> (дата обращения: 28.09.2024).
16. Sea-Tac Airport officials confirm cyberattack disrupted service, websites. — URL: <https://www.seattletimes.com/business/sea-tac-airport-officials-say-cyberattack-disrupted-service-websites/> (дата обращения: 29.09.2024).
17. Матюшин А. Кибериммунный подход к проектированию как практическая реализация концепции Security-by-Design / А. Матюшин, Е. Рудина // CONNECT. Мир информационных технологий. — 2023. — № 7–8. — С. 38–44.
18. Anonymous hacked Russian cams, websites, announced a clamorous leak. — URL: <https://securityaffairs.com/128847/hackivism/anonymous-vs-russia.html> (дата обращения: 16.08.2025).
19. Самый беззащитный — уже не Сапсан. Все оказалось куда хуже... — URL: <https://habr.com/ru/articles/536750/> (дата обращения: 13.08.2025).
20. Cyberattack on Dutch prosecution service is keeping speed cameras offline. — URL: https://www.theregister.com/2025/08/15/cyberattack_on_dutch_prosecution_service/ (дата обращения: 15.08.2025).

21. Vulnerabilities in Johnson Controls' exacqVision Web Service Expose Security Systems to Video-Stream Hijacking. — URL: <https://www.nozominetworks.com/blog/vulnerabilities-in-johnson-controls-exacqvision-web-service-expose-security-systems-to-video-stream-hijacking> (дата обращения: 15.08.2025).
22. Комплексная программа инновационного развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года. — URL: <https://company.rzd.ru/ru/9990/page/103290?id=19093> (дата обращения: 05.01.2025).
23. Tao F. Adversarial Attack for Deep Steganography Based on Surrogate Training and Knowledge Diffusion / F. Tao, Ch. Cao, H. Li et al. // *Applied Sciences (Switzerland)*. — 2023. — Vol. 13. — Iss. 11. — P. 6588.
24. Григоренко А. Г. Обзор методов защиты от адверсальной атаки One Pixel в системах машинного обучения / А. Г. Григоренко, Н. А. Васильев, Д. С. Ситдииков // *Системы интеллектуального управления и искусственный интеллект: теория и практика: сб. тр. II нац. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 27 июня 2024 г.* — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2024. — С. 30–36.
25. Грачев Я. Л. Задачи автоматизации стегоанализа / Я. Л. Грачев, В. Г. Сидоренко // *Интеллектуальные транспортные системы: материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 25 мая 2023 г.* — М.: РУТ, 2023. — С. 450–455.
26. Грачев Я. Л. Анализ степени разработанности темы стегоанализа в файлах графических форматов / Я. Л. Грачев, В. Г. Сидоренко // *Интеллектуальные транспортные системы: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 22 мая 2025 г.* — М.: РУТ (МИИТ), 2025. — С. 502–511.
27. Fridrich J. Rich Models for Steganalysis of Digital Images / J. Fridrich, J. Kodovsky // *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*. — 2012. — Vol. 7. — Iss. 3. — Pp. 868–882.
28. Fridrich J. *Steganography in Digital Media. Principles, Algorithms, and Applications* / J. Fridrich. — Cambridge: Cambridge University Press, 2010. — 431 p.
29. Грачев Я. Л. Использование качественных характеристик изображения для комплексного стегоанализа / Я. Л. Грачев, В. Г. Сидоренко // *Надежность*. — 2025. — Т. 25. — № 1. — С. 67–74.
30. Грачев Я. Л. Применение стегоанализа для обеспечения целостности информации в интеллектуальных системах транспорта / Я. Л. Грачев, В. Г. Сидоренко // *Интеллектуальные транспортные системы: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 26 мая 2022 г.* — М.: РУТ, 2022. — С. 389–396.
31. Westfeld A. *Attacks on Steganographic Systems Breaking the Steganographic Utilities EzStego, Jsteg, Steganos, and S-Tools — and Some Lessons Learned* / A. Westfeld, A. Pfitzmann // *Lecture Notes in Computer Science*. — 1999.
32. Fridrich J. Reliable detection of LSB steganography in color and grayscale images / J. Fridrich, M. Goljan, R. Du // *Proceedings of the 2001 workshop on Multimedia and security new challenges — MM&Sec '01*. — New York: ACM Press, 2001. — P. 27.
33. Грачев Я. Л. Стегоанализ методов скрытия информации в графических контейнерах / Я. Л. Грачев, В. Г. Сидоренко // *Надежность*. — 2021. — Т. 21. — № 3. — С. 39–46.
34. Fielding R. T. Architectural styles and the design of network-based software architectures / R. T. Fielding. — 2001. — Pp. 76–106.
35. Свид. 2025614424 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа комплексного стегоаналитического детектирования «StegoRevealer» / Я. Л. Грачев. — зарегистр. 21.02.2025.
36. Белим С. В. Стегоанализ алгоритма Коха — Жао / С. В. Белим, Д. Э. Вильховский // *Математическое и компьютерное моделирование: сб. материалов VI Междунар. науч. конф., Омск, 23 ноября 2018 г.* — Омск: Омский гос. ун-т им. Ф. М. Достоевского, 2018. — С. 185–188.
37. Breiman L. *Random Forests* / L. Breiman // *Machine Learning*. — 2001. — Vol. 45. — Iss. 1. — Pp. 5–32.
38. LISA Traffic Light Dataset. — URL: <https://www.kaggle.com/datasets/mbornoe/lisa-traffic-light-dataset> (дата обращения: 01.07.2025).
39. Russian traffic sign images dataset. — URL: <https://www.kaggle.com/datasets/watchman/rtsd-dataset> (дата обращения: 01.07.2025).

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 3, pp. 226–238
DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-03-226-238

Implementation of a Comprehensive Statistical Steganography Detector Within the Framework of Intelligent Transport Systems

Information about authors

Sidorenko V. G., Doctor in Engineering, Professor. E-mail: valenfalk@mail.ru
Grachev Ya. L., Postgraduate Student. E-mail: yaroslav446@mail.ru

Russian University of Transport, “Control and Information Security” Department, Moscow

Abstract: The paper discusses the development of a comprehensive statistical steganography detection tool and its implementation in the module for analyzing the reliability of graphic data from automated control systems and ITS. The purpose of this implementation is to verify the authenticity and confirm the reliability of graphic data circulating in the system, received from machine vision devices and other means of image recording and image sensors, and to improve the reliability of automated systems. The developed software steganography detector has been implemented in the form of an API server. This allows the detector to be integrated into an automated system circuit and perform steganographic analysis in automatic mode. The output of this analysis is binary, indicating the presence or absence of embedded data in the analyzed image files.

The developed steganography detector is represented by the StegoRevealer software complex, which is registered with Rospatent. This complex demonstrates the capabilities of steganographic analysis on a test bench, with a performance of 656 gigaflops of images with a resolution of approximately 1.2 megapixels in 300 ms. It also effectively processes a large number of incoming requests simultaneously, up to 100. Concurrently, the server demonstrates a capacity to endure a workload of up to 10 RPS, exhibiting a 2% performance decline. This facilitates the real-time analysis of images using steganography, particularly when employing advanced server microprocessor technology.

Keywords: steganalysis; steganography; steganography detector; images; automated systems.

References

1. Aleksandrov E. A. Sistema dstantsionnogo videokontrolya pri dvizhenii vagonami vpered [Remote video monitoring system for train movement]. *Zheleznye dorogi mira* [World Railways]. 2025, Iss. 4, pp. 48–50. (In Russian)
2. Deylid I. A., Korolev I. N., Kudryashov S. V., Popov P. A. *Ustroystvo obnaruzheniya prep'yatsviy na puti dvizheniya rel'sovogo transportnogo sredstva* [Obstacle detection device for rail vehicles]. Patent RF, no. 212718, 2022. (In Russian)
3. Malinsky S. V., Abramov A. V., Sharova V. O. Avtomaticheskoe opredelenie granits opasnykh uchastkov zheleznodorozhnogo puti [Automatic detection of dangerous railway sections]. *Intellektual'nye transportnye sistemy* [Intelligent Transport Systems]. Moscow: RUT (MIIT) Publ., 2025, pp. 624–630. (In Russian)

4. Markov A. A., Antipov A. G., Verevkin A. Yu. *Sposob diagnostiki rel'sovogo puti i sinkhronizatsii rezul'tatov izmereniy* [Method for railway diagnostics and measurement synchronization]. Patent RF, no. 2680927, 2019. (In Russian)
5. Rozenberg E. N., Dezhkov M. A., Nikonuk A. A. Aktual'nost' i etapy perekhoda na intellektual'noe upravlenie ekspluatatsionnoy raboty zheleznodorozhnogo transporta [Relevance and stages of transition to intelligent railway management]. *Intellektual'nye transportnye sistemy* [Intelligent Transport Systems]. Moscow: RUT (MIIT) Publ., 2025, pp. 369–375. (In Russian)
6. Nutovich V. E. Formalizovannye metody obrabotki informatsii, analiza i sinteza sistemy intellektual'nogo kommercheskogo osmotra vagonov [Formalized methods for intelligent wagon inspection system]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology of Transport]. 2023, Iss. 3, pp. 77–85. (In Russian)
7. Sidorenko V. G., Kulagin M. A., Rodina D. M. Intellektual'naya sistema obnaruzheniya narusheniy v soblyudenii trebovaniy bezopasnosti pri rabotakh na ob'ektakh zheleznodorozhnoy infrastruktury [Intelligent safety violation detection system]. *Avtomatika na transporte* [Automation in Transport]. 2025, vol. 11, Iss. 1, pp. 55–65. (In Russian)
8. Andreev V. E., Dolgij A. I., Kudyukin V. V. et al. Tsifrovaya zheleznodorozhnaya stantsiya — ot kontseptsii k real'nomu vnedreniyu [Digital railway station — from concept to implementation]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, Communication, Informatics]. 2023, Iss. 9, pp. 2–6. (In Russian)
9. Kudyukin V. V., Vukolov A. V., Kuzmin V. S. Imitatsionnoe modelirovanie raboty robototekhnicheskikh kompleksov, prednaznachennykh dlya rasformirovaniya sostavov na sortirovochnykh gorkakh [Simulation of robotic complexes for train marshalling]. *Avtomatika na transporte* [Automation in Transport]. 2025, vol. 11, Iss. 1, pp. 16–29. (In Russian)
10. Ansari A. S. A Review on the Recent Trends of Image Steganography for VANET Applications. *Computers, Materials and Continua*. 2024, vol. 78, Iss. 3, pp. 2865–2892.
11. Shedole S. M., Santhi V. A Comprehensive Study on Digital Watermarking for Security Threats and Research Directions. *International Journal of Data Informatics and Intelligent Computing*, 2025, vol. 4, Iss. 1, pp. 54–72.
12. Hu K., Wang M., Ma X., Chen J. Learning based image steganography and watermarking: A survey. *Expert Systems with Applications*. 2024, Iss. 249.
13. Hahn D., Munir A., Behzadan V. Security and Privacy Issues in Intelligent Transportation Systems: Classification and Challenges. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. 2021, vol. 13, Iss. 1, pp. 181–196.
14. Sidorenko V. G., Grachev Y. L. Protivodeystviye ugrozam informatsionnoy bezopasnosti, svyazannym s primeneniem sredstv steganografii [Counteracting information security threats associated with the use of steganography]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2025, Iss. 1, pp. 17–22. (In Russian)
15. Security Brief: Actor Uses Compromised Accounts, Customized Social Engineering to Target Transport and Logistics Firms with Malware. Available at: <https://www.proofpoint.com/us/blog/threat-insight/security-brief-actor-uses-compromised-accounts-customized-social-engineering> (accessed: September 28, 2024).
16. Sea-Tac Airport officials confirm cyberattack disrupted service, websites. Available at: <https://www.seattletimes.com/business/sea-tac-airport-officials-say-cyberattack-disrupted-service-websites/> (accessed: September 29, 2024).
17. Matyushin A., Rudina E. Kiberimmunnyy podkhod k proektirovaniyu kak prakticheskaya realizatsiya kontseptsii Security-by-Design [Cyberimmune Approach to Design as a Practical Implementation of the Security-by-Design Concept]. *CONNECT. Mir informatsionnykh tekhnologiy* [CONNECT. The World of Information Technologies]. 2023, Iss. 7–8, pp. 38–44. (In Russian)
18. Anonymous hacked Russian cams, websites, announced a clamorous leak. Available at: <https://securityaffairs.com/128847/hacktivism/anonymous-vs-russia.html> (accessed: August 16, 2025).
19. *Samyy bezzashchitnyy — uzhe ne Sapsan. Vse okazalos' kuda khuzhe... [The Most Defenseless Is No Longer Sapsan. Everything turned out to be much worse...]*. Available at: <https://habr.com/ru/articles/536750/> (accessed: August 13, 2025). (In Russian)
20. Cyberattack on Dutch prosecution service is keeping speed cameras offline. Available at: https://www.theregister.com/2025/08/15/cyberattack_on_dutch_prosecution_service/ (accessed: August 15, 2025).
21. Vulnerabilities in Johnson Controls' exacqVision Web Service Expose Security Systems to Video-Stream Hijacking. Available at: <https://www.nozominetworks.com/blog/vulnerabilities-in-johnson-controls-exacqvision-web-service-expose-security-systems-to-video-stream-hijacking> (accessed: August 15, 2025).
22. *Kompleksnaya programma innovatsionnogo razvitiya kholdinga "RZhD" na period do 2025 goda* [Comprehensive innovation development program of RZD holding for the period up to 2025]. Available at: <https://company.rzd.ru/ru/9990/page/103290?id=19093> (accessed: January 5, 2025). (In Russian)
23. Tao F., Cao Ch., Li H. et al. Adversarial Attack for Deep Steganography Based on Surrogate Training and Knowledge Diffusion. *Applied Sciences* (Switzerland). 2023, vol. 13, Iss. 11, p. 6588.
24. Grigorenko A. G., Vasil'ev N. A., Sitdikov D. S. Obzor metodov zashchity ot adversial'noy ataki One Pixel v sistemakh mashinnogo obucheniya [Review of methods for protecting against One Pixel adversarial attack in machine learning systems]. *Sistemy intellektual'nogo upravleniya i iskusstvennyy intellekt: teoriya i praktika: sb. tr. II nats. nauch.-prakt. konf., Sankt-Peterburg, 27 iyunya 2024 g.* [Intelligent control systems and artificial intelligence: theory and practice: Coll. t. II nat. sci.-pract. Conf., St. Petersburg, June 27, 2024]. Saint Petersburg: GUMRF Publ., 2024, pp. 30–36. (In Russian)
25. Grachev Y. L., Sidorenko V. G. Zadachi avtomatizatsii stegoanaliza [Steganalysis Automation Tasks]. *Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Moskva, 25 maya 2023 g.* [Intelligent Transport Systems: Proc. of the II Int. Res. and Pract. Conf., Moscow, May 25, 2023]. Moscow: RUT Publ., 2023, pp. 450–455. (In Russian)
26. Grachev Y. L., Sidorenko V. G. Analiz stepeni razrabotannosti temy stegoanaliza v faylah graficheskikh formatov [Analysis of the Degree of Development of the Steganalysis Topic in Graphic Format Files]. *Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy IV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Moskva, 25 maya 2025 g.* [Intelligent Transport Systems: Proc. of the IV Int. Res. and Pract. Conf., Moscow, May 22, 2025]. Moscow: RUT (MIIT) Publ., 2025, pp. 502–511. (In Russian)
27. Fridrich J., Kodovsky J. Rich Models for Steganalysis of Digital Images. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*. 2012, vol. 7, Iss. 3, pp. 868–882.
28. Fridrich J. *Steganography in Digital Media. Principles, Algorithms, and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 431 p.
29. Grachev Y. L., Sidorenko V. G. Ispol'zovanie kachestvennykh kharakteristik izobrazheniya dlya kompleksnogo stegoanaliza [Using Qualitative Image Characteristics for Complex Steganalysis]. *Nadezhnost' [Reliability.]*. 2025, vol. 25, Iss. 1, pp. 67–74. (In Russian)
30. Grachev Y. L., Sidorenko V. G. Primeneniye stegoanaliza dlya obespecheniya tselostnosti informatsii v intellektual'nykh sistemakh transporta [Application of steganalysis to ensure information integrity in intelligent transport systems]. *Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Moskva, 26 maya 2022 g.* [Intelligent transport systems: proc. Int. scientific-practical. conf., Moscow, May 26, 2022]. Moscow: RUT Publ., 2022, pp. 389–396. (In Russian)
31. Westfeld A., Pfitzmann A. Attacks on Steganographic Systems Breaking the Steganographic Utilities Ez-Stego, Jsteg, Steganos, and S-Tools. *Lecture Notes in Computer Science*, 1999.
32. Fridrich J., Goljan M., Du R. Reliable detection of LSB steganography in color and grayscale images. *Proceedings of MM&Sec '01*. New York: ACM Press, 2001, p. 27.
33. Grachev Y. L., Sidorenko V. G. Stegoanaliz metodov skrytiya informatsii v graficheskikh konteynerakh [Steganalysis of methods for hiding information in graphic containers]. *Nadezhnost' [Reliability.]*. 2021, vol. 21, Iss. 3, pp. 39–46. (In Russian)
34. Fielding R. T. Architectural styles and the design of network-based software architectures. 2001, pp. 76–106.
35. Grachev Y. L. *Programma kompleksnogo stegoanaliticheskogo detektirovaniya "StegoRevealer"* [Complex steganalytical detection program "StegoRevealer"]. Svidetel'stvo RF, no. 2025614424, 2025. (In Russian)
36. Belim S. V., Vilkhovskiy D. E. Stegoanaliz algoritma Koha — Zhao [Steganalysis of the Koch — Zhao algorithm]. *Matematicheskoe i komp'yuternoe modelirovanie: sb. materialov VI Mezhdunar. nauch. konf., Omsk, 23 noyabrya 2018 g.* [Mathematical and computer modeling: collection of materials of the VI Int. scientific conf., Omsk, November 23, 2018]. Omsk: Omskiy gos. un-t Publ., 2018, pp. 185–188. (In Russian)
37. Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*. 2001, vol. 45, Iss. 1, pp. 5–32.
38. LISA Traffic Light Dataset. Available at: <https://www.kaggle.com/datasets/mbornoe/lisa-traffic-light-dataset> (accessed: July 1, 2025).
39. Russian traffic sign images dataset. Available at: <https://www.kaggle.com/datasets/watchman/rtsd-dataset> (accessed: July 1, 2025).

СЕГМЕНТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ТЕХНИЧЕСКИМ ЗРЕНИЕМ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ПОДВИЖНЫМ СОСТАВОМ

ФЕДОРОВ Владимир Анатольевич, аспирант; e-mail: Fedorov.Vladimir@UrFU.Ru
ОГОРОДНИКОВА Ольга Михайловна, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры;
e-mail: Olga.Ogorodnikova@UrFU.Ru

Уральский федеральный университет, кафедра «Электронное машиностроение», Екатеринбург

В статье представлено комплексное исследование конфигураций модели сверточной нейронной сети YOLOv11 применительно к задачам сегментации объектов технического зрением в автоматизированных системах управления железнодорожным подвижным составом. Основное внимание уделено оценке производительности и качества обработки изображений, выполняемой различными конфигурациями модели. Выполнен сравнительный анализ 25 конфигураций YOLOv11, которые различаются архитектурой и разрешением входного изображения в интервале от 640×640 до 1920×1920 пикселей. Для обучения моделей был создан специализированный набор визуальных данных, в котором 20 000 аннотированных изображений железнодорожной инфраструктуры распределены по 40 классам объектов. Все обученные модели были оценены по точности сегментации с использованием метрики mAP (0,5–0,95) и по производительности. Полученные результаты позволяют выбрать конфигурацию модели YOLOv11 с наиболее подходящими параметрами для использования в составе бортовых систем технического зрения для автоматизированных систем управления железнодорожным подвижным составом в зависимости от предъявляемых требований к точности сегментации объектов и мощности доступных вычислительных ресурсов.

Ключевые слова: техническое зрение; автоматизированная система управления; железнодорожный подвижной состав; обнаружение объектов; сегментация объектов; сверточная нейронная сеть; YOLOv11.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-03-239-249

▼ Введение

Современные тенденции в области автоматизации железнодорожного транспорта связаны с развитием интеллектуального аппаратно-программного обеспечения и направлены на достижение высоких уровней автоматизации систем управления подвижным составом [1]. В международной градации, которая поддерживается российским стандартом ГОСТ 72010—2025, высокий третий уровень автоматизации УАЗ предполагает минимальное участие локомотивной бригады и многофункциональность бортового оборудования [2]. При этом система управления должна регулировать интервалы движения составов, контролировать скорость, собирать информацию о приводах, обеспечивать остановку в случае запрещающего сигнала светофора или возникновения препятствий. Наивысший четвертый уровень автоматизации УА4 соответствует полной автоматизации

процессов и предполагает отсутствие локомотивной бригады в поезде [3].

Ожидаемым преимуществом автоматизированных систем управления железнодорожным подвижным составом (АСУ ЖД ПС) высоких уровней является значительный прирост объемов перевозки грузов за счет повышения пропускной способности железнодорожных линий [4] при соблюдении условий безопасности движения за счет исключения человеческого фактора и ошибочных действий машиниста [5].

Построение АСУ ЖД ПС высоких уровней неразрывно связано с использованием систем технического зрения, способных обеспечивать визуальный анализ окружающей обстановки [6]. Задачи визуального анализа включают обнаружение объектов железнодорожной инфраструктуры и выявление потенциально опасных препятствий на пути следования состава. Для обнаружения объекты на изображениях необходимо сегментировать (выделить

и классифицировать) с помощью программного обеспечения. Требования к соответствующему программному обеспечению системы управления регламентируются стандартом ГОСТ 34009—2016 и акцентируют выполнение функций управления единицей тягового подвижного состава в режиме реального времени, в том числе выполнение критически важных сенсорных функций.

Сенсорные функции технического зрения важны при выполнении таких задач автоматического управления, как остановка ЖД ПС в заданной локации маршрута и точное позиционирование относительно пассажирской платформы или предельных столбиков. В разработке находятся также алгоритмы автоматического определения местоположения ЖД ПС в случае отключения спутниковой навигационной системы, например, при прохождении протяженного тоннеля [7].

Цель данной работы — выполнить анализ программного обеспечения с применением модели сверточных нейронных сетей YOLO для системы технического зрения АСУ ЖД ПС и оценить возможность системы в зависимости от конфигурации, обеспечить надежную сегментацию объектов в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

1. Общая характеристика проблем технического зрения АСУ ЖД ПС

Эксплуатация железнодорожного транспорта предполагает круглосуточное движение составов, что формирует специфические проблемы для технического зрения в географических условиях Российской Федерации, в частности, широкий интервал освещенности окружающих объектов и большое разнообразие погодных вариаций.

С учетом высокой изменчивости параметров внешней среды в АСУ ЖД ПС стремятся применять методы обнаружения объектов, основанные на глубоких нейронных сетях и сверточной архитектуре. Так, с использованием сверточных нейронных сетей производилось обнаружение дефектов рельс [8, 9], с помощью модели Faster R-CNN осуществлялась инспекция крепежных элементов железнодорожного полотна [10], модель YOLOv3 (You Only Look

Once) применялась для выявления дефектов контактной сети [11], а с использованием модели YOLOv8 выполнялось обнаружение различных объектов железнодорожной инфраструктуры [12], а также их сегментация [13]. Перечисленные примеры применения нейронных сетей показали повышенную эффективность в сравнении с традиционными способами цифровой обработки изображений [14].

2. Формирование набора данных для обучения сверточных нейронных сетей

Важным условием успешного использования сверточных нейронных сетей является их обучение и формирование наборов данных, содержащих аннотированные изображения объектов. В открытом доступе имеется несколько наборов данных с объектами железнодорожной инфраструктуры: RailSem19, FRSign, RAWPED, Rail-DB, RailSet, GERALD, OSDaR23, RailDataSets. Основная информация о перечисленных наборах данных представлена в табл. 1.

Анализ структуры данных показал, что существующие базы данных не полностью соответствуют отечественным требованиям АСУ ЖД ПС, поскольку визуально отражают зарубежную инфраструктуру. Набор данных RailDataSets, хотя и включает изображения с российских железных дорог, обладает ограниченным разнообразием, поскольку собран из изображений небольшого участка железнодорожного пути.

В данной работе для обучения сверточных нейронных сетей и надежной сегментации объектов железнодорожной инфраструктуры был сформирован собственный набор данных, содержащий 20 000 изображений с разрешением 1920 × 1080 пикселей. Помимо изображений объектов набор данных включает аннотированные данные о местоположении объекта на изображении. Аннотированные данные включают класс объекта, маску сегментации, координаты ограничивающей рамки. В процессе обучения сверточная нейронная сеть обрабатывает входное изображение и сопоставленные с ним аннотированные данные.

Исходные изображения были получены от видеокамеры, установленной на локомотиве, с

Таблица 1. Открытые наборы данных с объектами железнодорожной инфраструктуры

Набор данных	Год выпуска	Количество изображений	Объекты аннотации
RailSem19	2019	8500	Железнодорожная и трамвайная инфраструктура разных стран
FRSign	2020	105 352	Светофоры железной дороги Франции
RAWPED	2020	26 000	Пешеходы на железной дороге разных стран
Rail-DB	2022	7432	Железнодорожные пути на железной дороге Китая
RailSet	2022	7700	Железнодорожные пути на железной дороге Франции
GERALD	2023	5000	Сигналы светофоров на железной дороге Германии
OSDaR23	2023	204 091	Железнодорожная инфраструктура Германии
RailDataSets	2024	8203	Рельсы, сигналы светофоров, препятствия на железной дороге России

разных регионов железной дороги России при различных погодных условиях и в разное время суток. Все изображения были аннотированы для решения задачи сегментации. Всего было размечено 40 классов объектов железнодорожной инфраструктуры (путевые и сигнальные знаки, элементы железнодорожного пути), а также объектов, которые потенциально могут стать динамическими препятствиями (люди, животные, железнодорожный и автомобильный транспорт).

3. Архитектура модели YOLOv11

В данной работе для решения задач обнаружения и сегментации объектов железнодорожной инфраструктуры в бортовых АСУ ЖД ПС использована современная модель сверточной нейронной сети YOLOv11. Анализ архитектуры модели YOLOv11 и ее существующих версий необходим для составления в дальнейшем собственной модификации, ориентированной на специфику обнаружения объектов железнодорожной инфраструктуры бортовой системой управления с ограниченными вычислительными ресурсами.

Архитектура модели YOLOv11 состоит из трех основных частей: скелета, шеи и головы, которые показаны на рис. 1. Скелет (backbone) отвечает за извлечение признаков в трех масштабах из входного изображения (input image). Шея (neck) является промежуточным звеном между скелетом и головой, выполняя агрегацию и улучшение представления извлеченных признаков во всех трех масштабах. Голова (head) выполняет прогнозирование.

Архитектура YOLOv11 использует три специализированные головы (head) для прогнозирования, каждая из которых соответствует своему масштабу признаков: мелкому, среднему и крупному. Каждая голова независимо выполняет предсказание объектов для своего масштаба. Мелкомасштабная голова работает с картами признаков высокого разрешения и лучше детектирует мелкие объекты. Крупномасштабная голова обрабатывает низкоразмерные карты признаков с высокой семантической ценностью и отвечает за обнаружение крупных объектов. Средняя голова обеспечивает компромисс между крайними масштабами. На этапе постобработки предсказания от всех трех голов объединяются и фильтруются для устранения дублирующих детекций, после чего формируется единый финальный набор предсказаний для анализируемого изображения. Финальный отчет содержит выходные данные о множестве обнаруженных объектов, включая информацию о классе и уверенности, о маске объектов и координатах ограничивающих рамок.

Модель YOLOv11 по масштабированию разделяется на пять версий: **nano**, **small**, **medium**, **large** и **extra-large**. Масштабирование осуществляется по трем параметрам: по глубине сети d , по ширине сети w и по максимальному количеству каналов в блоке mc . Параметр глубины d нейронной сети отвечает за количество слоев или повторений модулей; соответственно, чем выше данный параметр, тем глубже сеть, то есть больше задействовано уровней абстракции признаков. Параметр ширины w нейронной сети задает количество каналов в

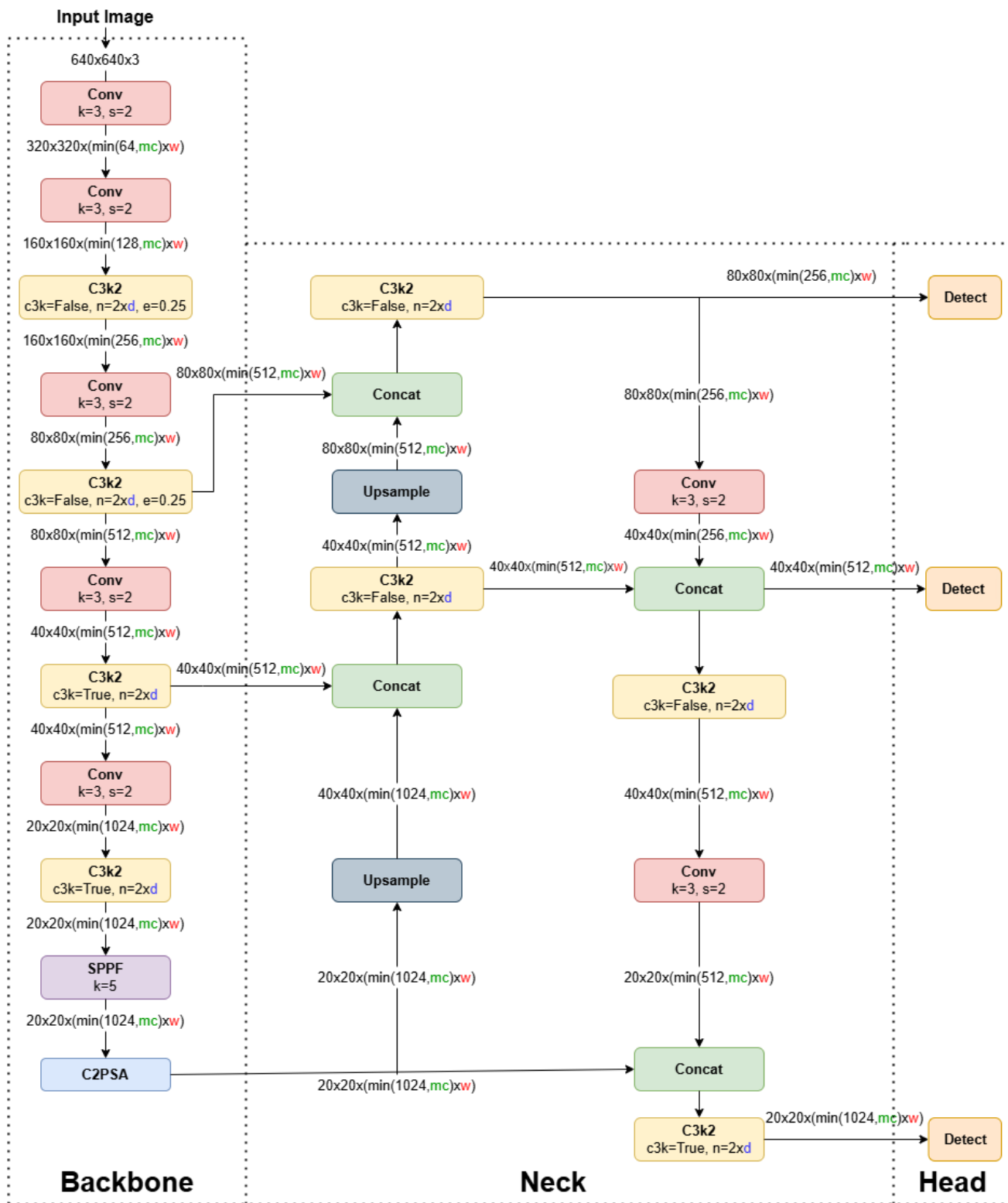


Рис. 1. Архитектура модели YOLOv11

свертках, поэтому чем выше данный параметр, тем больше признаков анализируется на каждом уровне. Параметр максимального количества каналов mc ограничивает число выходных каналов в слоях. В табл. 2 представлены

основные параметры масштабирования для разных версий YOLOv11.

Версии n и s модели YOLOv11 характеризуются параметрами масштабирования, предопределяющими низкую вычислительную

Таблица 2. Параметры масштабирования различных версий модели YOLOv11

Версия модели	<i>d</i> (depth multiple)	<i>w</i> (width multiple)	<i>mc</i> (max channels)
n (nano)	0,50	0,25	1024
s (small)	0,50	0,50	1024
m (medium)	0,50	1,00	512
l (large)	1,00	1,00	512
x (extra-large)	1,00	1,50	512

сложность и малую точность сегментации. Версии *m*, *l* и *x* требуют значительного наращивания вычислительных ресурсов, что ставит под сомнение возможность их развертывания на процессорах бортовой системы управления.

4. Конфигурации YOLOv11 и их обучение

С целью оценки эффективности YOLOv11 в решении задач сегментации объектов по требованиям АСУ ЖД ПС было выполнено обучение 25 конфигураций модели. Сравнению подвергнуты конфигурации, которые отличаются версией модели (**n**, **s**, **m**, **l**, **x**) и разрешением входного слоя (640 × 640, 960 × 960, 1280 × 1280, 1600 × 1600, 1920 × 1920).

Обучение моделей производилось на графическом процессоре NVIDIA RTX A5000 с использованием сформированного в данной работе набора данных. Исходный набор данных перед обучением был разделен на три неравные выборки — тренировочную, валидационную и тестовую — в соотношении 70 %, 20 и 10 % соответственно.

Тренировочная выборка содержит основную часть изображений, которые были использованы непосредственно для обновления весовых коэффициентов сверточной нейронной сети во время обучения с минимизацией функции потерь и настройкой внутренних параметров модели на распознавание характерных признаков объектов.

Валидационная выборка использовалась также на этапе обучения для контроля за обобщающей способностью модели. Следует уточнить, что на валидационной выборке обучение не производилось, данная выборка использовалась исключительно для оценки метрик качества обучения после каждой эпохи.

Тестовая выборка составлена из относительно небольшого количества изображений

и предназначена для окончательной оценки качества модели после завершения обучения. Следует подчеркнуть, что данные из тестовой выборки не были использованы ни в процессе обучения моделей, ни при их валидации, что позволяет получить независимую оценку эффективности различных конфигураций модели YOLOv11 при обработке новых изображений.

Обучение сверточной нейронной сети выполняется итерационно и проходит через следующие шаги:

- прямое распространение входных данных и вычисление предсказаний с использованием текущих параметров модели;
- вычисление суммарной функции потерь, которая учитывает отклонение предсказанных значений от истинных;
- обратное распространение ошибки и вычисление градиентов функции потерь по параметрам модели;
- обновление параметров модели с использованием метода стохастического градиентного спуска.

Все перечисленные шаги циклически повторяются на протяжении заданного числа эпох. Для каждой из конфигураций модели YOLOv11 в процессе обучения устанавливалось максимальное количество эпох, равное 400. С целью снижения вычислительной емкости в алгоритм введен ограничивающий фактор, благодаря которому фактическое количество эпох до завершения обучения оказывалось меньше заданного максимального значения. Эффект экономии расчетного времени связан с использованием механизма ранней остановки, который позволяет предотвратить переобучение модели и сократить объем вычислений при обучении модели. Механизм ранней остановки основывается на мониторинге

Таблица 3. Точность и время сегментации различных конфигураций модели YOLOv11

Версия модели	Разрешение изображений, пиксели	Время сегментации, мс	Метрика качества сегментации mAP (0,5–0,95)
YOLOv11n (nano)	640 × 640	8,2	0,429
	960 × 960	14,5	0,562
	1280 × 1280	24,6	0,644
	1600 × 1600	36,5	0,682
	1920 × 1920	55,2	0,707
YOLOv11s (small)	640 × 640	10,7	0,480
	960 × 960	20,9	0,592
	1280 × 1280	35,3	0,667
	1600 × 1600	52,6	0,712
	1920 × 1920	80,9	0,729
YOLOv11m (medium)	640 × 640	16,3	0,530
	960 × 960	32,1	0,615
	1280 × 1280	54,8	0,692
	1600 × 1600	84,0	0,731
	1920 × 1920	125,0	0,747
YOLOv11l (large)	640 × 640	18,2	0,548
	960 × 960	38,9	0,636
	1280 × 1280	62,1	0,718
	1600 × 1600	94,6	0,756
	1920 × 1920	137,4	0,772
YOLOv11x (extra large)	640 × 640	27,0	0,560
	960 × 960	53,2	0,650
	1280 × 1280	90,9	0,743
	1600 × 1600	144,4	0,778
	1920 × 1920	213,4	0,795

метрики качества сегментации mAP (0,5–0,95) [15], который выполняется на валидационном наборе данных после каждой эпохи. Если в процессе обучения не наблюдается значительное улучшение выбранной метрики, процесс обучения автоматически прерывается. Такой подход позволяет зафиксировать параметры обученной модели в тот момент, когда возникает риск переобучения на тренировочном наборе данных.

После обучения была произведена оценка качества сегментации на тестовой выборке с использованием метрики mAP (0,5–0,95), а также оценка производительности по параметру времени сегментации одного кадра на графическом процессоре NVIDIA RTX A5000. Оценочные параметры приведены в табл. 3.

На рис. 2 представлен график зависимости точности сегментации от разрешения входного слоя различных версий модели YOLOv11. Представленный график демонстрирует рост точности сегментации с увеличением разрешения выходного слоя и с усложнением версии модели. Наибольшую точность сегментации $mAP(0,5-0,95) = 0,795$ продемонстрировала конфигурация модели версии YOLOv11x с разрешением входного слоя 1920 × 1920 пикселей.

На рис. 3 представлен график зависимости времени сегментации одного кадра на графическом процессоре NVIDIA RTX A5000 от разрешения входного слоя разных версий модели YOLOv11. Представленный график демонстрирует повышение вычислительной сложности с увеличением разрешения

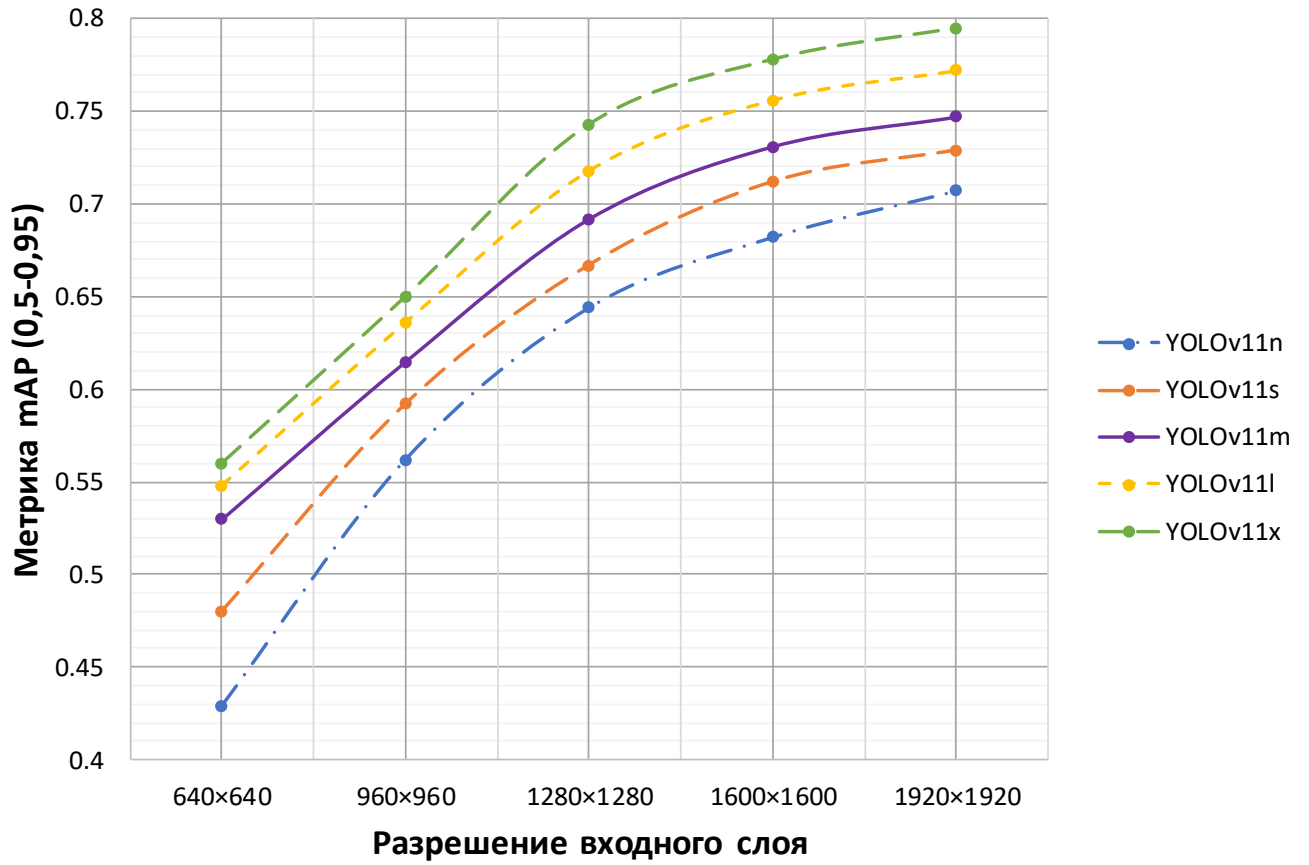


Рис. 2. График зависимости точности сегментации от разрешения

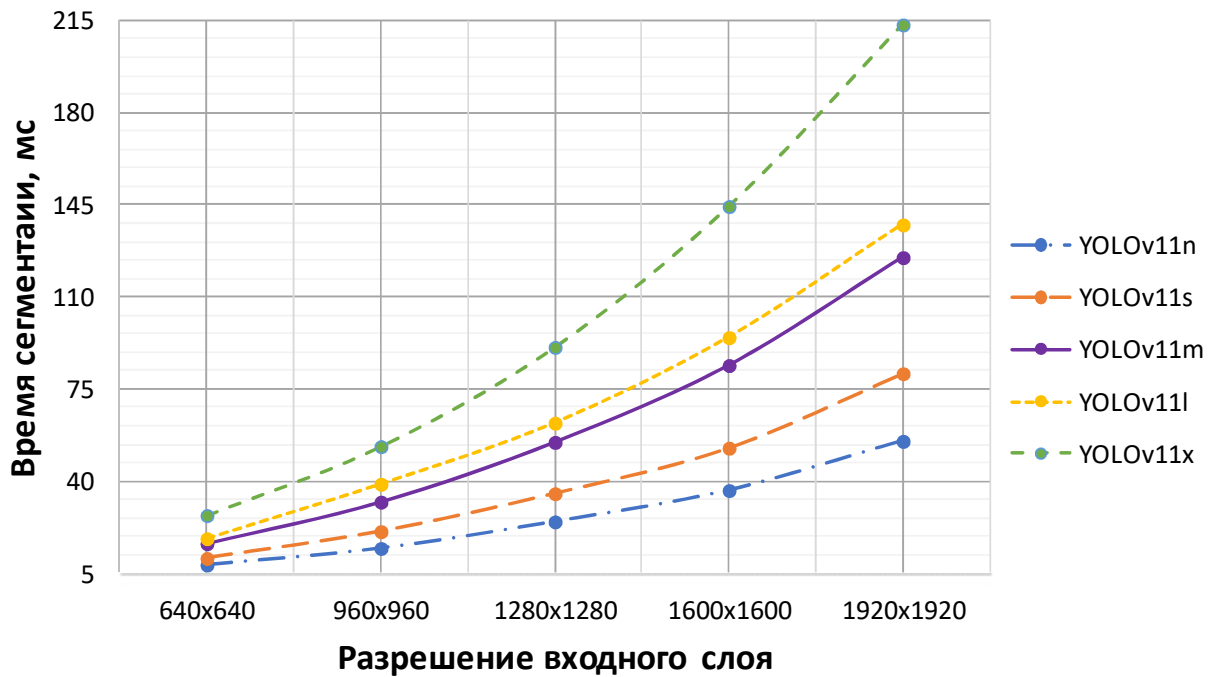


Рис. 3. График зависимости времени сегментации от разрешения

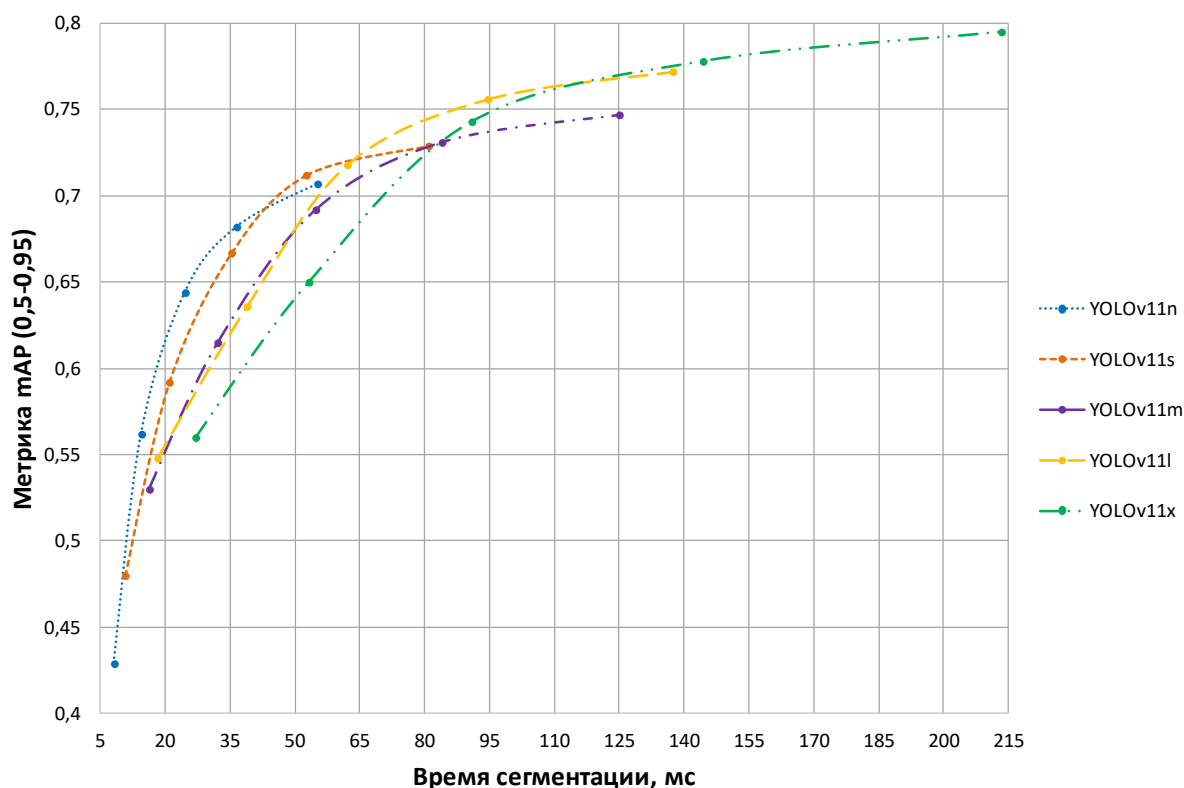


Рис. 4. График соотношения времени и точности сегментации

и усложнением версии модели. Наиболее быстрой и менее требовательной к мощности вычислительных ресурсов является версия YOLOv11n с разрешением входного слоя 640×640 пикселей.

Для комплексной сравнительной оценки эффективности различных конфигураций модели YOLOv11 с точки зрения компромисса между точностью сегментации и скоростью обработки на рис. 4 представлен график соотношения времени сегментации объектов и точности сегментации. Для каждой версии модели определена зависимость на основе экспериментальных данных, полученных при обработке изображений с разрешением входного слоя от 640×640 до 1920×1920 пикселей, что обеспечивает объективность результатов сравнительного анализа в широком диапазоне характеристик доступных вычислительных ресурсов. Каждая кривая на графике построена по пяти точкам, которые соответствуют значениям разрешения входного изображения, указанным в табл. 3. Движение вдоль кривой в направлении роста точности и времени сегментации отражает увеличение разрешения входного изображения.

Полученное поле параметров позволяет выбрать конфигурацию модели YOLOv11 с учетом требований АСУ ЖД ПС по качеству сегментации объектов и доступной мощности вычислительной платформы. Так, для систем реального времени с жесткими ограничениями по задержке может быть выбрана легкая версия (nano, small) с меньшим разрешением, в то время как для задач анализа архивных данных, где приоритетом является максимальная точность, оправдано применение более тяжелой версии (large, extra large) с высоким разрешением.

Для визуальной демонстрации качества сегментации объектов на рис. 5 приведены примеры сегментированных объектов на изображениях из тестовой выборки, которая не участвовала в процессе обучения, с использованием модели YOLOv11m при разрешении входного слоя 1920×1920 пикселей. Приведенные примеры подтверждают эффективность применения модели в различных условиях съемки, включая широкий диапазон освещенности и вариативности погодных явлений.

Анализ результатов обработки изображений подтверждает, что модель YOLOv11 успешно

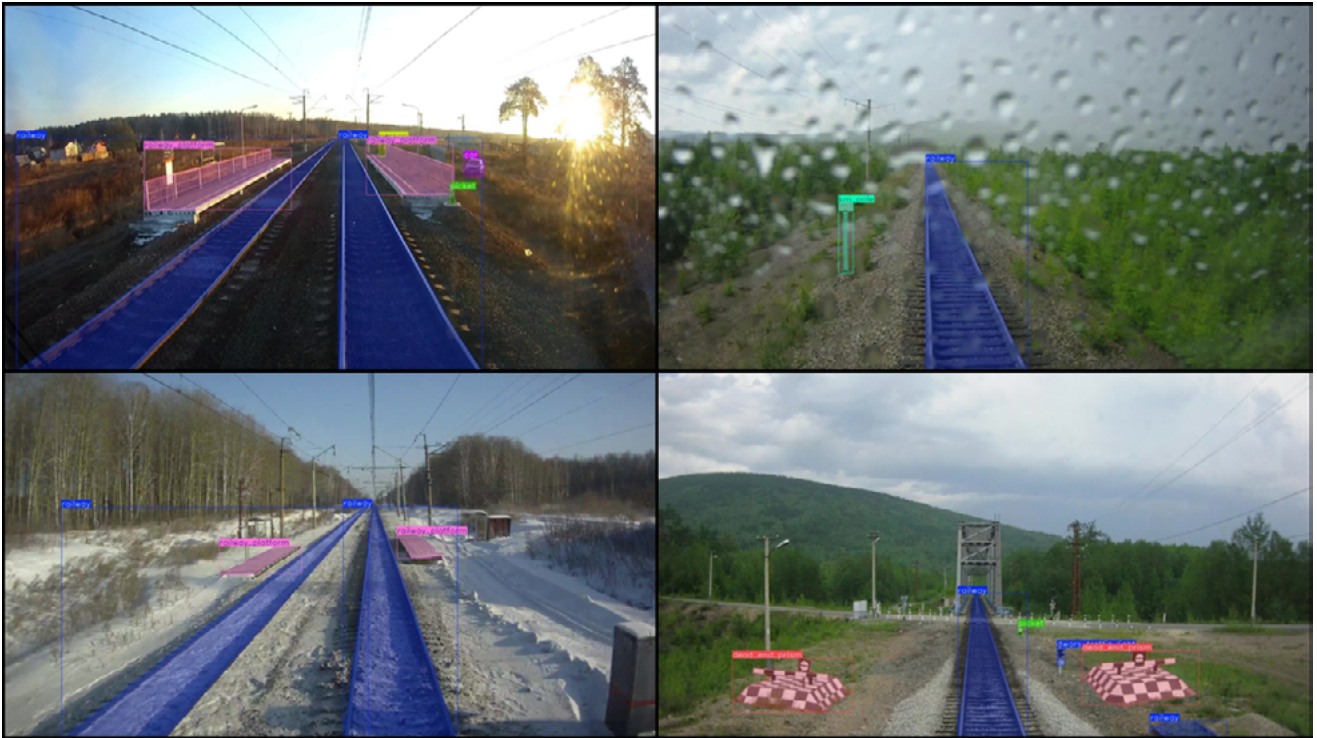


Рис. 5. Сегментация объектов с использованием модели YOLOv11m и изображений с разрешением 1920×1920 пикселей

сегментирует и обнаруживает как крупные объекты (железнодорожная колея, платформы, тупиковые призмы), так и мелкие объекты железнодорожной инфраструктуры (пикетные столбики и карликовые светофоры). Ключевым преимуществом выбранной модели сверточной нейронной сети является ее высокая надежность при работе в условиях повышенной неопределенности. Вычислительные эксперименты подтвердили устойчивую сегментацию объектов при различных погодных явлениях (дождь, снег, туман), а также при значительных изменениях уровня освещенности в течение суток (от яркого солнечного освещения в полдень до сумрака в ночное время суток). Продemonстрированная устойчивость к изменяющимся внешним факторам является существенным достоинством модели YOLOv11 при использовании в реальных условиях эксплуатации грузового железнодорожного транспорта.

Заключение

Новым практическим результатом выполненной работы является созданный и апробированный набор визуальных данных для обучения сверточных нейронных сетей с учетом

особенностей инфраструктуры российских железных дорог и уникального разнообразия климатических условий.

На созданном наборе данных обучено 25 различных конфигураций модели YOLOv11, различающихся по версии архитектуры и по разрешению входного слоя. По результатам оценки качества обученных конфигураций YOLOv11 составлена таблица оценочных параметров, которая представляет зависимость точности сегментации и времени обработки от структурных параметров модели. Упрощение архитектуры модели и снижение разрешения входного изображения приводит к пропорциональному сокращению времени обработки, но одновременно снижает точность сегментации. Так, самая компактная версия YOLOv11n при разрешении 640×640 пикселей продемонстрировала время обработки всего 8,2 мс на видеокарте NVIDIA RTX A5000, но точность mAP (0,5–0,95) при этом составила лишь 0,429.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке программно-аппаратного обеспечения бортовых систем технического зрения для АСУ ЖД ПС. Построенные графики соотношения времени и точности

сегментации объектов с разрешением изображений видеопотока позволяют выбрать масштабную конфигурацию модели в зависимости от конкретных требований к точности сегментации объектов и скорости обработки данных в режиме реального времени. ▲

Список источников

1. Охотников А. Л. Проекты развития систем автоматического управления движением поездов / А. Л. Охотников, И. А. Волкова // Интеллектуальные системы и технологии на транспорте. — 2023. — № 1(25). — С. 25–31.
2. Иванов В. Ф., Градусов А. Н. Алгоритм комплексирования сенсорных данных для задач автоматического управления подвижным составом / В. Ф. Иванов, А. Л. Охотников, А. Н. Градусов // Автоматика на транспорте. — 2024. — Т. 10. — № 4. — С. 360–371. DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-04-360-371.
3. Казанская Л. Ф. Беспилотные поезда при грузовых и пассажирских железнодорожных перевозках / Л. Ф. Казанская, П. В. Алпаева, А. А. Щипицына // Транспортное дело России. — 2023. — № 6. — С. 128–131.
4. Розенберг Е. Н. Комплексные решения по повышению пропускной способности железных дорог / Е. Н. Розенберг, И. Н. Розенберг, А. В. Озеров // Труды АО «НИИАС». — 2021. — Т. 1. — Вып. 11. — С. 32–47.
5. Алексеев А. С. Модель оценки показателей безопасности функционирования автоматизированных систем диспетчерского управления движением поездов / А. С. Алексеев, А. В. Горелик, В. Ю. Горелик, А. В. Истомин и др. // Автоматизация в промышленности. — 2025. — № 1. — С. 10–13.
6. Федоров В. А. Сверточные нейронные сети как инструмент обнаружения объектов железнодорожной инфраструктуры / В. А. Федоров, О. М. Огородникова // Автоматизация в промышленности. — 2024. — № 12. — С. 20–23. — DOI: 10.25728/avtprom.2024.12.04.
7. Fedorov V. A. AI-based train localization using railway infrastructure object detection / V. A. Fedorov // Transportation Development Research. — 2024. — Vol. 2. — Iss. 2. — Pp. 1–11. — DOI: 10.55121/tdr.v2i2.379.
8. Faghih-Roohi S. Deep convolutional neural networks for detection of rail surface defects / S. Faghih-Roohi, S. Hajizadeh, A. Nunez // 2016 International joint conference on neural networks (IJCNN). IEEE, July 2016. — Pp. 2584–2589. — DOI: 10.1109/IJCNN.2016.7727522.
9. Zhao Y. A review on rail defect detection systems based on wireless sensors / Y. Zhao, Z. Liu, D. Yi // Sensors. — 2022. — Vol. 22. — Iss. 17. — P. 6409. — DOI: 10.3390/s22176409.
10. Wei X. Railway track fastener defect detection based on image processing and deep learning techniques: A comparative study / X. Wei, Z. Yang, Y. Liu // Engineering Applications of Artificial Intelligence. — 2019. — Vol. 80. — Pp. 66–81. — DOI: 10.1016/j.engappai.2019.01.008.
11. Wu Y. Automatic detection of arbitrarily oriented fastener defect in high-speed railway / Y. Wu, Y. Qin, Y. Qian // Automation in Construction. — 2021. — Vol. 131. — DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103913.
12. Сычугов А. Н. Применение нейронных сетей для распознавания объектов на железнодорожном транспорте / А. Н. Сычугов, В. Н. Михайчиков, М. В. Чернышов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 478–491. — DOI: 10.20295/1815-588X2023-2-478-491.
13. Fedorov V. A. Railway infrastructure instance segmentation based on convolutional neural networks / V. A. Fedorov // 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), IEEE, September 2023. — Pp. 443–447. — DOI: 10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272908.
14. Ogorodnikova O. M., Method of ripe tomato detecting for a harvesting robot / O. M. Ogorodnikova, W. Ali // AIP Conference Proceedings, May 2019. — DOI: 10.1063/1.5134297.
15. Everingham M. The Pascal visual object classes (VOC) challenge / M. Everingham, L. Van Gool, C. K. Williams // International journal of computer vision. — 2010. — Vol. 88. — Pp. 303–338. — DOI: 10.1007/s11263-009-0275-4.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 3, pp. 239–249
DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-03-239-249

Object Segmentation Using Machine Vision in Automated Control Systems of Railway Rolling Stock

Information about authors

Fedorov V. A., Postgraduate Student. E-mail: Fedorov.Vladimir@UrFU.Ru
Ogorodnikova O. M., D. Sci. in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department. E-mail: Olga.Ogorodnikova@UrFU.Ru

Ural Federal University, Department of Electronic Engineering, Yekaterinburg

Abstract: The paper presents the results of a study into the application of YOLOv11 convolutional neural network model configurations to object segmentation tasks. It is hypothesized that YOLOv11 will be utilized in the domain of machine vision within the context of an automated railway rolling stock control system. The primary focus of this study was to assess the performance and quality of image processing implemented by various model configurations. A comparative analysis of 25 YOLOv11 configurations was

conducted, varying in architecture and input image resolution within the range of 640×640 and 1920×1920 pixels. The creation of a specialized visual dataset was instrumental in facilitating the training of the models. This dataset comprised 20,000 annotated images of railway infrastructure, systematically distributed across 40 object classes. The performance and segmentation accuracy of all trained models was evaluated using the mAP metric (0.5–0.95). The results obtained are informative when choosing the configuration of the YOLOv11 model with the most suitable parameters for use in on-board machine vision systems of automated control systems, depending on the requirements for the accuracy of object segmentation and the power of available computing resources.

Keywords: machine vision; automated control system; railway rolling stock; object detection; object segmentation; convolutional neural network; YOLOv11.

References

1. Okhotnikov A. L., Volkova I. A. Proekty razvitiya sistem avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem poezdov [Projects of development of automatic train control systems]. *Intellektual'nye sistemy i tekhnologii na transporte* [Intellectual systems and technologies in transport]. 2023, Iss. 1(25), pp. 25–31. (In Russian)

2. Ivanov V. F., Okhotnikov A. L., Gradusov A. N. Algoritm kompleksirovaniya sensorykh dannyykh dlya zadach avtomaticheskogo upravleniya podvizhnym sostavom [Algorithm for complexing sensor data for automatic rolling stock control tasks]. *Avtomatika na transporte* [Transport Automation Research]. 2024, vol. 10, Iss. 4, pp. 360–371. DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-04-360-371 (In Russian)
3. Kazanskaya L. F., Alpaeva P. V., Shchipitsyna A. A. Bepilotnye poezda pri gruzovykh i passazhirskikh zheleznodorozhnykh perevozkakh [Driverless trains in cargo and passenger railway transportation]. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia]. 2023, Iss. 6, pp. 128–131. (In Russian)
4. Rozenberg E. N., Rozenberg I. N., Ozerov A. V. Kompleksnye resheniya po povysheniyu propusknoy sposobnosti zheleznykh dorog [Complex solutions to increase railway capacity]. *Trudy AO "NIIAS"* [Proceedings of JSC "NIIAS"]. 2021, vol. 1, Iss. 11, pp. 32–47. (In Russian)
5. Alekseev A. S., Gorelik A. V., Gorelik V. Yu., Istomin A. V. et al. Model' otsenki pokazateley bezopasnosti funkcionirovaniya avtomatizirovannykh sistem dispetcherskogo upravleniya dvizheniem poezdov [Model for assessing the safety indicators of automated train dispatching control systems]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in industry]. 2025, Iss. 1, pp. 10–13. (In Russian)
6. Fedorov V. A., Ogorodnikova O. M. Svertochnye neyronnye seti kak instrument obnaruzheniya ob'ektov zheleznodorozhnoy infrastruktury [Convolutional neural networks as a tool for detecting railway infrastructure objects]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in industry]. 2024, Iss. 12, pp. 20–23. DOI: 10.25728/avtprom.2024.12.04 (In Russian)
7. Fedorov V. A. AI-based train localization using railway infrastructure object detection. *Transportation Development Research*. 2024, vol. 2, Iss. 2, pp. 1–11. DOI: 10.55121/tdr.v2i2.379.
8. Faghih-Roohi S., Hajizadeh S., Nunez A. Deep convolutional neural networks for detection of rail surface defects. 2016 International joint conference on neural networks (IJCNN). IEEE, July 2016, pp. 2584–2589. DOI: 10.1109/IJCNN.2016.7727522.
9. Zhao Y., Liu Z., Yi D. A review on rail defect detection systems based on wireless sensors. *Sensors*. 2022, vol. 22, Iss. 17, p. 6409. DOI: 10.3390/s22176409.
10. Wei X., Yang Z., Liu Y. Railway track fastener defect detection based on image processing and deep learning techniques: A comparative study. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2019, vol. 80, pp. 66–81. DOI: 10.1016/j.engappai.2019.01.008.
11. Wu Y., Qin Y., Qian Y. Automatic detection of arbitrarily oriented fastener defect in high-speed railway. *Automation in Construction*. 2021, vol. 131. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103913.
12. Sychugov A. N., Mikheychikov V. N., Chernyshov M. V. Primenenie neyronnykh setey dlya raspoznavaniya ob'ektov na zheleznodorozhnom transporte [Application of neural networks for object recognition in railway transport]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2023, vol. 20, Iss. 2, pp. 478–491. DOI: 10.20295/1815-588X2023-2-478-491 (In Russian)
13. Fedorov V. A. Railway infrastructure instance segmentation based on convolutional neural networks. 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), IEEE, September 2023, pp. 443–447. DOI: 10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272908
14. Ogorodnikova O. M., Ali W. Method of ripe tomato detecting for a harvesting robot. *AIP Conference Proceedings*, May 2019. DOI: 10.1063/1.5134297.
15. Everingham M., Van Gool L., Williams C. K. The Pascal visual object classes (VOC) challenge. *International journal of computer vision*. 2010, vol. 88, pp. 303–338. DOI: 10.1007/s11263-009-0275-4.

МОДЕЛЬ-ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

НАБОКОВ Артем Сергеевич, аспирант; e-mail: t3man8@yandex.ru

БУЛАВСКИЙ Петр Евгеньевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры; e-mail: bulavskiy@pgups.ru

МАРКОВ Дмитрий Спиридонович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: MDS1945@yandex.ru

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

В статье сформирована модель-описание этапа проектирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики как основа последующего построения имитационной модели для анализа, прогнозирования результатов и повышения эффективности реализации проектов. В рамках разработки модель-описания определена цель моделирования, сформулированы предъявляемые функциональные требования, а также границы и принятые допущения. Выполнен системный анализ этапа проектирования, декомпозиция этапа на основные процессы и проектные работы, выявлены его цели и ключевые показатели эффективности проектной деятельности, а также основные проблемы, связанные с длительностью выполнения проектов и качеством технической документации. На основе метода причинно-следственного анализа построена диаграмма факторов, влияющих на время проектирования. В рамках использования в модели разработан классификатор ошибок в технической документации с присвоением весовых коэффициентов, характеризующих степень их критичности и влияния на качество проекта. Определен набор входных параметров, определяющий объем проекта, который отражает масштаб и содержание конкретного проекта. На основе полученных данных разработана структурная схема имитационной модели, включающая шесть функциональных модулей, для каждого из которых описаны задачи, логика функционирования и структура обрабатываемых данных. Предложенная модель-описание служит теоретическим и методологическим фундаментом для последующего построения, моделирующего алгоритма и программной реализации имитационной модели, этапа проектирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики.

Ключевые слова: процессы проектирования; имитационная модель; качество технической документации; показатели эффективности проектной деятельности; железнодорожная автоматика и телемеханика.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-03-250-263

▼ Введение

Современный этап развития железных дорог характеризуется активной цифровизацией железнодорожной отрасли, охватывающей различные ее области, включая железнодорожную автоматику и телемеханику (ЖАТ). Внедрение цифровых инструментов различного назначения является одним из приоритетных направлений научно-технического развития.

С учетом высокой сложности, большой длительности и многоэтапности жизненного цикла систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖЦ СЖАТ) особую актуальность приобретает применение методологии имитационного моделирования (ИМ).

Этот подход используется на различных этапах ЖЦ СЖАТ для решения широкого круга задач. Использование ИМ обеспечивает инструментальную основу для изучения динамики сложных процессов, прогнозирования их развития и оценки эффективности различных вариантов функционирования системы.

Одним из важнейших этапов ЖЦ СЖАТ является проектирование, критически влияющее на дальнейшую надежность и безопасность функционирования СЖАТ в условиях эксплуатации.

Ключевыми свойствами этапа проектирования являются:

- большое количество взаимосвязанных между собой проектных работ;

- сложная координация множества различных участников процесса;
- большое количество стохастических факторов, влияющих на сроки выполнения и качество проектов;
- ограниченные сроки выполнения проектов, установленные договорными обязательствами;
- высокий уровень критичности ошибок при разработке технической документации ТД;
- значительный объем и высокая интенсивность ввода в эксплуатацию новых объектов ЖАТ;
- большое разнообразие проектируемых систем и устройств ЖАТ, сопровождающееся высокой трудоемкостью и сложностью выполнения проектов.

Вышеописанные свойства являются обоснованием применения методологии ИМ для исследования этапа проектирования СЖАТ.

В соответствии с технологией ИМ СЖАТ [1] основными этапами синтеза ИМ являются: модель-описание (МО), формализованная схема объекта моделирования, моделирующий алгоритм, выбор инструментального средства и синтез моделирующей программы.

Целью данного исследования является формирование МО этапа проектирования СЖАТ, определяющей содержательную часть разрабатываемой ИМ и отвечающей требованиям полноты и корректности базовой информации, которая обеспечивает естественный переход к формализованной схеме и далее к моделирующей программе.

Для достижения данной цели в рамках исследования необходимо решить следующие задачи:

- сформулировать цель и определить задачи моделирования;
- определить требования, предъявляемые к имитационной модели;
- обосновать и определить целевые критерии эффективности процесса проектирования;
- установить границы применимости и допущения, положенные в основу моделируемого процесса;
- разработать структурную схему имитационной модели, отражающие ее функциональные блоки и их взаимодействие;
- описать логику функционирования модулей модели, включая состав данных, а также алгоритмы их взаимодействия.

Вопросам применения ИМ в области систем железнодорожной автоматики и телемеханики посвящено большое количество научной литературы. В исследовании [1] обосновано применение метода ИМ и математической схемы массового обслуживания для этапов ЖЦ СЖАТ, кроме того, описаны свойства информации, получаемые в результате моделирования.

ИМ активно применяется для решения различных задач в железнодорожной отрасли, включая:

- имитаторы для доказательства корректности и безопасности функционирования устройств и систем ЖАТ [2, 3];
 - тренажеры различного назначения;
 - автоматизированные обучающие комплексы;
 - модели оценки эффективности технических и технологических решений.
- Для решения данных задач в различных предметных областях разработан целый ряд ИМ, например:
- модель функционирования рельсовых цепей [4, 5];
 - модель процессов электронного документооборота ТД [6–8];
 - модель оценки времени поиска неисправностей [9];
 - модель анализа и оптимизации обслуживания пассажиропотоков в метрополитене [10];
 - модель работы инфраструктуры железнодорожного транспорта в условиях чрезвычайных ситуаций с учетом применения инвентарных комплектов [11];
 - модель работы предприятия промышленного железнодорожного транспорта [12].

Представленные исследования подтверждают высокую адаптивность и универсальность ИМ как эффективного инструмента анализа сложных технических и организационно-технологических комплексов в области СЖАТ.

1. Определение цели моделирования, допущений и целевых критериев эффективности ИМ этапа проектирования СЖАТ

Целью моделирования является определение и анализ показателей эффективности этапа проектирования СЖАТ на основе заданных параметров проекта и воздействия

стохастических факторов с последующим формированием рекомендаций по оптимизации процесса проектирования.

С целью реализации имитационной модели были приняты следующие допущения:

- в модели рассматриваются только основные проектные работы, регламентированные нормативно-технической документацией по составу проектной и рабочей документации, и не рассматриваются специфические, нестандартизированные виды работ;
- время выполнения проектных работ задается как детерминированная величина на основе нормативов трудозатрат и экспертных оценок с корректировкой путем применения поправочных коэффициентов, отражающих влияние стохастических факторов, воздействующих на процесс проектирования;
- взаимодействие проектного института с внешними участниками выполняется без детализации их внутренних процессов.

Для построения адекватной ИМ этапа проектирования СЖАТ требуется предварительный анализ и структурная декомпозиция основных процессов проектирования СЖАТ.

Главной целью этапа проектирования является разработка ТД, соответствующей требованиям нормативно-технической документации на конкретный объект с наилучшим качеством, обеспечивающим безопасную эксплуатацию СЖАТ на последующих стадиях жизненного цикла и в установленные договорные сроки. Исходя из этого, любые отклонения от требований по качеству и срокам проектирования следует рассматривать как проблемы этапа проектирования СЖАТ.

Анализ практики реализации проектов позволяет выделить следующие проблемы:

- низкий уровень качества выпускаемой ТД;
- большой срок реализации проектов ЖАТ.

Исходя из этого, логичным в данном исследовании будет рассмотрение двух целевых критериев, определяющих эффективность проектной деятельности:

- $T_{пр}$ — время проектирования, критерий, определяющий временные трудозатраты на выполнение полного цикла разработки проектной или рабочей документации;

- $K_{тд}$ — качество ТД, критерий, который отражает точность, полноту и соответствие ТД требованиям нормативной документации. Данный критерий критически влияет на дальнейшую безопасную и надежную работу устройств железнодорожной автоматики и телемеханики на дальнейших этапах ЖЦ СЖАТ, кроме того, оказывает обратное влияние на время проектирования, так как ошибки в ТД требуют дополнительных итераций проектирования и согласования.

Представленные целевые критерии являются показателями эффективности проектной деятельности, поскольку характеризуют достижение проектных целей по срокам и качеству.

2. Причинно-следственный анализ факторов и параметризация входных данных модели

Для системного представления и анализа причин, влияющих на возникновение вышеописанных проблем, целесообразно применение метода причинно-следственного анализа в виде диаграммы, иллюстрирующей факторы, влияющие на время проектирования [13] и качество технической документации, представленной на рис. 1.

Особое внимание в диаграмме уделяется взаимосвязи этих факторов: низкое качество ТД, характеризующееся ошибками в ТД, приводит к возвратам на доработку, следовательно, к увеличению сроков проектирования.

Для обеспечения адаптивности модели к условиям конкретного проекта необходимо формирование входных параметров, задаваемых пользователем и отражающих его специфику.

Параметры формализуются следующим образом:

$$V_{пр} = \{S, Q_{ст}, T_{ст}, N_{стр}, Q_{пер}, T_{пер}, L_{пер}\},$$

где S — стадия проектирования;

$Q_{ст}$ — количество проектируемых станций;

$T_{ст}$ — тип проектируемой станционной системы;

$N_{стр}$ — количество проектируемых стрелочных переводов;



Рис. 1. Диаграмма факторов влияния на время проектирования

$Q_{пер}$ — количество проектируемых перегонов;

$T_{пер}$ — тип проектируемой перегонной системы;

$L_{пер}$ — длина проектируемого перегона.

Данные параметры позволяют обеспечить адаптацию модели под различные проектные сценарии.

3. Определение границ и функциональных требований ИМ

Границы ИМ определяются фокусом целей исследования на этапе проектирования СЖАТ, включающем два основных процесса:

- 1) разработка ТД на стадии проектной документации;
- 2) разработка ТД на стадии рабочей документации.

Указанные процессы формируют основу структуры проектной деятельности, охватывая полный цикл внутренних проектных работ по разработке ТД. На рис. 2 представлена обобщенная структура этапа проектирования. В данной схеме систематизированы и сгруппированы основные виды проектных работ, характерных для каждой стадии.

Состав проектных работ определяется индивидуально в зависимости от объема проекта, поэтому некоторые виды работ могут не

выполняться при отсутствии необходимости в их применении в рамках конкретного проекта.

Установленные цели этапа проектирования, выделенные ключевые процессы, а также параметры и целевые переменные, влияющие на эффективность проектной деятельности, создают основу для построения имитационной модели этапа проектирования СЖАТ.

Проведенный системный анализ позволяет сформировать функциональные требования к имитационной модели:

- реализация возможности задания проектов с различными параметрами;
- прогнозирование времени выполнения проекта;
- генерация ошибок в ТД и имитация их влияния на процесс проектирования;
- оценка эффективности процесса проектирования;
- формирование рекомендаций по оптимизации времени проектирования путем изменения конфигурации проектной группы, структуры процессов;
- получение аналитической информации о распределении и загруженности ресурсов;
- получение аналитической информации о времени выполнения проектных работ, задержках;
- оценка влияния качества технической документации на время проектирования;



Рис. 2. Структура этапа проектирования СЖАТ

- представление графической информации о процессе проектирования;
- реализация возможности изменения архитектуры модели и наполнения функций модулей.

4. Структурно-функциональная организация ИМ

Для дальнейшего формирования МО выполняется разработка структурной схемы модели, в которой отражены функциональные блоки имитационной модели. Структурная

схема, отражающая логику функционирования модели, представлена на рис. 3.

Представленная схема включает 6 основных модулей:

1. Модуль параметризации проектов

Модуль ввода параметров предназначен для формирования исходных данных ИМ, необходимых для проведения различных имитационных сценариев. Основное назначение — задание характеристик моделируемых проектов.

В качестве исходных данных для модуля параметризации выступают следующие параметры:

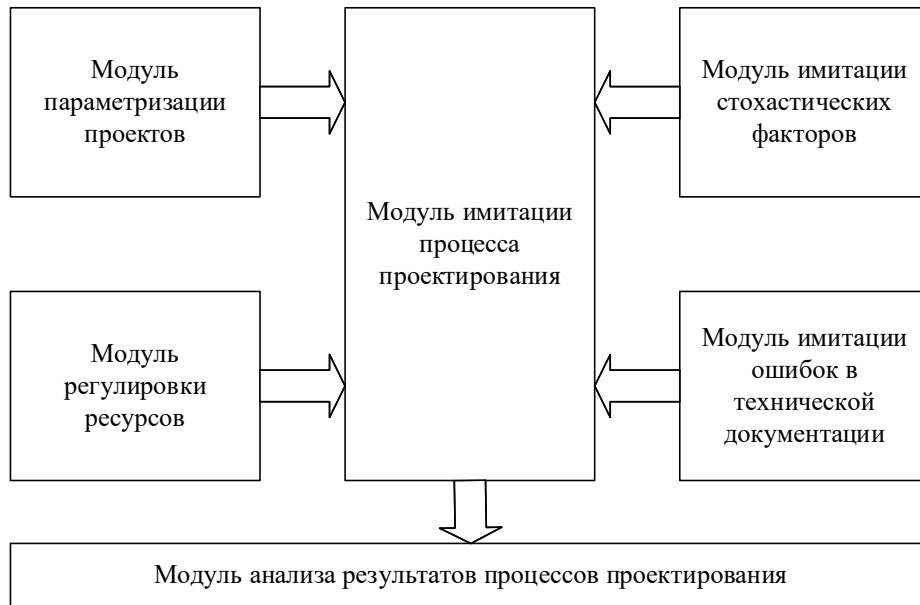


Рис. 3. Структурная схема модели процессов проектирования СЖАТ

- количество моделируемых проектов P ;
- стадия проектирования S ;
- количество проектируемых станций $Q_{ст}$;
- проектируемая станционная система $T_{ст}$;
- количество стрелочных переводов $N_{стр}$;
- количество проектируемых перегонов $Q_{пер}$;
- проектируемая перегонная система $T_{пер}$;
- длина проектируемого перегона $L_{пер}$.

Принцип функционирования модуля:

Шаг 1. Ввод и инициализация параметров

Пользователь осуществляет ввод параметров, которые проходят проверку на корректность и формируют входные данные для модели.

Шаг 2. Маршрутизация проекта в модели

На основе введенных параметров проекта выполняется выбор и запуск соответствующего алгоритма проектирования, формирующего маршрут проекта в рамках ИМ.

Логика маршрутизации включает в себя:

- 1) анализ стадии проектирования, определяющий состав и последовательность выполняемых проектных работ;
- 2) выбор типа проектируемого объекта — станция или перегон;
- 3) выбор типа проектируемой системы.

Шаг 3. Определение маршрута проекта

В зависимости от заданных параметров формируется индивидуальная маршрутная карта процесса проектирования, которая

используется для запуска имитационного эксперимента.

2. Модуль имитации процесса проектирования

Модуль имитации процесса проектирования предназначен для воспроизведения последовательности выполнения проекта с учетом заданных характеристик и логики его выполнения.

Для определения последовательности проектных работ предлагается применение методологии представления бизнес-процессов с использованием нотации *BPMN*¹ [14–16], которая позволит визуализировать основные процессы разработки ТД при задании различных конфигураций проектов, а также определить ключевые события, применяемые документы и участники.

Массив данных для реализации модуля имитации процесса проектирования представлен в табл. 1.

Принцип функционирования модуля:

Шаг 1. Получение входных данных

Модуль получает входные данные из модуля параметризации проектов и формирует полный состав проектных работ для каждого объекта проектирования.

Шаг 2. Формирование списка выполняемых этапов проекта

¹ BPMN (Business Process Model and Notation) — нотация моделирования бизнес-процессов.

Таблица 1. Массив данных модуля имитации процесса проектирования

Параметр	Обозначение	Принимаемые значения, источник получения информации
Идентификатор этапа	$ID_{\text{этапа}}$	
Нормативное время выполнения этапа	$t_{\text{н.этапа}}$	Нормативы трудозатрат на выполнение проектных работ
Идентификатор этапа-последователя	$ID_{\text{след.этапа}}$	
Необходимость выполнения этапа	$I_{\text{этапа}}$	0 — не выполняется
		1 — выполняется
Тип выполняемого этапа	$T_{\text{д}}$	Разработка текстовых документов
		Разработка эксплуатационных чертежей
		Разработка принципиальных схем
		Разработка монтажных схем
		Разработка схем аппаратов управления
		Разработка программного обеспечения
		Работы, не связанные с разработкой чертежей

Таблица 2. Массив данных модуля имитации ошибок в ТД

Параметр	Обозначение	Принимаемые значения, источник получения информации
Общее количество ошибок	N_o	Натуральное число, вводится пользователем
Вероятность возникновения ошибки в текстовом документе	$P_{\text{о.тек.д}}$	от 0 до 1, вводится пользователем
Вероятность возникновения ошибки в эксплуатационных чертежах	$P_{\text{о.экс}}$	от 0 до 1, вводится пользователем
Вероятность возникновения ошибки в принципиальных схемах	$P_{\text{о.пс}}$	от 0 до 1, вводится пользователем
Вероятность возникновения ошибки в монтажных схемах	$P_{\text{о.мс}}$	от 0 до 1, вводится пользователем
Вероятность возникновения ошибки в схемах аппарата управления	$P_{\text{о.сау}}$	от 0 до 1, вводится пользователем
Вероятность ошибки в программном обеспечении	$P_{\text{о.по}}$	от 0 до 1, вводится пользователем

Исходя из технического задания на проектирование включаются или исключаются выполняемые проектные работы. Для каждого объекта проектирования определяются:

- текущий этап;
- временные нормативные значения трудозатрат текущего этапа;
- следующий этап;
- признак выполнения этапа $I_{\text{этапа}} = 1$ или 0 ;
- тип выполняемого этапа.

Шаг 3. Инициализация имитационного эксперимента

Модуль запускает выполнение проектных этапов в соответствии с логической последовательностью и с учетом времени их выполнения.

3. Модуль имитации ошибок в ТД

Модуль имитации ошибок предназначен для генерации и моделирования воздействия

ошибок на процесс проектирования. Его цель — учет вероятностной природы возникновения ошибок, их влияние на качество ТД и время проектирования.

Массив данных модуля имитации ошибок в ТД представлен в табл. 2.

В рамках построения модуля имитации ошибок в ТД был разработан упрощенный классификатор, основанный на параллельном подходе к кодированию характеристик ошибок. Данный подход обеспечивает однозначность описания каждой ошибки, необходимой для решения целей моделирования и расчетной процедуры оценки качества ТД.

Классификация возможных ошибок в ТД представлена на рис. 4.

В процессе разработки была учтена существующая классификация ошибок ТД, пред-

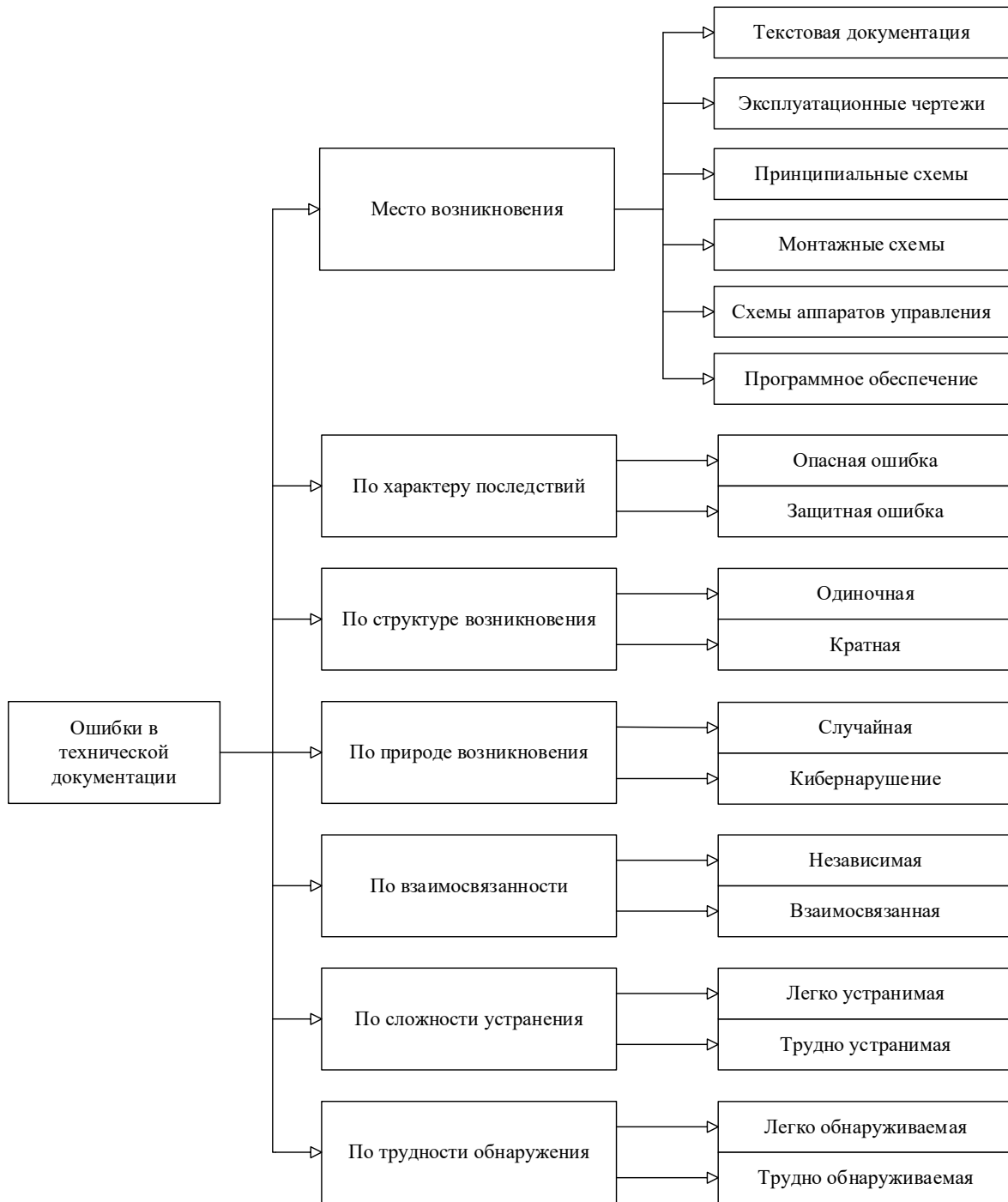


Рис. 4. Классификация ошибок в ТД

ставленная в работе [17], где рассматривается детализованный подход к систематизации ошибок.

Предложенный в данном модуле подход основан на ряде принципов, заимствованных из указанного источника, однако он был адаптирован под задачи автоматической генерации ошибок в модели и анализа их влияния на продолжительность проектирования.

Код ошибки формируется на основе семи характеристик, каждая из которых кодируется в виде однозначного цифрового значения. Признаки располагаются строго по установленному порядку, отражая свойства ошибок.

Структура кода ошибки строится на следующих принципах, представленных в табл. 3.

Каждая ошибка e_i в ТД описывается семью признаками по:

Таблица 3. Структура и весовая оценка характеристик ошибки

Характеристика	Кодовая позиция	Значение	Вес ошибки
Место возникновения	A	1 — текстовая документация	-
		2 — эксплуатационные чертежи	
		3 — принципиальные схемы	
		4 — монтажные схемы	
		5 — схемы аппаратов управления	
		6 — программное обеспечение	
По характеру последствий	B	1 — опасная ошибка	1,0
		2 — защитная ошибка	0,3
По структуре возникновения	C	1 — одиночная ошибка	0,5
		2 — кратная ошибка	1,0
По природе возникновения	D	1 — случайная	0,4
		2 — кибернарушение	1,0
По взаимосвязанности	F	1 — независимая	0,5
		2 — взаимосвязанная	1,0
По сложности устранения	E	1 — легко устранимая	0,4
		2 — трудно устранимая	1,0
По трудности обнаружения	G	1 — легко обнаруживаемая	0,3
		2 — трудно обнаруживаемая	1,0

$$e_i = \{A, B, C, D, F, E, G\},$$

где *A* — тип документа, в котором зафиксирована ошибка;

B — характер последствий;

C — структура возникновения;

D — природа возникновения;

F — взаимосвязанность;

E — сложность устранения;

G — трудность обнаружения.

Для каждой ошибки *e_i* рассчитывается ее вес *k_i*, определяющий влияние на качество технического документа:

$$k_i = \omega_B(B) + \omega_C(C) + \omega_D(D) + \omega_F(F) + \omega_E(E) + \omega_G(G),$$

где $\omega_B(B)$ — вес признака *B* при значении *B* (далее по аналогии).

После генерации ошибок и присвоения каждой определенного кода производится количественная оценка качества технической документации *K_{тд}*, отражающая влияние на продолжительность проектирования. Расчет выполняется для каждого типа документации, определяемого значением

признака *A*, а также для проекта в целом как среднее значение по всем типам.

Пусть в ТД типа *A = j* содержится *N_j* ошибок. Качество технической документации данного типа обозначается как *K_{тд}^j*, где

$$j \in \{\text{тек.д, экс, пс, мс, сау, по}\},$$

где тек.д — текстовая документация;

экс — эксплуатационные чертежи;

пс — принципиальные схемы;

мс — монтажные схемы;

сау — схемы аппаратов управления;

по — программное обеспечение,

и рассчитывается по формуле:

$$K_{тд}^j = 1 - \frac{\sum_{e \in j} k_i}{N_j k_{\max}},$$

где *N_j* — количество ошибок в ТД данного типа;

k_i — вес ошибки *i*, рассчитанный по признакам *B–G*;

k_{max} = 6,0 — максимально возможный вес одной ошибки.

Таблица 4. Массив данных модуля имитации влияния стохастических факторов

Параметр	Обозначение	Принимаемые значения, источник получения информации
Коэффициент влияния полноты исходных данных	$k_{\text{пи}}$	$1,0 \leq k_{\text{пи}} \leq 1,25$
Коэффициент влияния качества исходных данных	$k_{\text{ки}}$	$1,0 \leq k_{\text{пи}} \leq 1,15$
Коэффициент влияния изменений в смежных разделах	$k_{\text{изм}}$	$1,0 \leq k_{\text{изм}} \leq 1,15$
Коэффициент влияния участия сторонних организаций	$k_{\text{со}}$	$1,0 \leq k_{\text{со}} \leq 1,15$
Коэффициент влияния болезней и нетрудоспособности сотрудников	$k_{\text{б}}$	$1,0 \leq k_{\text{б}} \leq 1,08$
Коэффициент влияния структуры и эффективности управления проектом	$k_{\text{стр}}$	$1,0 \leq k_{\text{стр}} \leq 1,21$
Коэффициент влияния изменений в нормативной документации	$k_{\text{инд}}$	$1,0 \leq k_{\text{инд}} \leq 1,15$
Коэффициент влияния отработки замечаний с заводом-изготовителем и заказчиком	$k_{\text{от}}$	$1,0 \leq k_{\text{от}} \leq 1,06$
Коэффициент влияния недоступности требуемого оборудования или материалов	$k_{\text{ном}}$	$1,0 \leq k_{\text{ном}} \leq 1,13$
Коэффициент влияния изменения требований заказчика	$k_{\text{итз}}$	$1,0 \leq k_{\text{итз}} \leq 1,16$

Итоговая оценка качества проекта определяется как среднее арифметическое значение качества по всем типам технической документации. Общая оценка качества технической документации определяется как:

$$K_{\text{тд}} = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^A K_{\text{тд}}^j.$$

Принцип функционирования модуля:

Шаг 1. Задание параметров модуля

Пользователь задает количество ошибок, которые возникнут в технической документации, а также вероятность их возникновения в различных типах документации.

Шаг 2. Генерация ошибок в технической документации

Модуль случайным образом генерирует ошибки, которым присваивается тип документа и другие признаки, формируя код ошибки, после чего для нее рассчитывается вес по признакам $B-G$. Затем производится группировка ошибок по типу документации (признак A), и для каждой рассчитывается количественное значение качества технической документации данного типа.

Шаг 3. Учет влияния качества ТД на процесс проектирования

На основе рассчитанных значений качества ТД, которые передаются в модуль имитации процесса проектирования для учета возвратов на доработку ТД и, как следствие, увеличения

времени проектирования. Таким образом, результаты модуля имитации ошибок в ТД оказывают непосредственное влияние на моделируемый процесс проектирования, отражая зависимость качества ТД от времени проектирования.

4. Модуль имитации влияния стохастических факторов

Модуль имитации влияния стохастических факторов предназначен для учета неопределенностей и внешних воздействий, оказывающих влияние на целевые переменные процесса проектирования. Главной целью модуля является моделирование влияния процессных, организационных и внешних факторов на продолжительность выполнения проектных работ.

Воздействие факторов осуществляется через систему коэффициентов, отражающих степень воздействия параметра. Перечень факторов был сформирован в рамках работы [13].

Массив данных модуля имитации влияния стохастических факторов представлен в табл. 4.

Принцип функционирования модуля:

Шаг 1. Инициализация параметров

Пользователь имеет возможность задания вручную коэффициентов стохастических факторов, если известны конкретные условия проекта, либо генерации параметров случайным образом на основе вероятностных распределений.

Шаг 2. Импорт в модуль имитации процесса проектирования

Таблица 5. Массив данных модуля регулирования ресурсов

Параметр	Обозначение	Принимаемые значения, источник получения информации
Количество инженеров-проектировщиков	$N_{инж}$	Натуральное число
Уровень квалификации инженера-проектировщика	$k_{инж}$	Высокий уровень квалификации ($k_{инж} = 0,8$)
		Средний уровень квалификации ($k_{инж} = 1,0$)
		Низкий уровень квалификации ($k_{инж} = 1,2$)
Специализация по типу документации	T_d	Разработка текстовых документов
		Разработка эксплуатационных чертежей
		Разработка принципиальных схем
		Разработка монтажных схем
		Разработка схем аппаратов управления
		Разработка программного обеспечения
		Работы, не связанные с разработкой чертежей

Сформированные коэффициенты передаются в модуль имитации процесса проектирования, где масштабируют время выполнения проектных работ, отражая влияние неблагоприятных условий и отклонений.

5. Модуль регулирования ресурсов

Модуль регулирования ресурсов предназначен для имитации участия инженеров-проектировщиков в процесс проектирования с учетом их квалификации, специализации и вероятности заболевания и недоступности.

Массив данных модуля регулирования ресурсов представлен в табл. 5.

Принцип функционирования модуля:

Шаг 1. Формирование состава проектной группы и заполнение ее параметров

Пользователь формирует состав проектной группы, указывая общее количество инженеров-проектировщиков, задавая для каждого:

- уровень квалификации;
- специализацию по типу документации.

Шаг 2. Распределение инженеров-проектировщиков по проектным работам

В зависимости от заданных характеристик осуществляется распределение инженеров по проектным работам.

Распределение осуществляется по следующим принципам:

- наименьшая загруженность;
- соответствие специализации конкретному типу документации;
- наибольшая квалификация;
- доступность.

Представленная логика обеспечивает рациональное использование кадровых ресурсов, что способствует снижению времени проектирования.

Шаг 3. Влияние на процесс проектирования

После формирования распределения инженеров-проектировщиков по проектным работам производится учет влияния их квалификации на продолжительность выполнения конкретной работы.

6. Модуль анализа результатов процесса проектирования

Модуль анализа результатов проектирования предназначен для формирования сводной аналитической информации по итогам имитационного моделирования. Основной функцией модуля является обработка данных от других модулей, расчет и анализ статистической информации.

Принцип функционирования модуля:

Шаг 1. Сбор данных с модулей

Получение промежуточных значений от модулей.

Шаг 2. Расчет основных показателей этапа проектирования:

Полученные данные позволяют рассчитать следующие показатели:

- общее время проектирования, согласно целевой функции [13];
- время выполнения отдельных проектных работ с учетом поправочных коэффициентов;
- значение качества ТД проекта;

- качество ТД по отдельным типам документации;
- общее количество сгенерированных ошибок;
- распределение ошибок по типам документации;
- количество возвратов ТД на доработку;
- суммарная и индивидуальная загруженность инженеров-проектировщиков;
- задержки при выполнении проекта.

Шаг 3. Формирование отчета

Осуществляется сбор всех рассчитанных показателей в структурированный аналитический отчет, подготовка данных для построения графиков.

Заключение

Проведенное исследование, направленное на формирование МО этапа проектирования СЖАТ, позволило рассмотреть процесс проектирования как систему, чувствительную к влиянию множества взаимосвязанных стохастических факторов.

В ходе исследования была выполнена систематизация основных процессов проектирования, выполнена структурная декомпозиция, что позволило зафиксировать наиболее значимые компоненты и зависимости, подлежащие последующему моделированию. Особое внимание было уделено факторам, которые в реальной практике чаще всего оказываются неформализованными, но значительно влияют на результат проектной деятельности. Так, влияние ошибок в ТД на возвраты на доработку требуют моделирования причинно-следственных связей, не поддающихся аналитическому учету в рамках традиционных подходов. Именно поэтому ИМ выступает как необходимый инструмент, позволяющий учитывать вариативность, неоднородность и вероятностный характер таких воздействий.

Сформированная МО адаптирована под различные условия проектирования. Однако в процессе разработки были осознанно приняты упрощения, ограничивающие уровень детализации. Это обусловлено необходимостью построения модели минимально необходимой сложности, достаточной для решения исследуемых задач, но не перегруженной излишними переменными.

Практическим результатом исследования стала разработка модульной структуры модели, в основе которой лежит разделение функций между шестью логически обособленными, но влияющими на работу друг на друга модулями. Данная структура обеспечивает гибкость ее архитектуры, возможность пошагового наращивания ее функциональности, адаптацию под конкретные условия и сценарии имитационного эксперимента.

Таким образом, поставленные цель и задачи исследования были достигнуты. Исследование позволило зафиксировать и формализовать сложные связи, оказывающие влияние на эффективность проектной деятельности, и создать основу, которая обеспечит переход от описательной постановки задачи к разработке моделирующего алгоритма и программной реализацией ИМ. ▲

Список источников

1. Константинова Т. Ю. Технология имитационного моделирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики / Т. Ю. Константинова, А. А. Лыков, Д. С. Марков и др. // Автоматика на транспорте. — 2023. — Т. 9. — № 2. — С. 193–204.
2. Горелик А. В. Применение имитационного моделирования при проектировании и оценке надежности систем железнодорожной автоматики / А. В. Горелик, А. С. Веселова, А. А. Маслов // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». — 2016. — Т. 2. — С. 246–248.
3. Марков Д. С. Инструментальное средство оценки вероятностных показателей надежности и безопасности систем железнодорожной автоматики / Д. С. Марков, О. А. Наседкин // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2020. — Т. 17. — № 1. — С. 23–34.
4. Марков Д. С. Формализованная схема процесса имитационного моделирования рельсовой линии / Д. С. Марков, М. Б. Соколов, В. Б. Соколов // Автоматика на транспорте. — 2020. — Т. 6. — № 2. — С. 204–221.
5. Марков Д. С. Метод процессного моделирования рельсовых линий как функциональных блоков рельсовых цепей / Д. С. Марков, В. Б. Соколов, М. Б. Соколов // Вестник транспорта Поволжья. — 2020. — № 1(79). — С. 59–70.
6. Булавский П. Е. Методика оценки временных характеристик процессов электронного документооборота технической документации / П. Е. Булавский, Д. С. Марков // Автоматика на транспорте. — 2016. — Т. 2. — № 1. — С. 81–94.
7. Булавский П. Е. Формализация процессов электронного документооборота технической документации с помощью сетей Петри / П. Е. Булавский, О. К. Ваисов // Автоматика на транспорте. — 2018. — Т. 4. — № 4. — С. 687–705.

8. Булавский П. Е. Концептуальная модель электронного документооборота технической документации / П. Е. Булавский // Транспорт Российской Федерации. — 2011. — № 1(32). — С. 60–63.
9. Булавский П. Е. Моделирование и оценка времени поиска неисправностей в системах интервального регулирования движения поездов на базе иерархических цветных сетей Петри / П. Е. Булавский, О. К. Ваисов // Автоматика на транспорте. — 2020. — Т. 6. — № 3. — С. 356–376.
10. Василенко М. Н. Имитационная модель обслуживания пассажиропотоков в метрополитене / М. Н. Василенко, Д. С. Марков, В. Б. Соколов и др. // Конструирование, сертификация и техническая эксплуатация устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики: сб. науч. тр. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2003. — С. 17–25.
11. Яшин М. Г. Моделирование работы инфраструктуры железнодорожного транспорта в условиях чрезвычайных ситуаций с учетом применения инвентарных комплектов / М. Г. Яшин, Р. А. Пантелеев, И. В. Кушпиль, Н. Н. Фомин // Автоматика на транспорте. — 2022. — Т. 8. — № 4. — С. 354–366.
12. Сорочкина И. С. Методы системного анализа и имитационного моделирования в работе предприятий промышленного железнодорожного транспорта / И. С. Сорочкина, О. Н. Числов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2014. — № 2. — С. 115–120.
13. Набоков А. С. Анализ и моделирование процессов проектирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики / А. С. Набоков, П. Е. Булавский, Д. С. Марков // Автоматика на транспорте. — 2025. — Т. 11. — № 2. — С. 164–177.
14. Chinosi M. BPMN: An introduction to the standard / M. Chinosi, A. Trombetta // Computer Standards & Interfaces. — 2012. — Vol. 34. — Iss. 1. — Pp. 124–134.
15. Alves F. BPMN and Petri Nets: A Case Study of Process Optimization in a Project Engineering Company / F. Alves, R. D. Merlim, L. M. Carvalho, F. H. B. de Souza // 7th International Conference on Applied Research in Management, Economics and Accounting. — Dublin, 2023.
16. Business Process Re-Engineering using BPMN: A Case Study // International Journal of Business Management and Visuals. — 2024. — Vol. 7. — Iss. 1. — Pp. 49–55.
17. Тележенко Т. А. Разработка классификатора ошибок технической документации на устройства СЦБ / Т. А. Тележенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2009. — № 2(34). — С. 50–55.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 3, pp. 250–263
DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-03-250-263

A Comprehensive Model for Railway Automation and Remote Control Systems Design Processes

Information about authors

Nabokov A. S., Postgraduate Student. E-mail: t3man8@yandex.ru
Bulavsky P. E., Doctor in Engineering, Professor. E-mail: bulavskiy@pgups.ru
Markov D. S., PhD in Engineering, Associate Professor. E-mail: MDS1945@yandex.ru

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

Abstract: The article presents a model describing the design stage of a railway automation and remote control system for the subsequent construction of a simulation model for analysis, forecasting results, and improving the efficiency of project implementation. Within the context of the model description, the purpose of modelling is defined, the functional requirements are formulated, and the boundaries and assumptions are described. A system analysis of the design stage was performed, and the design stage was broken down into key processes and design steps. The objectives and key performance indicators for design activities were identified, as well as the main issues related to the project duration and the quality of technical documentation presented. A diagram was constructed to illustrate the factors affecting the design time, using the cause-and-effect analysis method as a basis. The development of a classifier of errors in technical documentation within the model frame involved the assignment of weighting coefficients to characterize their degree of criticality and impact on the project quality. A set of input parameters was defined to reflect the scope of the project, determining the volume and content of a specific project. Following a thorough analysis of the data, a structural diagram of the simulation model has been developed. The system is composed of six functional modules, each with a detailed description of their respective tasks, logic of operation, and structure of the processed data. The proposed model can provide a theoretical and methodological

foundation for the construction phase of a modulating algorithm and the subsequent software implementation of a simulation model. In addition, it can support the design stage of railway automation and remote control systems.

Keywords: design processes; simulation model; technical documentation quality; performance indicators of design activities; railway automation and remote control systems.

References

1. Konstantinova T. Yu., Lykov A. A., Markov D. S. et al. Tekhnologiya imitatsionnogo modelirovaniya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Simulation modeling technology of railway automation and remote control systems]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2023, vol. 9, Iss. 2, pp. 193–204. (In Russian)
2. Gorelik A. V., Veselova A. S., Maslov A. A. Primenenie imitatsionnogo modelirovaniya pri proektirovani i otsenke nadezhnosti sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki [Application of simulation modeling in the design and reliability assessment of railway automation systems]. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo"* [Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"]. 2016, vol. 2, pp. 246–248. (In Russian)
3. Markov D. S., Nasedkin O. A. Instrumental'noe sredstvo otsenki veroyatnostnykh pokazateley nadezhnosti i bezopasnosti sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki [Instrumental tool for assessing probabilistic indicators of reliability and safety of railway automation systems]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2020, vol. 17, Iss. 1, pp. 23–34. (In Russian)
4. Markov D. S., Sokolov M. B., Sokolov V. B. Formalizovannaya skhema protsessna imitatsionnogo modelirovaniya rel'sovoy linii [Formalized scheme of rail line simulation modeling process]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2020, vol. 6, Iss. 2, pp. 204–221. (In Russian)
5. Markov D. S., Sokolov V. B., Sokolov M. B. Metod protsessnogo modelirovaniya rel'sovykh liniy kak funktsional'nykh blokov rel'sovykh tseyey [Method of process modeling of rail lines as functional blocks of track circuits]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Volga Transport Herald]. 2020, Iss. 1(79), pp. 59–70. (In Russian)

6. Bulavskiy P. E., Markov D. S. Metodika otsenki vremennykh kharakteristik protsessov elektronnoy dokumentooboroty tekhnicheskoy dokumentatsii [Methodology for assessing time characteristics of electronic document management processes of technical documentation]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2016, vol. 2, Iss. 1, pp. 81–94. (In Russian)
7. Bulavskiy P. E., Vaisov O. K. Formalizatsiya protsessov elektronnoy dokumentooboroty tekhnicheskoy dokumentatsii s pomoshch'yu setey Petri [Formalization of electronic document management processes of technical documentation using Petri nets]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2018, vol. 4, Iss. 4, pp. 687–705. (In Russian)
8. Bulavskiy P. E. Kontseptual'naya model' elektronnoy dokumentooboroty tekhnicheskoy dokumentatsii [Conceptual model of electronic document management of technical documentation]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2011, Iss. 1(32), pp. 60–63. (In Russian)
9. Bulavskiy P. E., Vaisov O. K. Modelirovaniye i otsenka vremeni poiska neispravnostey v sistemakh interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov na baze ierarkhicheskikh tsvetnykh setey Petri [Modeling and assessment of fault detection time in train interval control systems based on hierarchical colored Petri nets]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2020, vol. 6, Iss. 3, pp. 356–376. (In Russian)
10. Vasilenko M. N., Markov D. S., Sokolov V. B. et al. Imitatsionnaya model' obsluzhivaniya passazhiropotokov v metropolitene [Simulation model of passenger flow service in the metro]. *Konstruirovaniye, sertifikatsiya i tekhnicheskaya ekspluatatsiya ustroystv i sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki* [Design, certification and technical operation of railway automation and remote control devices and systems]. Saint Petersburg: PGUPS Publ., 2003, pp. 17–25. (In Russian)
11. Yashin M. G., Pantelev R. A., Kushpil' I. V., Fomin N. N. Modelirovaniye raboty infrastruktury zheleznodorozhnoy transporta v usloviyakh chrezvychaynykh situatsiy s uchetom primeneniya inventarnykh komplektov [Modeling of railway transport infrastructure operation in emergency situations taking into account the use of inventory sets]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2022, vol. 8, Iss. 4, pp. 354–366. (In Russian)
12. Sorochkina I. S., Chislov O. N. Metod sistemnogo analiza i imitatsionnogo modelirovaniya v rabote predpriyatiy promyshlennogo zheleznodorozhnoy transporta [Methods of system analysis and simulation modeling in the work of industrial railway transport enterprises]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Rostov State Transport University]. 2014, Iss. 2, pp. 115–120. (In Russian)
13. Nabokov A. S., Bulavskiy P. E., Markov D. S. Analiz i modelirovaniye protsessov proektirovaniya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Analysis and modeling of design processes of railway automation and remote control systems]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2025, vol. 11, Iss. 2, pp. 164–177. (In Russian)
14. Chinosi M., Trombetta A. BPMN: An introduction to the standard. *Computer Standards & Interfaces*. 2012, vol. 34, Iss. 1, pp. 124–134.
15. Alves F., Merlim R. D., Carvalho L. M., de Souza F. H. B. BPMN and Petri Nets: A Case Study of Process Optimization in a Project Engineering Company. 7th International Conference on Applied Research in Management, Economics and Accounting. Dublin, 2023.
16. Business Process Re-Engineering using BPMN: A Case Study. *International Journal of Business Management and Visuals*. 2024, vol. 7, Iss. 1, pp. 49–55.
17. Telezhenko T. A. Razrabotka klassifikatora oshibok tekhnicheskoy dokumentatsii na ustroystva STSB [Development of an error classifier for technical documentation on STSB devices]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of Rostov State Transport University]. 2009, Iss. 2(34), pp. 50–55. (In Russian)

СИНТЕЗ САМОПРОВЕРЯЕМЫХ ДИСКРЕТНЫХ УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВОЙСТВ КОДОВ ПАРИТЕТА И САМОДВОЙСТВЕННЫХ БУЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ

ЕФАНОВ Дмитрий Викторович, д-р техн. наук, профессор, действительный член Международной Академии транспорта, член Института инженеров электротехники и электроники, профессор^{1, 2, 3, 4}, ведущий научный сотрудник⁵; e-mail: TrES-4b@yandex.ru

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа управления киберфизическими системами, Институт компьютерных наук и кибербезопасности, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа транспорта, Институт машиностроения, материалов и транспорта, Санкт-Петербург

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

⁴ Ташкентский государственный транспортный университет, кафедра «Автоматика и телемеханика», Ташкент

⁵ Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской Академии наук, лаборатория проблем организации транспортных систем (лаборатория № 5), Санкт-Петербург

В статье показано, что известная структура организации схем встроенного контроля по признаку самодвойственности с предварительным сжатием сигналов от объекта диагностирования с использованием функции паритета (модифицированная структура контроля по паритету) позволяет строить полностью самопроверяемые дискретные устройства не для любых исходных объектов. Доказано, что при контроле вычислений по признаку самодвойственности с предварительным сжатием сигналов от объекта диагностирования по паритету неисправности элементов сложения по модулю 2 в кодере кода паритета не обнаруживаются в том случае, если не меняется четность подвектора информационного вектора, генерируемого на выходах, связанных путями с отказавшим элементом. Это обстоятельство накладывает ограничения на использование известной модифицированной структуры контроля по паритету при синтезе самопроверяемых дискретных устройств. В статье предложена еще одна модификация структуры контроля по паритету, позволяющая нивелировать отмеченный недостаток известной структуры за счет контроля вычислений и по паритету, и по принадлежности функции, описывающей контрольный выход, классу самодвойственных булевых функций. При незначительном усложнении схемы встроенного контроля по сравнению со схемой контроля по паритету удастся существенно повысить характеристики контролепригодности. Дальнейшие исследования новой модифицированной структуры организации схем встроенного контроля по паритету позволят определить критерии ее применимости при синтезе самопроверяемых дискретных устройств.

Ключевые слова: обнаружение неисправностей в дискретных устройствах; самопроверяемое дискретное устройство; контроль самодвойственности булевых функций; контроль вычислений по паритету; самопроверяемая схема встроенного контроля; тестируемость компонентов схем контроля.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-03-264-279

▼ Введение

Обнаружение неисправностей и ошибок в дискретных системах управления — ключевое свойство для бесперебойной работы. На вопрос синтеза надежных дискретных устройств внимание обращают с момента возникновения самой теории. Например, упоминание об этом можно найти в классической монографии В. М. Глушкова (первое издание 1962 года) [1]. В современной науке известно большое количество методов, направленных на создание устройств со своевременным

обнаружением неисправностей. Данного свойства добиваются различными методами контролепригодного проектирования, тестового и рабочего (функционального) диагностирования на этапе разработки и конструирования дискретных устройств, являющихся составляющими систем ответственного назначения [2–5].

Так или иначе ценой возможности обнаружения неисправностей и ошибок в вычислениях является внесение избыточности в аппаратные и/или программные средства по отношению

к минимально необходимым для выполнения требуемых алгоритмов [6, 7]. При наделении дискретных устройств свойствами обнаружения неисправностей часто исходят из их автоматных моделей и вносят избыточность путем помехозащищенного или помехоустойчивого кодирования входов, выходов и внутренних состояний конечного автомата с последующим контролем вычислений с помощью тестеров [8]. Другим подходом к организации контроля неисправностей является снабжение комбинационных составляющих автоматов схемами встроенного контроля (СВК) [9] и отдельное тестирование элементов памяти в специальные промежутки времени, когда дискретное устройство не используется по назначению [10]. Таким образом, избыточность либо вносится в само дискретное устройство, либо приводит к использованию внешних средств технического диагностирования.

При синтезе СВК для дискретных устройств повсеместно применяются методы теории информации и кодирования. Так, дискретное устройство отождествляется с некоторым каналом передачи данных, а сигналы на параллельных рабочих или контрольных выходах дискретных устройств представляются в виде булевых векторов и кодовых слов заранее выбранных кодов [11–13]. Далее СВК строится исходя из возможности фиксации ошибок в кодовых словах выбранным двоичным равномерным блоковым кодом. Широкое распространение при синтезе СВК получили равномерные блоковые коды с малой избыточностью, так как число проверочных символов в значительной степени влияет на показатели структурной избыточности конечного самопроверяемого устройства [14, 15]. Помимо диагностического признака принадлежности формируемых кодовых слов выбранным равномерным блоковым кодам часто используется контроль принадлежности вычисляемых на выходах устройств булевых функций особым классам булевых функций, например линейным, монотонным, самодвойственным и «близким» к ним [16–19].

Настоящая статья знакомит читателя с методом синтеза СВК, позволяющим одновременно использовать два диагностических признака для контроля вычислений — принадлежности

формируемых кодовых слов хорошо известному коду паритета [1] и принадлежности функции, описывающей контрольный выход в СВК, к классу самодвойственных булевых функций [20]. В статье показано, зачем необходима такая модернизация известных структур организации СВК и что это дает на практике.

1. Структура организации контроля вычислений по признаку самодвойственности со сжатием сигналов на основе свертки по модулю 2

В [21, 22] предложена структура организации контроля вычислений по признаку самодвойственности вычисляемой в СВК булевой функции. Она изображена на рис. 1 и является модификацией известной во всем мире СВК по паритету [23, 24].

СВК строится для устройства $F(X)$, реализующего систему булевых функций $f_1(X), f_2(X), \dots, f_{m-1}(X), f_m(X)$ на 2^t наборах значений аргументов $\langle X \rangle = \langle x_t x_{t-1} \dots x_2 x_1 \rangle$. Для контроля вычислений в СВК используется предварительное сжатие сигналов от блока $F(X)$ в один контролируемый сигнал $g(X)$. Сжатие осуществляется с использованием кодера кода паритета — устройства $G(F)$, реализующего функцию:

$$g(X) = f_1(X) \oplus f_2(X) \oplus \dots \oplus f_{m-1}(X) \oplus f_m(X). \quad (1)$$

Затем функция (1) в блоке коррекции сигналов (БКС) трансформируется в любую самодвойственную функцию $g^\delta(X)$ по правилу:

$$g^\delta(X) = \delta(X) \oplus g(X), \quad (2)$$

где $\delta(X)$ — функция коррекции сигнала, вычисляемая блоком $\Delta(X)$.

Для контроля вычислений используется элементарный тестер самодвойственного сигнала — устройство SDC (self-dual checker) [25]. При поступлении на входы самодвойственного сигнала данное устройство фиксирует на выходах $z^0(X)$ и $z^1(X)$ парафазный сигнал $\langle 01 \rangle$ либо $\langle 10 \rangle$. Непарафазность выходного сигнала свидетельствует либо о внутренних неисправностях SDC , либо о нарушении самодвойственности сигналов на его входах. Последнее событие

возникает при наличии неисправностей или ошибок в вычислениях на выходах остальных компонентов СВК либо объекта диагностирования. Так фиксируются неисправности в описанной структуре.

Для ее работы необходима временная избыточность и импульсный характер подачи наборов значений аргументов [26]. Такой режим реализуется за счет использования генератора G прямоугольных импульсов a со скважностью 2. За счет использования каскада двухходовых элементов сложения по модулю 2 (XOR), выходы которого подключаются к входам объекта диагностирования и СВК, сигналы логической 0 и логической 1 преобразуются в последовательности импульсов 0101...01 и 1010...10. На первые входы каждого XOR подаются двоичные переменные $x_1, x_2, \dots, x_{t-1}, x_t$, а на вторые — сигнал a . Таким образом, на входы устройства $F(X)$ и СВК подаются последовательности импульсов: $x_i^a = x_i \oplus a, i = \overline{1, m}$. Также сигнал от генератора G требуется для работы SDC . Более подробно останавливаться на описании особенностей работы структуры, изображенной на рис. 1, не

будем, ссылаясь, например, на статью [27] и монографию [28], где этому уделено достаточное внимание.

Неисправности в описанной структуре обнаруживаются на парах наборов значений аргументов, отличающихся во всех разрядах, — на парах инверсных комбинаций $(\langle x_t x_{t-1} \dots x_2 x_1 \rangle, \langle \overline{x_t} \overline{x_{t-1}} \dots \overline{x_2} \overline{x_1} \rangle) = (\langle X \rangle, \langle \overline{X} \rangle)$. Первая комбинация в каждой такой паре является рабочей, а вторая — контрольной. Благодаря устройству СВК именно таким образом, как это описано выше, функция $g^\delta(X)$ на первой такой комбинации принимает значение 0 или 1, а на второй — 1 или 0 соответственно. Это событие и фиксируется тестером самодвойственности. Далее для упрощения инверсные комбинации будем обозначать парой десятичных чисел, соответствующих двоичным числам, записываемым в наборах значений аргументов: $(i, 2^t - 1 - i), i \in \{0, 1, \dots, 2^{t-1} - 1\}$.

Лемма 1. Ошибка, вызванная неисправностью, будет обнаружена, если она приведет к искажению одного из двух значений функции $g^\delta(X)$ при подаче пары инверсных комбинаций.

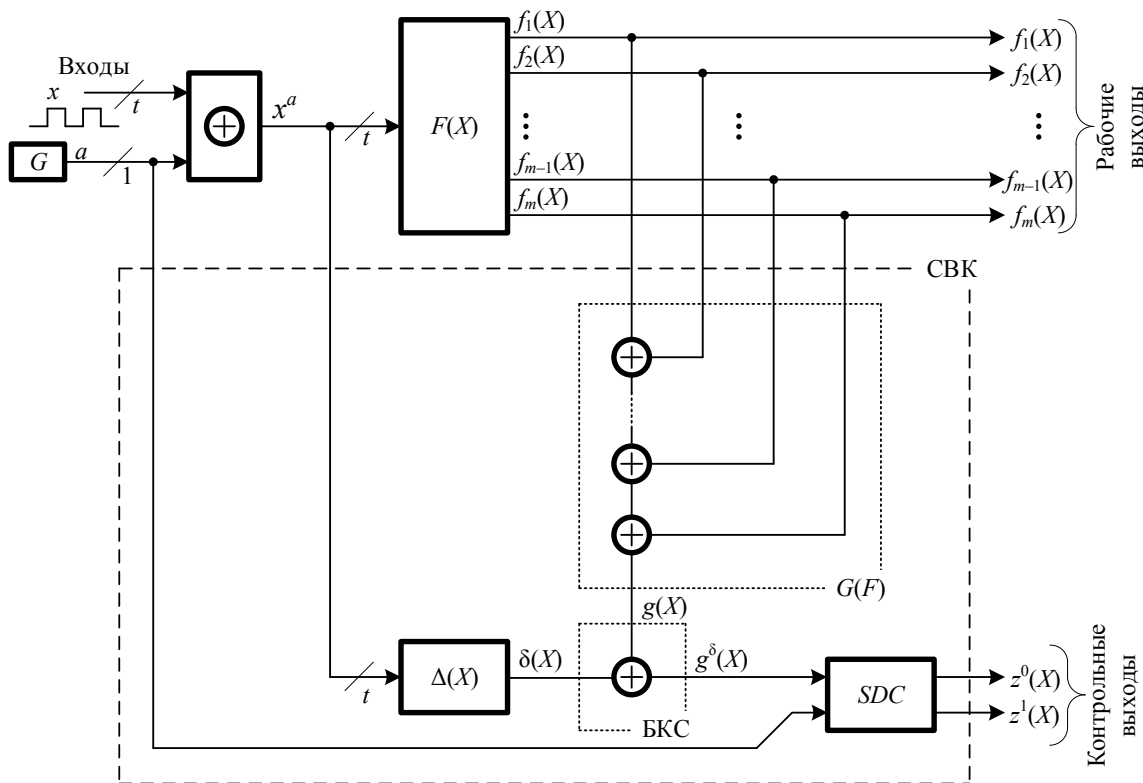


Рис. 1. Структура организации СВК со сжатием сигналов на основе свертки по модулю 2

Лемма 2. Ошибка, вызванная неисправностью, обнаружена не будет, если значение функции $g^\delta(X)$ искажится на обеих комбинациях из подаваемой пары.

Справедливость приведенных положений следует из того, что самодвойственность функции не нарушится в том и только том случае, если функция при подаче на входы пар наборов значений аргументов $(i, 2^t - 1 - i)$ примет противоположные значения. Если она изначально была самодвойственной, то такой случай возможен только при одновременном искажении значений функции на обеих комбинациях из пары.

Здесь следует также отметить, что на выходах объекта диагностирования могут быть реализованы произвольные булевы функции $f_1(X), f_2(X), \dots, f_{m-1}(X), f_m(X)$. Такое уточнение возникает, поскольку, например, при непосредственном контроле вычислений на выходах объекта диагностирования с помощью *SDC* потребуются предварительное преобразование каждой функции в самодвойственную [27].

Структура, приведенная на рис. 1, обладает следующей ключевой особенностью: в отличие от традиционной СВК с контролем вычислений по паритету [23, 24], за счет использования логической коррекции сигнала (ЛКС) от схемы сжатия по паритету возможно построение колоссального количества блоков вычисления функции $\delta(X)$ коррекции сигналов и выбор среди них такого блока, который будет иметь наименьшие показатели сложности технической реализации. Число способов преобразования единственной функции паритета $g(X)$ в самодвойственную функцию $g^\delta(X)$ на 2^t наборах значений аргументов равно $2^{2^{t-1}}$. Среди этого количества может быть выбран наиболее простой вариант в заданной метрике (например, по числу входов использованных логических элементов, показателям площади, занимаемой устройством на кристалле, или же по числу транзисторов, необходимых для реализации; возможно использование и иных метрик)¹.

¹ Здесь следует дать некоторое уточнение. Число вариантов преобразований зависит от числа t аргументов. При $t = 5$ оно составляет 65 536, а при $t = 10$ — $1,3408 \cdot 10^{154}$. Поэтому на практике целесообразно либо рассматривать наилучшие варианты организации СВК по зафиксированному критерию из псевдослучайного подмножества вариантов фиксированной мощности, либо использовать зафиксированные зависимости между функциями $\delta(X)$ и $g(X)$ (некоторые из них представлены в § 3 статьи [22]).

В [22] в эксперименте с тестовыми комбинационными схемами MCNC Benchmarks показано, что использование структуры рис. 1 при незначительном ухудшении обнаруживающих способностей в среднем на 1,7 % по сравнению с традиционным контролем вычислений по паритету позволяет уменьшать показатели структурной избыточности на 60 % по сравнению с ним. Это является весомым преимуществом использования структуры контроля вычислений по признаку самодвойственности с предварительным сжатием сигналов от объекта диагностирования с использованием функции паритета².

Покажем далее, однако, что рассматриваемая на рис. 1 структура не лишена недостатков, и при определенных особенностях объекта диагностирования (конкретнее, особенностях реализуемых им функций) окажется невозможным тестирование элементов кодера $G(F)$.

2. Особенности обнаружения ошибок в структуре организации контроля вычислений по признаку самодвойственности со сжатием сигналов на основе функции паритета

К сожалению, в § 6 статьи [22] не обсуждаются детали относительно особенностей идентифицируемых и неидентифицируемых ошибок на выходах тестовых схем: например, нет указания на то, какое количество ошибок не обнаружено именно на выходах объекта диагностирования $F(X)$, а какое — на выходах устройства $G(F)$. Исследования автора настоящей статьи показывают, что в этом кроется один из основных аспектов, влияющих на ухудшение обнаруживающих свойств структуры рис. 1.

Действительно, уязвимостью структуры, приведенной на рис. 1, является особенность обнаружения ошибок кодера $G(F)$.

В [29] доказана следующая теорема о тестируемости двухвходовых элементов *XOR*, входящих в структуры кодеров кодов паритета, которая важна для дальнейших рассуждений.

² К слову, авторы данного метода называли его «самодвойственным паритетом», что не совсем точно характеризует его с позиции используемых особенностей предварительного сжатия сигналов — функция $g^\delta(X)$ не является функцией паритета.

Теорема 1. В схемной реализации линейной булевой функции от нечетного числа аргументов, от которых она зависит существенно, при контроле вычислений по признаку самодвойственности не тестируются неисправности элементов XOR, которые связаны путями с четным числом входов.

Однако в структуре рис. 1 используется кодер $G(F)$, на входы которого не всегда подаются самодвойственные функции $f_1(X)$, $f_2(X)$, ..., $f_{m-1}(X)$, $f_m(X)$ (в общем случае они являются произвольными), поэтому здесь существуют особенности, которые требуется учитывать, дабы было возможным построение полностью самопроверяемых СВК по разработанному в [21, 22] методу.

Покажем на примерах, какие именно ошибки не обнаруживаются в структурах блоков $G(F)$ в СВК, организованной по описанному выше методу.

На рис. 2 и 3 приводятся примеры распространения ошибок с выходов элементов структуры блока $G(F)$ на выходы БКС. На каждом рисунке демонстрируется по две пары состояний подсхемы СВК, которые возникают при подаче на входы двух произвольных информационных векторов, генерируемых на выходах объекта диагностирования при подаче на входы инверсных комбинаций. Для пары слева не меняется четность подвектора информационного вектора, генерируемого на выходах, связанных путями с отказавшим элементом XOR. Такая ошибка на обеих подаваемых парах комбинаций приводит к искажениям на выходах. Другими словами, не нарушается свойство самодвойственности функции $g^\delta(X)$. Ошибка не обнаруживается, несмотря на то что и в первом, и во втором случаях меняется четность всего информационного вектора. Для пары справа на каждом из рисунков четность одного из подвекторов информационных векторов, генерируемых на выходах, связанных путями с отказавшим элементом XOR, меняется. Ошибка в этом случае маскируется на одной из подаваемых пар, но на второй — транслируется на выход $g^\delta(X)$. На обеих комбинациях из пары функция $g^\delta(X)$ принимает одинаковые значения, и ошибка обнаруживается. Данные свойства присущи подсхемам, где неисправности вносятся на любые элементы XOR.

Теорема 2. При контроле вычислений по признаку самодвойственности с предварительным сжатием сигналов от объекта диагностирования по паритету неисправности элементов XOR не обнаруживаются в том случае, если не меняется четность подвектора информационного вектора, генерируемого на выходах, связанных путями с отказавшим элементом.

Доказательство. Рассмотрим функцию $g^\delta(X)$, вычисляемую по формуле $g^\delta(X) = \delta(X) \oplus g(X)$, при подаче на входы объекта диагностирования произвольной пары наборов значений аргументов $(i, 2^t - 1 - i)$, $i \in \{0, 1, \dots, 2^{t-1} - 1\}$. На первом наборе из пары $g^\delta(X) = 0$ (1), а на втором — наоборот, $g^\delta(X) = 1$ (0).

Зафиксируем один из вариантов, например первый. Рассмотрим случай, когда $g^\delta(X) = 0$ при подаче первого набора и $g^\delta(X) = 1$ — при подаче второго.

Внесем произвольную неисправность в структуру $G(F)$ — на выход элемента XOR, связанного путями с $q \leq m$ входами кодера. Она может проявиться на выходе $G(F)$ только в том случае, если вид неисправности ($0 \rightarrow 1$ или $1 \rightarrow 0$) будет отличаться от значения четности на q входах, связанных путями с отказавшим XOR. Если четность отличается, то неисправность маскируется.

Пусть при подаче первого набора значений аргументов был сгенерирован информационный вектор, для которого число единиц на q входах, связанных путями с отказавшим XOR, оказалось нечетным. Если в оставшемся подвекторе, состоящем из $(m - q)$ разрядов, нечетное число единиц, то в исправном состоянии $g(X) = 0$, иначе — $g(X) = 1$. Обнаруживаемая ошибка имеет вид $1 \rightarrow 0$. В первом случае она транслируется на выход $g(X)$ в виде $0 \rightarrow 1$, а во втором — $1 \rightarrow 0$. Так как изначально $g^\delta(X) = 0$, то в первом рассматриваемом случае $\delta(X) = 0$, а во втором — $\delta(X) = 1$. В обоих случаях ошибка на выходе $g^\delta(X)$ проявится в виде искажения $0 \rightarrow 1$.

Рассмотрим, что произойдет при подаче на входы объекта диагностирования второго набора значений аргументов, когда нет неисправностей $g^\delta(X) = 1$. Пусть четность рассматриваемого подвектора информационного вектора при подаче второго набора значений

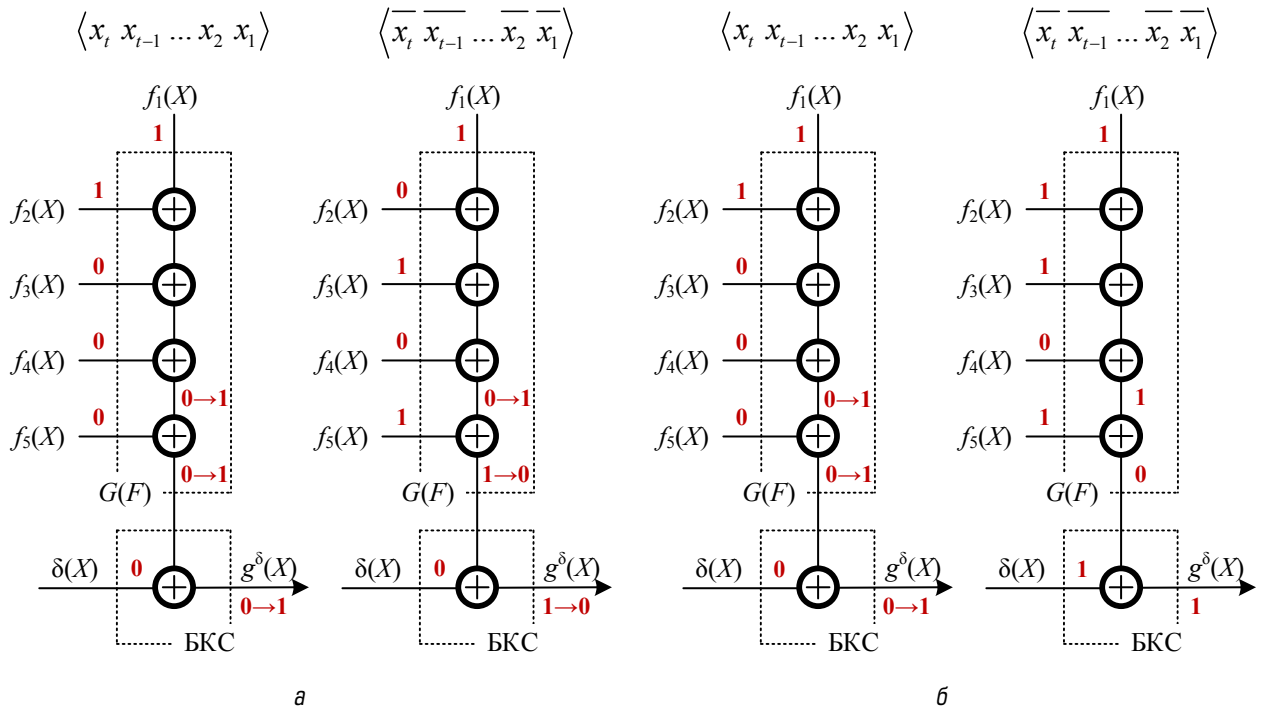


Рис. 2. Демонстрация распространения ошибок на выходе элемента XOR, связанного с четным числом входов, при контроле самодвойственности функции: *a* — необнаруживаемая ошибка, *б* — обнаруживаемая ошибка

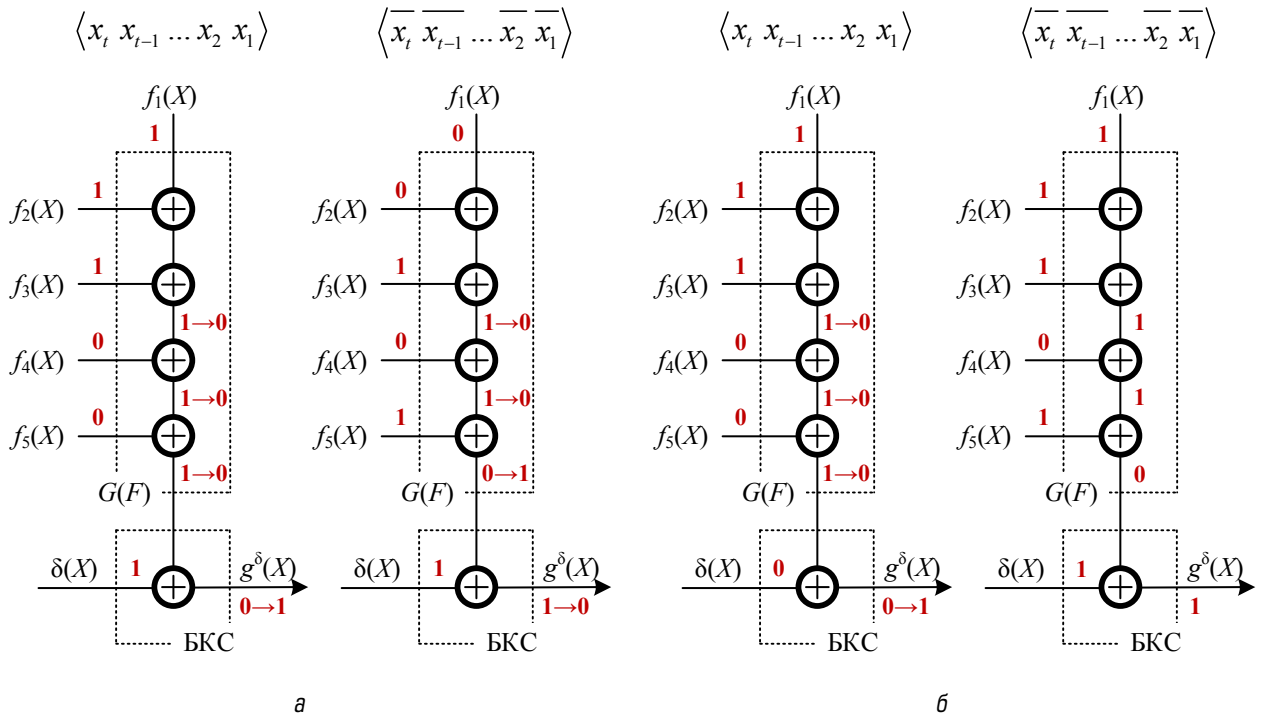


Рис. 3. Демонстрация распространения ошибок на выходе элемента XOR, связанного с нечетным числом входов, при контроле самодвойственности функции: *a* — необнаруживаемая ошибка, *б* — обнаруживаемая ошибка

аргументов сохранилась, и та же ошибка транслируется на выход $G(F)$. Если число единиц в оставшемся подвекторе нечетно, то в исправном состоянии $g(X) = 0$, если четно — то $g(X) = 1$. Отсюда ясно, что $\delta(X) = 1$ в первом варианте и $\delta(X) = 0$ — во втором (в противном случае $g^\delta(X) \neq 1$, что противоречит изначальному положению). В обоих случаях ошибка на выходе $g^\delta(X)$ проявится в виде искажения $1 \rightarrow 0$.

Аналогичные рассуждения касаются и случая четности числа единиц на q входах, связанных путями с отказавшим XOR .

При подаче на входы обоих наборов значений аргументов, таким образом, неисправности рассматриваемого элемента XOR окажутся не обнаруженными при контроле самодвойственности, так как не приведут к нарушению парафазности значений $g^\delta(X)$ на паре наборов (см. лемму 2).

Ошибка может быть обнаружена только в том случае, если четность числа единиц на q входах, связанных путями с отказавшим XOR , изменилась при генерации информационного вектора на втором наборе значений аргументов. В этом случае на нем она компенсируется (маскируется), что приводит к нарушению парафазности значений $g^\delta(X)$ на паре наборов (см. лемму 1).

Таким образом, теорема 2 доказана. ■

Из теоремы 2 следуют условия, при которых можно построить СВК с контролем вычислений по структуре, изображенной на рис. 1, с самопроверяемым блоком $G(F)$.

Теорема 3. При контроле вычислений по признаку самодвойственности с предварительным сжатием сигналов от объекта диагностирования по паритету ошибка в блоке $G(F)$, транслируемая на его выход, будет обнаруживаться в том случае, если при подаче на входы объекта диагностирования полного множества пар наборов значений аргументов $(i, 2^t - 1 - i)$, $i \in \{0, 1, \dots, 2^{t-1} - 1\}$, хотя бы на одной из них меняется четность значений числа единиц во всех подвекторах информационных векторов с q разрядами, выделяемыми при рассмотрении неисправностей кодера.

Теорема 3 непосредственно следует из теоремы 2 и способа построения кодера.

Приведем пример устройства $F(X)$, для которого использование структуры контроля вычислений, изображенной на рис. 1, не дает

Таблица 1. Описание дискретного устройства № 1

x_3	x_2	x_1	$f_4(X)$	$f_3(X)$	$f_2(X)$	$f_1(X)$
0	0	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0	1
0	1	0	0	1	0	0
0	1	1	1	0	0	0
1	0	0	0	1	1	1
1	0	1	1	1	1	1
1	1	0	0	0	1	0
1	1	1	1	0	0	1

возможности построения полностью самопроверяемой СВК без перестановки выходов (табл. 1). Из анализа столбцов $f_1(X)$ и $f_2(X)$ на парах наборов значений аргументов (0, 7), (1, 6), (2, 5) и (3, 4) становится ясно, что неисправности элемента XOR в $G(F)$, сжимающего значения этих функций, не тестируются при контроле вычислений по признаку самодвойственности. Для обеспечения тестируемости кодера требуется реализовать определенную перестановку выходов.

В табл. 2 приведено описание дискретного устройства, для которого невозможно обеспечить проверку последнего элемента XOR в $G(F)$, сжимающего значения этих функций, не тестируются при контроле по признаку самодвойственности. Четности информационных векторов, формируемых на парах наборов значений аргументов (0, 7), (1, 6), (2, 5) и (3, 4), совпадают.

Покажем далее, за счет чего возможна модернизация структуры, приведенной на рис. 1, в которой более просто обеспечивается самопроверяемость СВК. Однако при этом нивелируется свойство структуры, приведенной на рис. 1, заключающееся в возможности минимизации показателей структурной избыточности.

Таблица 2. Описание дискретного устройства № 2

x_3	x_2	x_1	$f_4(X)$	$f_3(X)$	$f_2(X)$	$f_1(X)$
0	0	0	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0	1
0	1	0	0	1	0	1
0	1	1	1	0	0	0
1	0	0	0	1	1	1
1	0	1	1	1	1	1
1	1	0	0	1	1	0
1	1	1	1	0	0	1

3. Структура организации контроля вычислений по двум диагностическим признакам на основе кода паритета

Из приведенного выше анализа следует, что применение модифицированной структуры контроля вычислений по паритету позволяет синтезировать полностью самопроверяемые структуры не всегда. Как не всегда это удается делать и с помощью классической структуры контроля вычислений по паритету. Фактически в модифицированной структуре из-за особенностей организации контроля вычислений нивелируются свойства обнаружения ошибок, используемые в классической структуре, однако добавляются новые свойства — обнаружения ошибок на парах наборов значений аргументов. Основным преимуществом модифицированной структуры оказывается возможность минимизации показателей структурной избыточности СВК по сравнению с использованием паритета, но это так или иначе приводит к ухудшению обнаруживающих характеристик.

Удачным оказывается сочетание свойств классической и модифицированной структур и организация СВК по двум диагностическим признакам, общие принципы синтеза которых даны в [30]. Однако сразу же нивелируется преимущество модифицированной структуры в части снижения показателей структурной избыточности. Тем не менее в сравнении с иными используемыми методами (например, синтезом СВК на основе равновесных кодов и кодов с суммированием или методом дублирования) контроль вычислений сразу по двум диагностическим признакам оказывается эффективным.

На рис. 4 приведена структура организации контроля вычислений по двум диагностическим признакам на основе кода паритета. Ранее именно эта структура в научной литературе не обсуждалась, по всей видимости, по тем причинам, что показатели структурной избыточности ее реализации гарантированно будут более высокими, чем при контроле вычислений на основе классической структуры контроля по паритету (однако нигде не обсуждалось то, что в ней и выше показатели контролепригодности в части наблюдаемости ошибок на контрольных выходах СВК).

Так как на выходе блока $G(F)$ формируется значение функции $g(X)$ паритета, вывод сигнала с него и дополнительный контроль вычислений именно по паритету вкуче с контролем самодвойственности функции $g^\delta(X)$ позволяет обеспечивать полную проверку кодера $G(F)$. В СВК выделяются две подсхемы контроля вычислений. Первая, уже описанная выше, — схема контроля вычислений по принадлежности функции $g^\delta(X)$ классу самодвойственных булевых функций. Ее выходы — $z_2^0(X)$ и $z_2^1(X)$. Подсхема контроля вычислений по паритету использует тот же кодер $G(F)$, блок контрольной логики $G(X)$ и инвертор. Блок контрольной логики $G(X)$ также является кодером кода паритета и генерирует контрольный бит $g(X)$ непосредственно по значениям, поступающим на входы объекта диагностирования. Данный бит инвертируется для организации контроля парафазности сигнала на выходах блоков $G(F)$ и $g(X)$. Контрольные выходы данной подсхемы — это выходы $z_1^0(X)$ и $z_1^1(X)$. Контрольные выходы обеих подсхем контроля подключаются к входам одного элементарного модуля сжатия парафазных сигналов TRC [31] для получения единственной пары контрольных выходов $z^0(X)$ и $z^1(X)$.

Блоки $G(X)$ и $\Delta(X)$ могут быть реализованы совместно, что позволит оптимизировать показатели структурной избыточности данной части СВК. При наилучших вариантах реализации выход $g^\delta(X)$ может быть подсхемой блока $G(X)$. В этом случае показатели структурной избыточности СВК будут совсем незначительно (на величины показателей сложности реализации SDC и TRC) отличаться от показателей структурной избыточности СВК, реализованной по классической структуре контроля по паритету.

Описанное устройство СВК по двум диагностическим признакам позволяет повысить показатели обнаружения ошибок на выходах объекта диагностирования и каждого блока СВК.

Структура, приведенная на рис. 4, строится с учетом ряда требований по обеспечению самопроверяемости:

1. Устройство $F(X)$ должно быть проверяемым, или самотестируемым, что означает

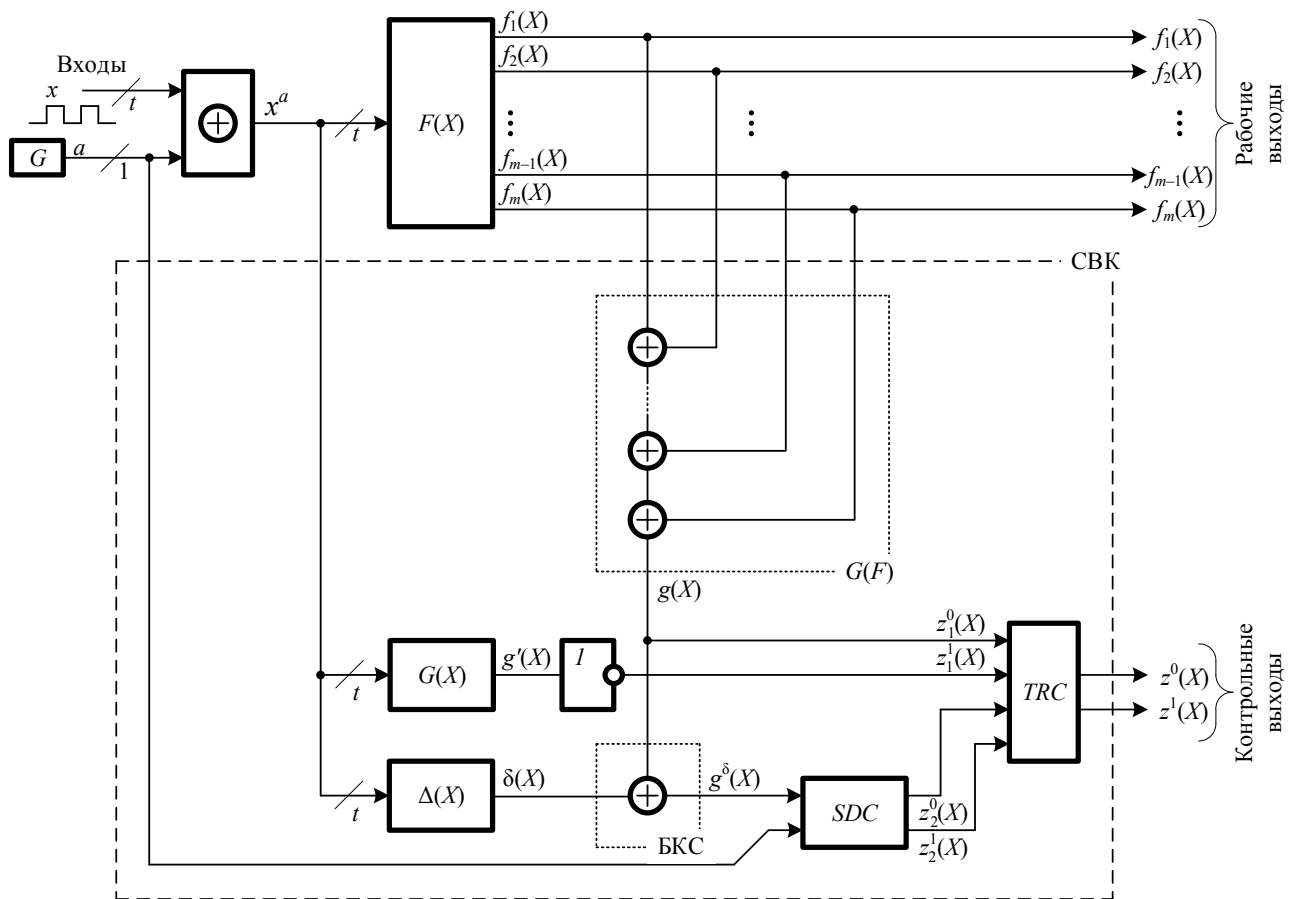


Рис. 4. Структура организации СВК с контролем вычислений по двум диагностическим признакам на основе кода паритета

возможность трансляции ошибки, вызванной неисправностью из заданной модели, на выходы устройства хотя бы на одном наборе значений аргументов [6]. В противном случае невозможно обеспечить обнаружение такой неисправности.

2. Устройства $G(X)$ и $\Delta(X)$ должны быть проверяемыми.

3. На входы кодера $G(F)$ должны поступать тестовые наборы, необходимые для полной проверки его структуры. При канонической реализации XOR тест составляют все четыре набора из множества $\{00, 01, 10, 11\}$. Условия же тестируемости структур, реализующих функцию паритета, хорошо изучены в [32].

4. Аналогично на входы элемента коррекции в БКС должен поступать проверяющий тест. Это требует формирования как минимум на двух наборах значений аргументов значений функций $\delta(X) = 0$ (1) и $g(X) = 0$ (1).

5. Функция $g'(X)$ должна принимать значение 0 (1) хотя бы на одном наборе значений аргументов.

6. Должна обеспечиваться проверка SDC , что реализуется в двух тактах его работы при подаче на входы $g^\delta(X)$ и a рабочих воздействий.

7. На входы TRC должен поступать проверяющий тест, включающий комбинации $\{0101, 0110, 1001, 1010\}$.

Несмотря на довольно внушительный перечень требований, они выполняются довольно легко при корректном проектировании СВК, за исключением проверяемости блока $F(X)$, что должно быть обеспечено на этапе его проектирования, и возможностей тестируемости кодера в СВК, что требует формирования определенного множества рабочих комбинаций на выходах блока $F(X)$ [32].

4. Пример синтеза схемы встроенного контроля вычислений по двум диагностическим признакам

Рассмотрим пример синтеза самопроверяемого устройства по приведенной выше структуре (рис. 4). В первых одиннадцати графах

Таблица 3. Описание устройства с СВК к рассматриваемому примеру

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

табл. 3 задано произвольное комбинационное устройство. Получим функции, описывающие выходы $g(X)$, $g^\delta(X)$ и $\delta(X)$.

На начальном этапе значения функций $g(X)$, $g^\delta(X)$ и $\delta(X)$ не определены. Их нужно получить при рассмотрении каждого набора значений аргументов. Значения $g(X)$ получаются однозначно при подстановке каждого набора значений аргументов в формулу $g(X) = f_1(X) \oplus f_2(X) \oplus \dots \oplus f_{m-1}(X) \oplus f_m(X)$, $m=6$. Значения функции $\delta(X)$ определяются из формулы:

$$g^\delta(X) = \delta(X) \oplus g(X) \Rightarrow \delta(X) = g^\delta(X) \oplus g(X). \tag{3}$$

Трудности заключаются лишь с получением значений функции $g^\delta(X)$ на каждом наборе значений аргументов — существует $2^{2^{4-1}} = 2^8 = 256$ вариантов самодвойственных функций от четырех аргументов. Можно было бы перебрать каждый из них и использовать тот, который дает наименее сложную функцию $\delta(X)$, частично или полностью совпадающую с функцией $g(X)$. Однако делать здесь этого не будем, а используем один из методов расчета функций $g^\delta(X)$: на второй половине значений аргументов с десятичными номерами № 8 — № 15, то есть

при $x_4 = 1$, определим функцию $g^\delta(X) = g(X)$; на первой половине значений аргументов с десятичными номерами № 0 — № 7, то есть при $x_4 = 0$, определим значения функции $g^\delta(X)$ инверсными к значениям функции на инверсных наборах второй половины:

$$g^\delta(X) = x_4 g(X) \vee \overline{x_4} \overline{g(X)}. \tag{4}$$

В последних трех графах табл. 3 представлены значения функций $g(X)$, $g^\delta(X)$ и $\delta(X)$.

Все блоки СВК стандартные, поэтому требуется лишь синтезировать блоки $g(X)$ и $\delta(X)$. Оптимизируя данные функции методом Карно [33, 34], получаем:

$$g(X) = \overline{x_4} \overline{x_2} \overline{x_1} \vee \overline{x_4} x_2 x_1 \vee \overline{x_4} x_3 \overline{x_2} \vee \overline{x_4} x_2 x_1 \vee x_4 x_3 x_2 \overline{x_1},$$

$$\delta(X) = \overline{x_4} x_3 x_1.$$

Здесь также следует отметить возможность совместной реализации функций $g(X)$ и $\delta(X)$, например, следующим образом:

$$g(X) = \overline{x_4} \overline{x_2} \overline{x_1} \vee x_2 y \vee \overline{x_4} x_3 \overline{x_2} \vee \overline{x_4} x_2 x_1 \vee x_4 x_3 x_2 \overline{x_1},$$

$$\delta(X) = y x_3,$$

$$y = \overline{x_4} x_1.$$

Таблица 4. Описание контрольной части устройства в отсутствие неисправностей

№	x_4	x_3	x_2	x_1	$b_1(X)$	$b_2(X)$	$b_3(X)$	$b_4(X)$	$b_5(X)$	$\delta(X)$	$g(X) = b_5(X)$	$g^\delta(X)$	$\psi^\delta(X)$	$\psi^\pi(X)$
0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0
1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0
4	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0
5	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0
6	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0
8	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0
9	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0
10	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
12	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
13	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0
14	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0
15	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0

Получив логические выражения, описывающие выходы блоков $g(X)$ и $\delta(X)$ в СВК, переходят к реализации самопроверяемого устройства в выбранном элементном базисе по структуре, приведенной на рис. 4.

Покажем, что для устройства, синтезированного по табл. 3 с использованием структуры, приведенной на рис. 4, только при контроле самодвойственности вычислений не будут обнаруживаться неисправности, не удовлетворяющие условию теоремы 3.

Для этого рассмотрим пример константных неисправностей первого элемента XOR_1 , осуществляющего операцию $f_1(X) \oplus f_2(X)$. В табл. 4 приведено описание только контрольной части исправной и правильно спроектированной схемы рис. 4. Здесь даны сигналы $b_1(X) — b_5(X)$ на выходах элементов $XOR_1 — XOR_5$, $\delta(X)$, $g(X) = b_5(X)$ и $g^\delta(X)$ на каждом наборе значений аргументов. Также рассчитаны две функции фиксации ошибки на наборах значений аргументов:

$$\psi^\delta(X) = \overline{g^\delta(X) \oplus g^\delta(\bar{X})}; \quad (5)$$

$$\psi^\pi(X) = g(X) \oplus g^*(X), \quad (6)$$

где $g^*(X)$ — значение функции паритета, рассчитанное на конкретном наборе значений аргументов при наличии неисправности в структуре.

При $\psi^\delta(X) = 0$ и $\psi^\pi(X) = 0$ ошибка не зафиксирована (либо она не проявляется на рассматриваемом наборе значений аргументов, либо оказалась необнаруженной), и, наоборот, — при $\psi^\delta(X) = 1$ и $\psi^\pi(X) = 1$ ошибка зафиксирована.

В функции $\psi^\delta(X)$ значение суммы $g^\delta(X) \oplus g^\delta(\bar{X})$ инвертируется, так как значения функции в исправном состоянии структуры $g^\delta(X) \neq g^\delta(\bar{X})$.

В табл. 5 и 6 сведены данные о работе СВК при возникновении одиночных константных неисправностей XOR_1 . Наибольший интерес представляют последние две графы каждой из таблиц, где приведены данные для функций $\psi^\delta(X)$ и $\psi^\pi(X)$. Функция $\psi^\delta(X) = 0$ на всех наборах значений аргументов для обеих неисправностей, что говорит о невозможности их обнаружения ни на одной из пар наборов значений аргументов при самодвойственном контроле вычислений (этот коэффициент говорит в том числе о характеристиках тестопригодности структуры, приведенной на рис. 1). Значение функции $\psi^\delta(X)$, наоборот, на всех наборах значений аргументов, где неисправность проявляется

Таблица 5. Описание контрольной части устройства при неисправности вида «константа 0» на выходе XOR_1

№	x_4	x_3	x_2	x_1	$b_1(X)$	$b_2(X)$	$b_3(X)$	$b_4(X)$	$b_5(X)$	$\delta(X)$	$g(X) = b_5(X)$	$g^\delta(X)$	$\psi^\delta(X)$	$\psi^\pi(X)$
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1
2	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0
6	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1
7	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1
8	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1
9	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
10	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1
12	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1
13	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0
14	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
15	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1

Таблица 6. Описание контрольной части устройства при неисправности вида «константа 1» на выходе XOR_1

№	x_4	x_3	x_2	x_1	$b_1(X)$	$b_2(X)$	$b_3(X)$	$b_4(X)$	$b_5(X)$	$\delta(X)$	$g(X) = b_5(X)$	$g^\delta(X)$	$\psi^\delta(X)$	$\psi^\pi(X)$
0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0
1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1
3	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0
4	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0
5	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1
6	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
8	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0
9	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0
10	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1
11	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
13	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
14	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0
15	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(значение функции $b_1(X)$, отличается от корректного при неисправности (см. столбцы $b_1(X)$ в табл. 4–6)), равна 1. Это говорит о том, что как раз контроль вычислений по паритету позволил зафиксировать неисправности на всех наборах

значений аргументов. Становится ясно, что структура рис. 4 обладает более высокой контролепригодностью, нежели известная структура самодвойственного контроля вычислений со сжатием сигналов по паритету.

Заключение

Существует несколько вариантов использования контроля вычислений по паритету при организации СВК для дискретных устройств. К известным методам контроля вычислений по паритету (к классическому методу) и контроля вычислений с предварительным сжатием сигналов от объекта диагностирования с использованием функции паритета и последующей коррекцией сигнала в самодвойственной (к модифицированному методу) следует добавить метод, сочетающий в себе оба диагностических признака — и контроля принадлежности вычисляемой функции коду паритета, и контроля самодвойственности скорректированного значения. Данный метод сочетает в себе достоинства и классического, и модифицированного методов контроля вычислений по паритету, нивелирует недостатки каждого. Однако, в отличие от модифицированного метода, не позволяет построить структуру СВК, более простую, чем при использовании классического метода контроля вычислений по паритету. Но в сравнении с использованием иных методов, основанных на применении свойств помехозащищенных и помехоустойчивых кодов, включая метод дублирования, сохраняется положительный эффект — предложенный метод позволяет повысить обнаруживающие характеристики структуры за счет использования двух диагностических признаков и дает соизмеримое с классической структурой организации контроля вычислений по паритету усложнение СВК.

Для повышения обнаруживающих характеристик предложенного метода может использоваться выделение двух и более групп выходов с контролем вычислений по предложенной в статье структуре. Принципы выделения групп выходов, определение обнаруживающих характеристик получаемых структур, возможности оптимизации показателей структурной избыточности за счет использования неполного множества наборов значений аргументов, экспериментальные исследования методов на тестовых комбинационных схемах — являются темами для дальнейших исследований. Интересным развитием направления исследований структуры, приведенной на рис. 4,

также является рассмотрение в качестве ее основы равномерных блоковых кодов, для которых вычисляется несколько функций паритета для различных информационных символов. Вопросам применения таких кодов при синтезе структур с контролем вычислений по нескольким диагностическим признакам посвящено не так много работ, например статьи [35–37], где рассматривается несколько иная структура организации СВК и требуется предварительное преобразование структуры объекта диагностирования в самодвойственную структуру. Также интерес представляет рассмотрение еще одного вида дополнительного контроля вычислений, подразумевающего контроль принадлежности вычисляемых функций классу «близких» к самодвойственным и самоквазидвойственным функциям [38, 39]³. Это справедливо, поскольку само преобразование в БКС может быть осуществлено произвольно, в том числе так, чтобы функция $g(X)$ оказалась самоквазидвойственной. В этом смысле может быть получено большое количество самопроверяемых структур с различными свойствами.

Контроль вычислений по двум диагностическим признакам на основе предварительного сжатия сигналов с использованием кода паритета представляет собой метод, основанный на применении стандартных подходов, но сочетающий в себе положительные свойства двух разных методов построения самопроверяемых дискретных устройств. ▲

Список источников

1. Глушков В. М. Синтез цифровых автоматов / В. М. Глушков. — М.: ЛЕНАНД, 2022. — 480 с.
2. Мосин С. Г. Подход к выбору метода тестирования смешанных интегральных схем на основе стоимостной модели / С. Г. Мосин // Управление большими системами. — 2013. — № 41. — С. 344–356.
3. Сперанский Д. В. Генетический алгоритм размещения контрольных точек в цифровом устройстве / Д. В. Сперанский // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. — 2017. — Т. 17. — № 3. — С. 353–362.

³ Обратим внимание читателя на то, что в [38, 39] самоквазидвойственные функции определены как самоантидвойственные, что не совсем точно отражает их особенности, однако на их свойства в вычислительных системах ученые обратили внимание довольно давно.

4. Hahanov V. Vector Synthesis of Fault Testing Map for Logic / V. Hahanov, W. Gharibi, S. Chumachenko, E. Litvinova // *IAES International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*. — 2024. — Vol. 13. — Iss. 3. — Pp. 293–306.
5. Ubar R. Structural Decision Diagrams in Digital Test: Theory and Applications / R. Ubar, J. Raik, M. Jenihhin, A. Jutman. — Switzerland: Springer Nature, 2024. — 595 p.
6. Пархоменко П. П. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомоян. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 320 с.
7. Drozd A. Checkability of the Digital Components in Safety-Critical Systems: Problems and Solutions / A. Drozd, V. Kharchenko, S. Antoshchuk, J. Sulima et al. // *Proceedings of 9th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2011)*. — Sevastopol, Ukraine, 2011. — Pp. 411–416.
8. Сапожников В. В. Дискретные автоматы с обнаружением отказов / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. — Л.: Энергоатомиздат, 1984. — 112 с.
9. Согомоян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомоян, Е. В. Слабаков. — М.: Радио и связь, 1989. — 208 с.
10. Juracy L. R. Optimized Design of an LSSD Scan Cell / L. R. Juracy, M. T. Moreira, F. A. Kuentzer, A. M. Amory // *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*. — 2017. — Vol. 25. — Iss. 2. — Pp. 765–768.
11. Mitra S. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? / S. Mitra, E. J. McCluskey // *Proceedings of International Test Conference*. — USA, Atlantic City, NJ, 2000. — Pp. 985–994.
12. Chioktour V. Adaptive BIST for Concurrent On-Line Testing on Combinational Circuits / V. Chioktour, A. Kakarountas // *Electronics*. — 2022. — Vol. 19. — Iss. 11. — Pp. 1–20.
13. Sahana A. R. Application of Error Detection and Correction Techniques to Self-Checking VLSI Systems: An Overview / A. R. Sahana, V. Chiraag, G. Suresh, P. Thejaswini et al. // *Proceedings of 2023 IEEE Guwahati Subsection Conference (GCON)*. — Guwahati, 2023.
14. Сапожников В. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Том 1: Классические коды Бергера и их модификации / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. — М.: Наука, 2020. — 383 с.
15. Сапожников В. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Том 2: Взвешенные коды с суммированием / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. — М.: Наука, 2021. — 455 с.
16. Сагалович Ю. Л. Обнаружение неисправностей в схемной реализации системы монотонных булевых функций / Ю. Л. Сагалович, В. Ю. Соломенников // *Проблемы передачи информации*. — 1997. — Т. 33. — № 2. — С. 81–93.
17. Dmitriev A. New Self-Dual Circuits for Error Detection and Testing / A. Dmitriev, V. Saposhnikov, V. Saposhnikov, M. Goessel // *VLSI Design*. — 2000. — Vol. 11. — Iss. 1. — Pp. 1–21.
18. Matrosova A. Yu. Self-Checking Synchronous FSM Network Design with Low Overhead / A. Yu. Matrosova, I. Levin, S. A. Ostanin // *VLSI Design*. — 2000. — Vol. 11. — Iss. 1. — Pp. 47–58.
19. Göessel M. New Methods of Concurrent Checking / M. Göessel, V. Ocheretny, E. Sogomonyan, D. Marienfeld. — Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., 2008. — 184 p.
20. Яблонский С. В. Введение в дискретную математику / С. В. Яблонский; под ред. В. А. Садовничева. — М.: Высшая школа, 2003. — 384 с.
21. Saposhnikov Vl. V. Self-Dual Parity Checking — a New Method for on Line Testing / Vl. V. Saposhnikov, A. Dmitriev, M. Goessel, V. V. Saposhnikov // *Proceedings of 14th IEEE VLSI Test Symposium*. — USA, Princeton, 1996. — Pp. 162–168.
22. Гессель М. Самотестируемая структура для функционального обнаружения отказов в комбинационных схемах / М. Гессель, А. В. Дмитриев, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // *Автоматика и телемеханика*. — 1999. — № 11. — С. 162–174.
23. Согомоян Е. С. Построение самопроверяемых схем встроенного контроля для комбинационных устройств / Е. С. Согомоян // *Автоматика и телемеханика*. — 1974. — № 2. — С. 121–133.
24. Аксенова Г. П. Построение самопроверяемых схем встроенного контроля для автоматов с памятью / Г. П. Аксенова, Е. С. Согомоян // *Автоматика и телемеханика*. — 1975. — № 7. — С. 132–142.
25. Ефанов Д. В. Тестеры самодвойственных и «близких» к ним сигналов / Д. В. Ефанов, Д. В. Пивоваров // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. — 2024. — Т. 67. — № 1. — С. 5–19.
26. Аксенова Г. П. Восстановление в дублированных устройствах методом инвертирования данных / Г. П. Аксенова // *Автоматика и телемеханика*. — 1987. — № 10. — С. 144–153.
27. Гессель М. Обнаружение неисправностей в самопроверяемых комбинационных схемах с использованием свойств самодвойственных функций / М. Гессель, В. И. Мошанин, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // *Автоматика и телемеханика*. — 1997. — № 12. — С. 193–200.
28. Сапожников В. В. Самодвойственные дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, М. Гессель. — СПб.: Энергоатомиздат, 2001. — 331 с.
29. Ефанов Д. В. Особенности реализации самопроверяемых структур на основе метода инвертирования данных и линейных кодов / Д. В. Ефанов // *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. — 2023. — № 65. — С. 126–138.
30. Ефанов Д. В. Исследование свойств самодвойственных комбинационных устройств с контролем вычислений на основе кодов Хэмминга / Д. В. Ефанов, Т. С. Погодина // *Информатика и автоматизация*. — 2023. — Т. 22. — № 2. — С. 349–392.
31. Lala P. K. Self-Checking and Fault-Tolerant Digital Design / P. K. Lala. — San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001. — 216 p.
32. Аксенова Г. П. Необходимые и достаточные условия построения полностью проверяемых схем свертки по модулю 2 / Г. П. Аксенова // *Автоматика и телемеханика*. — 1979. — № 9. — С. 126–135.
33. Поспелов Д. А. Логические методы анализа и синтеза схем / Д. А. Поспелов. — М.: Энергия, 1968. — 328 с.

34. Закревский А. Д. Логические основы проектирования дискретных устройств / А. Д. Закревский, Ю. В. Поттосин, Л. Д. Черемисинова. — М.: Физматлит, 2007. — 592 с.
35. Ефанов Д. В. Особенности использования кодов Хэмминга при синтезе самопроверяемых цифровых устройств на основе метода инвертирования данных / Д. В. Ефанов // Известия высших учебных заведений. Электроника. — 2024. — Т. 29. — № 3. — С. 379–392.
36. Ефанов Д. В. Самодвойственные цифровые устройства с контролем вычислений по кодам Сяо / Д. В. Ефанов, Т. С. Погодина // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. — 2023. — № 63. — С. 118–136.

37. Ефанов Д. В. Синтез самопроверяемых дискретных устройств на основе полиномиальных кодов с контролем вычислений по нескольким диагностическим признакам / Д. В. Ефанов, Д. В. Пивоваров // Автоматика и телемеханика. — 2025. — № 5. — С. 39–60.
38. Шальто А. А. Логическое управление. Методы аппаратной и программной реализации / А. А. Шальто. — СПб.: Наука, 2000. — 780 с.
39. Шальто А. А. Модули, универсальные в классе самодвойственных функций и в «близких» к ним классах / А. А. Шальто // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2001. — № 5. — С. 110–120.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 3, pp. 264–279
DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-03-264-279

Self-Checking Discrete Device Synthesis Using Parity Code Properties and Self-Duality Boolean Functions

Information about author

Efanov D. V., Doctor in Engineering, Professor, IEEE Member, Full Member of International Transport Academy, Professor^{1,2,3,4}, Leading Researcher⁵.
E-mail: TrES-4b@yandex.ru

¹Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Higher School of Cyberphysical Systems & Control, Institute of Computer Science and Cybersecurity, Saint Petersburg

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

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

⁴Tashkent State Transport University, Department of Automation and Remote Control, Tashkent

⁵Institute of Transport Problems named after N. S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Problems of Organization of Transport Systems (Laboratory No. 5), Saint Petersburg

Abstract: The paper demonstrates that the established organizational structure of the concurrent error-detection circuit, founded on the self-duality feature with preliminary signal compression from the diagnostic object employing the parity function (a modified parity control structure), enables the comprehensive self-checking discrete devices for specific initial objects. As demonstrated, when conducting control checking calculations based on the self-duality feature with preliminary compression of signals from the diagnostic object by parity, faults in the modulo-2 addition gates of the parity code encoder are not detected. This is provided that the parity of the sub-vector of the data vector, generated at outputs connected by paths with the failed gate, remains unchanged. This imposes certain restrictions on the use of the established modified parity control structure in the self-checking discrete device synthesis. The paper presents a further modification to the parity testing structure. The proposed structure overcomes the known structure's drawback by ensuring calculation control through both parity and assigning the function describing the control output to the class of self-dual Boolean functions. Due to the minor complication of the CED circuit compared to the parity check circuit, it is possible to significantly improve the testability characteristics. Further studies of the new organization structure of CED parity check circuits will allow us to determine the criteria of its applicability in the self-checking discrete device synthesis.

Keywords: discrete device fault detection; self-checking discrete device; Boolean complement self-duality control; parity computing check; concurrent error-detection circuit; control circuit component testability.

References

1. Glushkov V. M. *Sintez tsifrovyykh avtomatov* [Synthesis of digital automata]. Moscow: LENAND Publ., 2022, 480 p. (In Russian)
2. Mosin S. G. Podkhod k vyboru metoda testirovaniya smeshannykh integral'nykh skhem na osnove stoimostnoy modeli [Approach to selecting a method for testing mixed integrated circuits based on a cost model]. *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Large Systems Management]. 2013, Iss. 41, pp. 344–356. (In Russian)
3. Speranskiy D. V. Geneticheskiy algoritm razmescheniya kontrol'nykh tochek v tsifrovom ustroystve [Genetic algorithm for placing test points in a digital device]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika* [Saratov University Journal. New Series. Series: Mathematics. Mechanics. Computer Science]. 2017, vol. 17, Iss. 3, pp. 353–362. (In Russian)
4. Hahanov V., Gharibi W., Chumachenko S., Litvinova E. Vector Synthesis of Fault Testing Map for Logic. *IAES International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*, 2024, vol. 13, Iss. 3, pp. 293–306.
5. Ubar R., Raik J., Jenihhin M., Jutman A. *Structural Decision Diagrams in Digital Test: Theory and Applications*. Switzerland: Springer Nature, 2024, 595 p.
6. Parkhomenko P. P., Sogomonyan E. S. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki (optimizatsiya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnye sredstva)* [Fundamentals of technical diagnostics (optimization of diagnostic algorithms, hardware means)]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1981, 320 p. (In Russian)
7. Drozd A., Kharchenko V., Antoshchuk S., Sulima J. et al. Checkability of the Digital Components in Safety-Critical Systems: Problems and Solutions. *Proceedings of 9th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDS'2011)*, Sevastopol, Ukraine, 2011, pp. 411–416.
8. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. *Diskretnye avtomaty s obnaruzheniem otkazov* [Discrete automata with fault detection]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1984, 112 p. (In Russian)
9. Sogomonyan E. S., Slabakov E. V. *Samoproveryaemye ustroystva i otkazoustoychivyye sistemy* [Self-testing devices and fault-tolerant systems]. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1989, 208 p. (In Russian)
10. Juracy L. R., Moreira M. T., Kuentzer F. A., Amory A. M. Optimized Design of an LSSD Scan Cell. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2017, vol. 25, Iss. 2, pp. 765–768.
11. Mitra S., McCluskey E. J. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? *Proceedings of International Test Conference, USA, Atlantic City, NJ, 2000*, pp. 985–994.
12. Chioktour V., Kakarountas A. Adaptive BIST for Concurrent On-Line Testing on Combinational Circuits. *Electronics*, 2022, vol. 19, Iss. 11, pp. 1–20.
13. Sahana A. R., Chiraag V., Suresh G., Thejaswini P. et al. Application of Error Detection and Correction Techniques to Self-Checking VLSI Systems: An Overview. *Proceedings of 2023 IEEE Guwahati Subsection Conference (GCN)*, Guwahati, 2023.

14. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V. *Kody s summirovaniem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. Tom 1: Klassicheskie kody Bergera i ikh modifikatsii* [Summation codes for technical diagnostic systems. Vol. 1: Classical Berger codes and their modifications]. Moscow: Nauka Publ., 2020, 383 p. (In Russian)
15. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V. *Kody s summirovaniem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. Tom 2: Vzvshennyye kody s summirovaniem* [Summation codes for technical diagnostic systems. Vol. 2: Weighted summation codes]. Moscow: Nauka Publ., 2021, 455 p. (In Russian)
16. Sagalovich Yu. L., Solomennikov V. Yu. Obnaruzhenie neispravnostey v skhemoy realizatsii sistema monotonnykh bulevykh funktsiy [Fault detection in circuit implementation of monotone Boolean function system]. *Problemy peredachi informatsii* [Problems of Information Transmission]. 1997, vol. 33, Iss. 2, pp. 81–93. (In Russian)
17. Dmitriev A., Sapozhnikov V., Sapozhnikov V., Goessel M. New Self-Dual Circuits for Error Detection and Testing. *VLSI Design*, 2000, vol. 11, Iss. 1, pp. 1–21.
18. Matrosova A. Yu., Levin I., Ostaniin S. A. Self-Checking Synchronous FSM Network Design with Low Overhead. *VLSI Design*, 2000, vol. 11, Iss. 1, pp. 47–58.
19. Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. New Methods of Concurrent Checking. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., 2008, 184 p.
20. Yablonskiy S. V., ed. Sadovnicheva V. A. *Vvedenie v diskretnuyu matematiku* [Introduction to discrete mathematics]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2003, 384 p. (In Russian)
21. Sapozhnikov V. I., Dmitriev A., Goessel M., Sapozhnikov V. V. Self-Dual Parity Checking — a New Method for on Line Testing. Proceedings of 14th IEEE VLSI Test Symposium, Princeton, USA, 1996, pp. 162–168.
22. Gessel M., Dmitriev A. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. Samotestiruemyaya struktura dlya funktsional'nogo obnaruzheniya otkazov v kombinatsionnykh skhemakh [Self-testing structure for functional fault detection in combinational circuits]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 1999, Iss. 11, pp. 162–174. (In Russian)
23. Sogomonyan E. S. Postroenie samoproveryaemykh skhem vstroennogo kontrolya dlya kombinatsionnykh ustroystv [Design of self-testing built-in control circuits for combinational devices]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 1974, Iss. 2, pp. 121–133. (In Russian)
24. Aksenova G. P., Sogomonyan E. S. Postroenie samoproveryaemykh skhem vstroennogo kontrolya dlya avtomatov s pamyat'yu [Design of self-testing built-in control circuits for memory automata]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 1975, Iss. 7, pp. 132–142. (In Russian)
25. Efanov D. V., Pivovarov D. V. Testery samodvoystvennykh i "blizkikh" k nim signalov [Testers of self-dual and "close" signals]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Higher Education News. Instrumentation]. 2024, vol. 67, Iss. 1, pp. 5–19. (In Russian)
26. Aksenova G. P. Vosstanovlenie v dublirovannykh ustroystvakh metodom invertirovaniya dannykh [Recovery in duplicated devices using data inversion method]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 1987, Iss. 10, pp. 144–153. (In Russian)
27. Gessel M., Moshanin V. I., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. Obnaruzhenie neispravnostey v samoproveryaemykh kombinatsionnykh skhemakh s ispol'zovaniem svoystv samodvoystvennykh funktsiy [Fault detection in self-testing combinational circuits using properties of self-dual functions]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 1997, Iss. 12, pp. 193–200. (In Russian)
28. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Gessel M. *Samodvoystvennye diskretnyye ustroystva* [Self-dual discrete devices]. Saint Petersburg: Energoatomizdat Publ., 2001, 331 p. (In Russian)
29. Efanov D. V. Osobennosti realizatsii samoproveryaemykh struktur na osnove metoda invertirovaniya dannykh i lineynykh kodov [Features of implementation of self-testing structures based on data inversion and linear codes]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Tomsk State University Journal. Control, Computer Engineering and Informatics]. 2023, Iss. 65, pp. 126–138. (In Russian)
30. Efanov D. V., Pogodina T. S. Issledovanie svoystv samodvoystvennykh kombinatsionnykh ustroystv s kontrolem vychisleniya na osnove kodov Khemminga [Study of Properties of Self-Dual Combinational Devices with Computation Control Based on Hamming Codes]. *Informatika i avtomatizatsiya* [Computer Science and Automation]. 2023, vol. 22, Iss. 2, pp. 349–392. (In Russian)
31. Lala P. K. *Self-Checking and Fault-Tolerant Digital Design*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001, 216 p.
32. Aksenova G. P. Neobkhodimyye dostatochnyye usloviya postroyeniya polnost'yu proveryaemykh skhem svertki po modulyu 2 [Necessary and Sufficient Conditions for Constructing Fully Verifiable Modulo-2 Convolution Circuits]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics]. 1979, Iss. 9, pp. 126–135. (In Russian)
33. Pospelov D. A. *Logicheskie metody analiza i sinteza skhem* [Logical methods of analysis and synthesis of circuits]. Moscow: Energiya Publ., 1968, 328 p. (In Russian)
34. Zakrevskiy A. D., Pottosin Yu. V., Cheremisina L. D. *Logicheskie osnovy proektirovaniya diskretnykh ustroystv* [Logical foundations of designing discrete devices]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2007, 592 p. (In Russian)
35. Efanov D. V. Osobennosti ispol'zovaniya kodov Khemminga pri sinteze samoproveryaemykh tsifrovyykh ustroystv na osnove metoda invertirovaniya dannykh [Features of using Hamming codes in the synthesis of self-checking digital devices based on the data inversion method]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [News of higher educational institutions. Electronics]. 2024, vol. 29, Iss. 3, pp. 379–392. (In Russian)
36. Efanov D. V., Pogodina T. S. Samodvoystvennye tsifrovyye ustroystva s kontrolem vychisleniya po kodam Syao. [Self-dual digital devices with computation control using Xiao codes]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Bulletin of Tomsk State University. Management, computing engineering and informatics]. 2023, Iss. 63, pp. 118–136. (In Russian)
37. Efanov D. V., Pivovarov D. V. Sintez samoproveryaemykh diskretnykh ustroystv na osnove polinomial'nykh kodov s kontrolem vychisleniya po neskol'kim diagnosticheskim priznakam [Synthesis of self-checking discrete devices based on polynomial codes with computation control using several diagnostic features]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics]. 2025, Iss. 5, pp. 39–60. (In Russian)
38. Shalyto A. A. *Logicheskoe upravlenie. Metody apparatnoy i programnoy realizatsii* [Logical control. Methods of hardware and software implementation]. Saint Petersburg: Nauka Publ., 2000, 780 p. (In Russian)
39. Shalyto A. A. Moduli, universal'nye v klasse samodvoystvennykh funktsiy i v "blizkikh" k nim klassakh [Modules that are universal in the class of self-dual functions and in classes "close" to them]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Control Theory and Systems]. 2001, Iss. 5, pp. 110–120. (In Russian)

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования**

**«Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I»**

**ОБЪЯВЛЯЕТ
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ НАБОР
В ДОКТОРАНТУРУ**

**Прием документов осуществляется
с 15 августа 2025 года по 10 октября 2025 года
по адресу: Санкт–Петербург, Московский пр., д. 9, ауд. 7–214**

**Об условиях приема можно узнать:
на официальном сайте ФГБОУ ВО ПГУПС:
<https://www.pgups.ru/>**

по электронной почте: uchsov@pgups.ru