



Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

АВТОМАТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH

Том 11 Март 2025 № 1



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

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

База данных	Ссылка	QR-код
	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 06.03.2025. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 12,75. Тираж 200 экз. Заказ 0000. 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 Khristov	D. Sc., Professor, Technical University, Sofia, Bulgaria

EDITORIAL BOARD

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

Научно-технический журнал «Автоматика на транспорте»	СОДЕРЖАНИЕ
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>Баранов Л. А., Иванова Н. Д., Михалевич И. Ф.</i> Моделирование и оценка рисков безопасности интеллектуальных систем водного транспорта.....7
Издатель ООО «Издательский Центр «РИОР» по договору № ЭА78751 от 28.12.2024	ЭЛЕКТРОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ <i>Кудюкин В. В., Вуколов А. В., Кузьмин В. С.</i> Имитационное моделирование работы робототехнических комплексов, предназначенных для расформирования составов на сортировочных горках 16
Главный редактор А. Б. Никитин, д-р техн. наук, профессор ПГУПС	<i>Куверин И. Ю., Гусева И. А., Гусев С. А.</i> Аналитическая модель расчета скорости начала аквапланирования в алгоритмах беспилотного управления 30
Редакция журнала Научный редактор — И. В. Кушпиль, канд. техн. наук Перевод — И. Л. Лютомская Литературный редактор и корректор — О. Ю. Рогожина Верстка — И. Г. Иваньшина	МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА В ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ <i>Сидоренко В. Г., Кулагин М. А., Родина Д. М.</i> Интеллектуальная система обнаружения нарушений в соблюдении требований безопасности при работах на объектах железнодорожной инфраструктуры 55
Адрес учредителя 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	ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ СИСТЕМЫ <i>Сперанский Д. В., Лунев С. А.</i> Построение обнаруживающих тестов для нечетких автоматов 66
Адрес издателя 127214, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1, оф. 402	<i>Ефанов Д. В.</i> Конечные автоматы с самоконтролем на основе взвешенных кодов с суммированием и свойств самоквазидвойственных булевых функций 75
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>Baranov L. A., Ivanova N. D., Mikhalevich I. F.</i> Modeling and Assessment of Security Risks of Intelligent Water Transport Systems.....7
PUBLISHER "Publishing Center "RIOR", LLC № 78751, 28.12.2024	ELECTRONIC SIMULATION <i>Kudyukin V. V., Vukolov A. V., Kuz`min V. S.</i> Simulation Modeling of the Robotic System Operations Designed for Parallel Train Break-Up on Automated Humps 16
EDITOR-IN-CHIEF Nikitin A. B., Doctor in Engineering, Professor	<i>Kuverin I. Yu., Guseva I. A., Gusev S. A.</i> Analytical Model for Calculating the Speed at Starting Hydroplaning in Unmanned Control Algorithms 30
JOURNAL STAFF Science editor: Igor V. Kushpil, Ph. D. English translation: Irina L. Liutomaskaia. Editing and proofreading: Olga Yu. Rogozhina Layout: Irina G. Ivanshina	MONITORING METHODS IN TRANSPORT <i>Sidorenko V. G., Kulagin M. A., Rodina D. M.</i> Intelligent System Detecting Safety Requirements Violation in Railway Infrastructure Maintenance 55
FOUNDER'S 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	TECHNICAL DIAGNOSTICS AND CONTROLLABLE SYSTEMS <i>Speranskiy D. V., Lunev S. A.</i> Construction of Detection Tests for Fuzzy Automata 66 <i>Efanov D. V.</i> Self-Checking Finite State Machines Based on Weight-Based Sum Codes and Properties of Self-Quasidual Boolean Functions..... 75
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	

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА РИСКОВ БЕЗОПАСНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

БАРАНОВ Леонид Аврамович, д-р техн. наук, зав. кафедрой; e-mail: baranov.miit@gmail.com
ИВАНОВА Нина Дмитриевна, аспирант; e-mail: ivanovand.nina@yandex.ru
МИХАЛЕВИЧ Игорь Феодосьевич, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник;
e-mail: mif-orel@mail.ru

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

В статье представлен цифровой испытательный стенд анализа безопасности объектов интеллектуальных систем водного транспорта, в составе которого реализованы цифровые модели автоматизированной системы управления движением судна, подсистем глобальной навигационной спутниковой системы и электронной картографической навигационно-информационной системы, системы гибридного управления безопасностью объекта, телекоммуникационного оборудования, нарушителя информационной безопасности объекта. Рассмотрены алгоритмы оценки риска системой гибридного управления безопасностью, позволяющие выявлять актуальные для объектов угрозы, вырабатывать меры реагирования и принимать обоснованные решения о необходимости их реализации. Показаны особенности, связанные с совместным использованием количественных оценок уязвимостей компонентов компьютеризированных систем, полученных на основе базовых метрик общего назначения, и нечетких экспертных оценок состава и значений лингвистических переменных риска, полученных для конкретных условий функционирования объектов. Указано, что предложенные модели и алгоритмы гибридного управления безопасностью обеспечивают решение задач по автоматизированному поиску и выработке эффективных решений обеспечения безопасности объектов интеллектуальных систем водного транспорта на различных этапах их жизненного цикла.

Ключевые слова: агрегирование информации; безопасность; гибридное управление; информационная безопасность; компьютеризированная система; лингвистическая переменная; нечеткая оценка; риск; угроза; уязвимость; цифровой испытательный стенд; CVSS.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-07-15

▼ Введение

Обеспечение безопасности интеллектуальных систем водного транспорта (ИСВТ) является актуальной задачей. Интеграция, высокие темпы внедрения и уязвимости информационных, телематических и телекоммуникационных технологий [1–3], технологий искусственного интеллекта [4–6] и связи [7–9] влекут появление новых типов угроз безопасности ИСВТ [10, 11].

Автоматизированные системы корпоративного и технологического управления ИСВТ входят в состав объектов критической информационной инфраструктуры страны, что накладывает на ИСВТ высокие требования безопасности.

В целях решения задач обеспечения требуемого уровня безопасности ИСВТ в статье рассмотрены вопросы развития средств и методов управления рисками [12, 13]. Предложенные

решения реализованы на цифровом испытательном стенде (ЦИС), в составе которого функционирует система гибридного управления безопасностью (ГУБ), содержащая подсистему оценки рисков [14].

1. Цифровой испытательный стенд анализа информационной безопасности объектов ИСВТ

В зависимости от решаемых задач ЦИС позволяет создавать различные конфигурации. На рис. 1 приведена конфигурация ЦИС, развернутого для решения задач управления рисками информационной безопасности объектов ИСВТ.

В состав ЦИС включены цифровые модели автоматизированной системы управления движением (АСУД) судна, подсистем глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) и электронной картографической

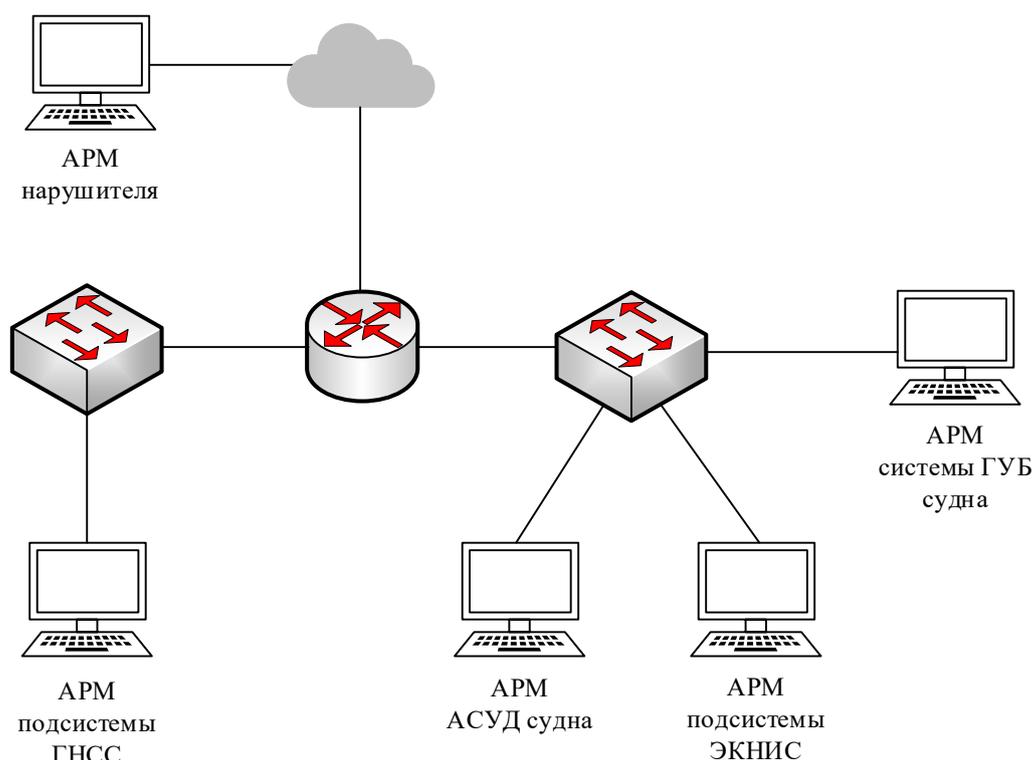


Рис. 1. Цифровой испытательный стенд анализа информационной безопасности объектов ИСВТ

навигационно-информационной системы (ЭКНИС), системы ГУБ судна, телекоммуникационного оборудования ЛВС, автоматизированного рабочего места (АРМ) нарушителя информационной безопасности объекта ИСВТ.

На АРМ ГУБ выполняется алгоритм, разработанный на основе [14, 15].

Шаг 1. Получение экспертами инвентаризационных данных об объекте ИСВТ (с учетом [16, 17]).

Инвентаризационными данными являются сведения об используемых на объекте технологиях, аппаратно-программных платформах, программном обеспечении, аппаратных средствах, средствах защиты и других компьютеризированных систем (КС), их производителях, наименованиях, модификациях, версиях, настройках и т.п.

Шаг 2. Экспертное описание объекта ИСВТ как объекта защиты (с учетом [18, 19]).

Шаг 3. Построение модели системы оценки угроз безопасности объекта ИСВТ как нечеткой иерархической системы агрегирования информации о состоянии объекта и его уязвимостях (с учетом [20, 21]).

В ISO/IEC 27005:2022 уязвимость определена как слабость актива или элемента управления, которая может быть использована для возникновения события с негативными последствиями.

Шаг 4. Непрерывный автоматический мониторинг состояния объекта ИСВТ, относимых к объекту угроз безопасности и индикация обнаружения угроз.

Шаг 5. Если угроза не обнаружена, возврат к шагу 4. При обнаружении угрозы — переход на шаг 6.

Шаг 6. Выполнение алгоритма нечеткой оценки риска, связанного с обнаруженной угрозой, вычисление значения риска.

Шаг 7. Принятие экспертом решения в отношении риска, связанного с обнаруженной угрозой.

В случае признания значения риска приемлемым обнаруженная угроза игнорируется, в противном случае эксперт инициирует переход на шаг 8.

Шаг 8. Автоматическая выработка мер реагирования.

Шаг 9. Принятие экспертом решения в отношении предлагаемых мер реагирования.

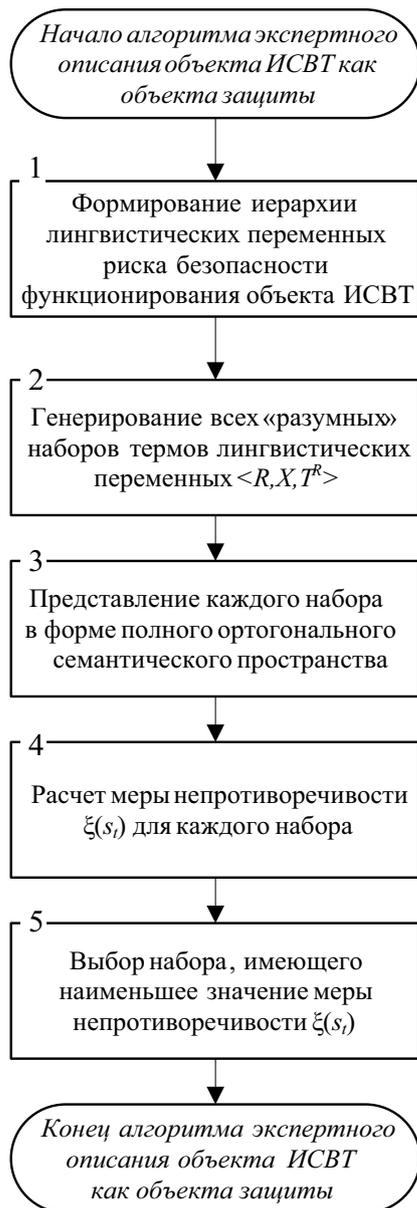


Рис. 2. Алгоритм формирования данных для ГУБ объектов

Эксперт инициирует переход алгоритма ГУБ на шаг 10 в случае признания мер неприемлемыми, на шаг 11 — при приемлемости мер.

Шаг 10. Эксперт оформляет замечания и рекомендации по предложенным мерам реагирования на обнаруженную угрозу безопасности функционирования объекта ИСВТ, возвращает алгоритм ГУБ на шаг 8.

Шаг 11. Выполняются мероприятия по реализации выработанных мер реагирования на обнаруженную угрозу безопасности функционирования объекта ИСВТ.

Шаг 12. Выполняется обновление инвентаризационных данных об объекте ИСВТ.

Алгоритм ГУБ функционирования объекта ИСВТ возвращается к шагу 1.

Примечание. Во время выполнения алгоритма ГУБ процедуры, предусмотренные шагом 4, не прерываются.

Алгоритм ГУБ обеспечивает обнаружение актуальных для объекта угроз, выработку и реализацию мер реагирования.

Алгоритм, реализующий процедуры, предусмотренные на шаге 2 вышеописанного алгоритма ГУБ, приведен на рис. 2.

Эксперты определяют состав лингвистических переменных (ЛП) — R , возможные значения ЛП — X , и наборы терм-множеств ЛП — T^R . Так, в [14] ЛП «Риск» может принимать значения: VL — «Очень низкий»; L — «Низкий»; M — «Средний»; H — «Высокий», VH — «Очень высокий». В этом случае терм-множество ЛП R представляется в виде: $T^R = \{t_i^R\}, i = VL, L, M, H, VH$.

Каждый терм образует нечеткое множество. Функция принадлежности терма к нечеткому множеству является характеристической (индикаторной) функцией четкого множества. Для рассмотренного выше случая функции принадлежности $\mu^{t_i^R}(x)$ устанавливают соответствие между элементами универсального множества X и числовыми значениями степени их принадлежности термам $\{t_i^R\}, i = VL, L, M, H, VH$, на отрезке $[0; 1]$. Так, значение функции принадлежности $\mu^{t_H^R}(x)$ для некоторого элемента $x \in X$ показывает, в какой степени значение x соответствует терму H — «Высокий».

Алгоритм оценки риска системой ГУБ объекта ИСВТ приведен на рис. 3.

Рассмотрим реализацию данного алгоритма на ЦИС анализа безопасности объектов ИСВТ.

2. Реализация алгоритма оценки риска системой ГУБ объекта ИСВТ

На шаге 1 алгоритма (рис. 3) экспертами определяется состав индикаторов, на основе которого создается модель агрегирования информации о рисках безопасности объекта ИСВТ. Пример модели приведен на рис. 4.

В моделях агрегирования информации каждая вершина описывает риски, а концевые вершины (обозначены пунктирной линией) являются также индикаторами наличия рисков.

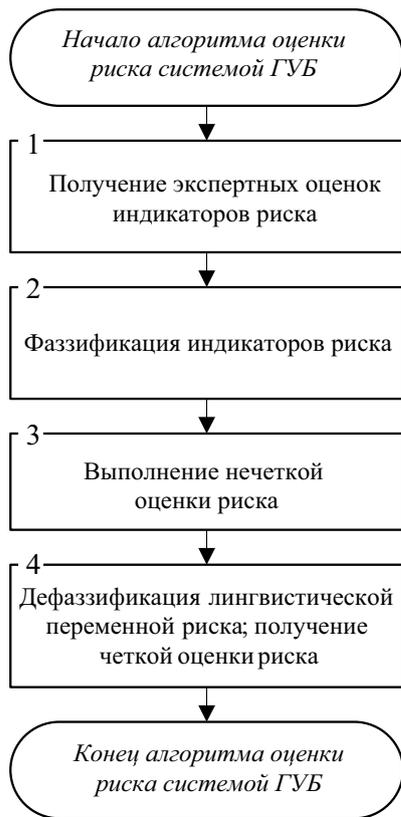


Рис. 3. Алгоритм оценки риска системой ГУБ

Каждый индикатор содержит наименование ЛП и ее оценку. С помощью индикаторов задаются исходные данные для определения совокупного (итогового) значения величины риска.

Включение в модель индикаторов связано с появлением (выявлением) уязвимостей КС объекта ИСВТ. Для этого проводится мониторинг

открытых источников, инструментальный и экспертный анализ состояния КС (активов) объекта ИСВТ. Пример выявления уязвимостей КС объекта ИСВТ инструментальными средствами АРМ системы ГУБ (см. рис. 1) приведен на рис. 5.

Для четкой и нечеткой базовой оценки уязвимостей используются метрики общей системы оценки CVSS (Common Vulnerability Scoring System¹) и BDU банков данных угроз безопасности информации и АСУ ТП ФСТЭК России^{2,3}. Группа базовых метрик CVSS и BDU учитывает характеристики уязвимостей в системе триады критериев безопасности информации (конфиденциальность, целостность, доступность) и определяет уровень опасности уязвимости в диапазоне значений от 0.0 до 10.0.

Каждой известной уязвимости присваивается идентификатор CVE (Common Vulnerabilities and Exposures⁴) и дается описание, содержащее оценку риска, год обнаружения и ее порядковый номер в этом году.

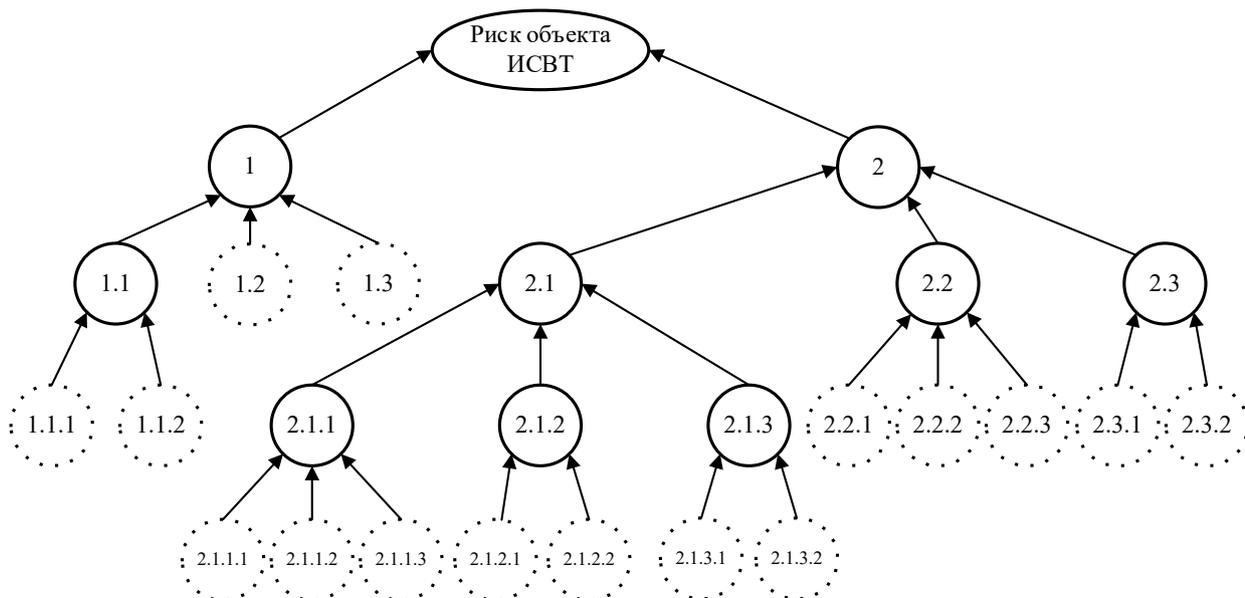


Рис. 4. Модель агрегирования информации о рисках безопасности объекта ИСВТ

¹ Common Vulnerability Scoring System: Specification Document. – URL: <https://www.first.org/cvss/specification-document>.

² Банк данных угроз безопасности информации. – URL: <https://bdu.fstec.ru/vul>.

³ Банк данных угроз АСУ ТП. – URL: <https://bduasutp.fstec.ru/#/vulnerabilities>.

⁴ CVE® Program Mission. – URL: <https://www.cve.org/>.

```

home > admin-vs > Desktops > Desktop1 > scanner > scanning_SAUS.txt
27156 | [CVE-2017-5019] A use after free in Google Chrome prior to 56.0.2924.76 for Linux, Windows and Mac, and
      | 56.0.2924.87 for Android, allowed a remote attacker to potentially exploit heap corruption via a crafted
      | HTML page.
27157 | [CVE-2017-0263] The kernel-mode drivers in Microsoft Windows Server 2008 SP2 and R2 SP1, Windows 7 SP1,
      | Windows 8.1, Windows Server 2012 Gold and R2, Windows RT 8.1, Windows 10 Gold, 1511, 1607, 1703, and
      | Windows Server 2016 allow local users to gain privileges via a crafted application, aka "Win32k Elevation
      | of Privilege Vulnerability."
27158 | [CVE-2016-0196] The kernel-mode drivers in Microsoft Windows Vista SP2, Windows Server 2008 SP2 and R2
      | SP1, Windows 7 SP1, Windows 8.1, Windows Server 2012 Gold and R2, Windows RT 8.1, and Windows 10 Gold and
      | 1511 allow local users to gain privileges via a crafted application, aka "Win32k Elevation of Privilege
      | Vulnerability," a different vulnerability than CVE-2016-0171, CVE-2016-0173, and CVE-2016-0174.
27159 | [CVE-2016-0174] The kernel-mode drivers in Microsoft Windows Vista SP2, Windows Server 2008 SP2 and R2
      | SP1, Windows 7 SP1, Windows 8.1, Windows Server 2012 Gold and R2, Windows RT 8.1, and Windows 10 Gold and
      | 1511 allow local users to gain privileges via a crafted application, aka "Win32k Elevation of Privilege
      | Vulnerability," a different vulnerability than CVE-2016-0171, CVE-2016-0173, and CVE-2016-0196.
27160 | [CVE-2016-0171] The kernel-mode drivers in Microsoft Windows Vista SP2, Windows Server 2008 SP2 and R2
      | SP1, Windows 7 SP1, Windows 8.1, Windows Server 2012 Gold and R2, Windows RT 8.1, and Windows 10 Gold and
      | 1511 allow local users to gain privileges via a crafted application, aka "Win32k Elevation of Privilege
      | Vulnerability," a different vulnerability than CVE-2016-0173, CVE-2016-0174, and CVE-2016-0196.
27161 | [CVE-2016-0016] Microsoft Windows Vista SP2, Windows Server 2008 SP2 and R2 SP1, Windows 7 SP1, Windows
      | 8, Windows 8.1, Windows Server 2012 Gold and R2, Windows RT Gold and 8.1, and Windows 10 Gold and 1511
      | mishandle DLL loading, which allows local users to gain privileges via a crafted application, aka "DLL
      | Loading Remote Code Execution Vulnerability."
27162 | [CVE-2015-2519] Integer overflow in Windows Journal in Microsoft Windows Vista SP2, Windows Server 2008
      | SP2 and R2 SP1, Windows 7 SP1, Windows 8, Windows 8.1, Windows Server 2012 Gold and R2, Windows RT Gold
      | and 8.1, and Windows 10 allows remote attackers to execute arbitrary code via a crafted .jnt file, aka
      | "Windows Journal Integer Overflow RCE Vulnerability."

```

Рис. 5. Результат сканирования КС АРМ АСУД судна на наличие уязвимостей

Как видно из рис. 5, на АРМ АСУД судна были выявлены уязвимости.

Дальнейшее выполнение алгоритма оценки риска системой ГУБ объекта ИСВТ рассмотрим на примере уязвимости с идентификатором CVE-2017-5019. В Российской Федерации ей присвоен идентификатор BDU:2017-00382⁵ и дано следующее описание: «Уязвимость браузера Google Chrome связана с использованием памяти после ее освобождения. Эксплуатация уязвимости может позволить нарушителю, действующему удаленно, получить доступ к защищаемой информации при помощи специально сформированной HTML страницы».

Уязвимости BDU:2017-00382 присвоен средний уровень опасности, базовая оценка уязвимости составляет 6.8 по версии CVSS 2.0⁶.

Отметим, что базовые оценки CVSS не связаны с условиями функционирования конкретных объектов. В системе ГУБ они используются экспертами для присвоения индикаторам риска значений, актуальных для объекта ИСВТ. Результаты присвоения значений индикаторам

(ЛП) экспертами, оценившими влияние рассматриваемой уязвимости на безопасность объекта ИСВТ, приведены в таблице.

Шаги 2–4 алгоритма (рис. 3) подробно изложены в [14], в связи с чем их описание приведем кратко.

На шаге 2 значения индикаторов риска нормализуются и проходят процедуру фаззификации, устанавливающую соответствие между четкими значениям входных переменных и нечеткими лингвистическими термами.

На шаге 3 выполняется нечеткая оценка состояний вышестоящий вершин на основе известных состояний нижестоящих вершин с применением операторов агрегирования информации.

На шаге 4 происходит дефаззификация нечетких значений и вычисление четкого (числового) значения риска в области определения от 0 до 1.

Результаты выполнения на АРМ системы ГУБ алгоритма оценки рисков безопасности объекта ИСВТ приведены на рис. 6.

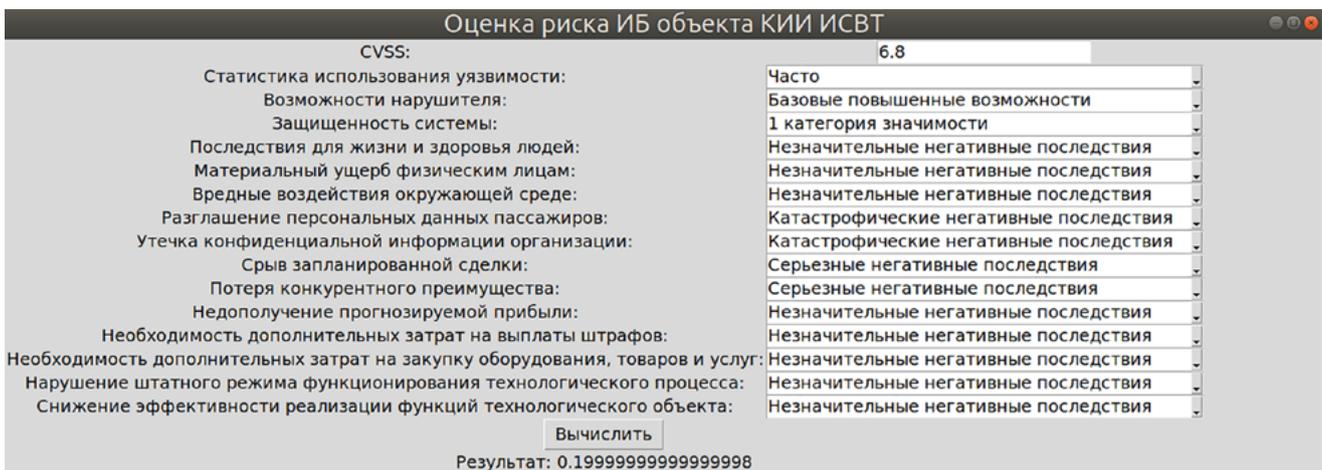
Итоговое значение величины риска определяется путем свертки четких (числовых) и нечетких (лингвистических) значений показателей частных критериев риска (табл.) с использованием рассмотренного алгоритма (рис. 3) и методики, приведенной в [14].

⁵ BDU:2017-00382: Уязвимость браузера Google Chrome, позволяющая нарушителю получить доступ к защищаемой информации. – URL: <https://bdu.fstec.ru/vul/2017-00382>.

⁶ CVE-2017-5019 Detail. – URL: <https://nvd.nist.gov/vuln/detail/CVE-2017-5019>.

Значения индикаторов модели агрегирования информации о рисках безопасности объекта ИСВТ в отношении уязвимости BDU:2017-00382

Характеристики индикаторов модели агрегирования информации		
Код	Наименование индикатора (ЛП)	Значение индикатора (ЛП)
1.1.1	Оценка уязвимости CVSS	6.8
1.1.2	Статистика использования уязвимости	Часто
1.2	Возможности нарушителя, достаточные для использования уязвимости	Базовые повышенные
1.3	Защищенность системы	1 категория значимости
2.1.1.1	Последствия для жизни и здоровья людей	Незначительные
2.1.1.2	Материальный ущерб физическим лицам	Незначительные
2.1.1.3	Вредные воздействия окружающей среде	Незначительные
2.1.2.1	Разглашение персональных данных пассажиров	Катастрофические
2.1.2.2	Утечка конфиденциальной информации организации	Катастрофические
2.1.3.1	Срыв запланированной сделки	Серьезные
2.1.3.2	Потеря конкурентного преимущества	Серьезные
2.2.1	Недополучение прогнозируемой прибыли	Незначительные
2.2.2	Необходимость дополнительных затрат на выплаты штрафов	Незначительные
2.2.3	Необходимость дополнительных затрат на закупку оборудования, товаров и услуг	Незначительные
2.3.1	Нарушение штатного режима функционирования технологического процесса	Незначительные
2.3.2	Снижение эффективности реализации функций технологического объекта	Незначительные



```
In [5]: risk_assesment(6.8, 'Часто', 'Базовые повышенные возможности', '1 категория значимости',
    'Незначительные негативные последствия', 'Незначительные негативные последствия',
    'Катастрофические негативные последствия', 'Катастрофические негативные последств
    'Серьезные негативные последствия', 'Серьезные негативные последствия',
    'Незначительные негативные последствия', 'Незначительные негативные последствия',
    'Незначительные негативные последствия', 'Незначительные негативные последствия')
0.19999999999999998
Out[5]: 0.19999999999999998
```

Рис. 6. Окна ввода исходных данных и вычисления значения величины риска безопасности объекта ИСВТ в отношении уязвимости BDU:2017-00382

Риск нарушения безопасности объекта ИСВТ для условий, описанных в таблице, составил значение 0,199.

Отметим, что итоговая оценка риска безопасности конкретного объекта защиты оказалась значительно ниже базовой оценки по CVSS. Это означает, что установленные системой базовых метрик оценки уязвимостей фактически не имеют отношения к объекту ИСВТ и оперативные меры по устранению уязвимости не требуются.

В отношении других уязвимостей КС объекта ИСВТ на ЦИС были получены оценки как близкие, так и значительно превышающие базовые оценки по CVSS. В последнем случае это означает, что на объекте необходимо оперативно разрабатывать меры по устранению уязвимости, дополнительно к мерам, предусмотренным в БДУ ФСТЭК.

Заключение

В результате выполненных работ создан цифровой испытательный стенд. Развернутая в его составе система гибридного управления позволяет выявлять актуальные для объекта ИСВТ угрозы, вырабатывать меры реагирования и принимать обоснованные решения о необходимости их реализации.

Выполненные на стенде эксперименты показали, что базовые оценки уязвимостей по CVSS не являются абсолютными. Они не учитывают особенности объектов, на которых может использоваться уязвимый компонент (система). Значение величины риска (уровня опасности уязвимости) на конкретном объекте может быть как ниже, так и выше значения базовой оценки по CVSS. Это связано с методикой базовой оценки CVSS на основе триады критериев безопасности (конфиденциальность, целостность, доступность), в то время как вклад показателя конфиденциальность, например, применительно к конкретному объекту ИСВТ, может не иметь смысла и должен быть нивелирован.

Предложенные модели и алгоритмы гибридного управления безопасностью обеспечивают решение задач по автоматизированному поиску и выработке эффективных решений обеспечения безопасности объектов ИСВТ на различных этапах их жизненного цикла. ▲

Список источников

1. Розенберг И. Н. Методы и алгоритмы создания интеллектуальных геоинформационных систем для управления транспортными процессами / И. Н. Розенберг, С. Л. Беляков, А. В. Боженок [и др.]; под ред. И. Н. Розенберга. — М.: ВИНТИ РАН, 2019. — 289 с.
2. Pundir A. Cyber-Physical Systems Enabled Transport Networks in Smart Cities: Challenges and Enabling Technologies of the New Mobility Era / A. Pundir, S. Singh, M. Kumar, A. Bafila, G. J. Saxena // IEEE Access. — January, 2022. — Vol. 10. — Pp. 16350–16364. — DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3147323.
3. Kul'ba V. V. A Comprehensive Software Verification Technology for Onboard Control Systems of Spacecraft / V.V. Kul'ba, E.A. Mikrin, B.V. Pavlov, S.K. Somov // Automation and Remote Control. — 2023. — Vol. 84. — № 10. — Pp. 1047–1054. — DOI: 10.1134/S0005117923100065.
4. Kurek W. Explainable Artificial Intelligence 101: Techniques, Applications and Challenges / W. Kurek, M. Pawlicki, A. Pawlicka, R. Kozik, M. Choraś // Advanced Intelligent Computing Technology and Applications. — 2023. — Pp. 310–318. — DOI: 10.1007/978-981-99-4752-26.
5. Walter M. J. A Red Teaming Framework for Securing AI in Maritime Autonomous Systems / M. J. Walter, A. Barrett, K. Tam // Applied Artificial Intelligence. — 2024. — Vol. 38(1). — DOI: 10.1080/08839514.2024.2395750.
6. Sai S. Generative AI for Cyber Security: Analyzing the Potential of ChatGPT, DALL-E, and Other Models for Enhancing the Security Space / S. Sai, U. Yashvardhan, V. Chamola, B. Sikdar // IEEE Access. — 2024. — Vol. 12. — Pp. 53497–53516. — DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3385107.
7. Moya Osorio D. P. Towards 6G-Enabled Internet of Vehicles: Security and Privacy / D. P. Moya Osorio, I. Ahmad, J. D. Vega Sanchez, A. Gurtov, J. Scholliers, M. Kutilla, P. Porambage // IEEE Open Journal of the Communications Society. — 2022. — Vol. 3. — Pp. 82–105. — DOI: 10.1109/OJCOMS.2022.3143098.
8. Shrestha R. 6G Enabled Unmanned Aerial Vehicle Traffic Management: A Perspective / R. Shrestha, R. Bajracharya, S. Kim // IEEE Access. — 2021. — Vol. 9. — Pp. 91119–91136. — DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3092039.
9. Khan S. K. Security assessment in Vehicle-to-Everything communications with the integration of 5G and 6G networks / S. K. Khan, N. Shiwakoti, P. Stasinopoulos, M. Warren // 2021 International Symposium on Computer Science and Intelligent Controls (ISCSIC). — Rome, Italy, 2021. — Pp. 154–158. — DOI: 10.1109/ISCSIC54682.2021.00037.
10. Михалевич И. Ф. Концептуальные проблемы транспортной безопасности водных интеллектуальных транспортных систем / И. Ф. Михалевич // Надежность. — 2024. —

- № 24(2) — С. 72–87. — DOI: 10.21683/1729-2646-2024-24-2-72-87.
11. Михалевич И. Ф. Проблемы обеспечения безопасности автономного судоходства на внутренних водных путях: монография / И. Ф. Михалевич. — М.: Горячая линия – Телеком, 2024. — 336 с.
 12. Попов П. А. Комплексная безопасность АСУТП объектов КИИ железнодорожного транспорта / П. А. Попов, Е. Н. Розенберг, А. Г. Сабанов, И. Б. Шубинский // Надежность. — 2024. — № 24(4). — С. 48–57. — DOI: 10.21683/1729-2646-2024-24-4-48-57.
 13. Шубинский И. Б. Надежность, риски, безопасность систем управления на железнодорожном транспорте: монография / И. Б. Шубинский, Е. Н. Розенберг, А. В. Бочков. — М.; Вологда: Инфра – Инженерия, 2024. — 416 с.
 14. Баранов Л. А. Нечеткая система оценки рисков информационной безопасности интеллектуальных систем водного транспорта / Л. А. Баранов, Н. Д. Иванова, И. Ф. Михалевич // Автоматика на транспорте. — 2024. — Т. 10. — № 1. — С. 7–17. — DOI 10.20295/2412-9186-2024-10-01-7-17.
 15. Ryjov A. P. Hybrid intelligence framework for improvement of information security of critical infrastructures / A. P. Ryjov, I. F. Mikhalevich // Handbook of Research on Cyber Crime and Information Privacy. — Hershey, PA, US, 2021. — DOI: 10.4018/978-1-7998-5728-0.ch016.
 16. Tam K. MaCRA: a model-based framework for maritime cyber-risk assessment / K. Tam, K. Jones // WMU J Marit Affairs. — 2019. — Vol. 18. — Pp. 129–163. — DOI: 10.1007/s13437-019-00162-2.
 17. Kharchenko V. AI Cybersecurity Assurance for Autonomous Transport Systems: Scenario, Model, and IMECA-Based Analysis / V. Kharchenko, O. Illiashenko, H. Fesenko, I. Babeshko // Communications in Computer and Information Science. — 2022. — Vol. 1689. — Pp. 66–79. — DOI: 10.1007/978-3-031-20215-5_6.
 18. Amro A. Cyber risk management for autonomous passenger ships using threat-informed defense-in-depth / A. Amro, V. Gkioulos // International Journal of Information Security. — 2023. — Vol. 22. — Pp. 249–288. — DOI: 10.1007/s10207-022-00638-y.
 19. Kavallieratos G. Managing Cyber Security Risks of the Cyber-Enabled Ship / G. Kavallieratos, S. Katsikas // Journal of Marine Science and Engineering. — 2020. — № 8 (768). — 19 p. — DOI: 10.3390/jmse8100768.
 20. Kerimkhulle S. Fuzzy Logic and Its Application in the Assessment of Information Security Risk of Industrial Internet of Things / S. Kerimkhulle, Z. Dildebayeva, F. Tokhmetov, A. Amirova, J. Tussupov, U. Makhazhanova, A. Adalbek, R. Taberkhan, A. Zakirova, A. Salykbayeva // Symmetry. — 2023. Vol. 15(10), 1958. — DOI: 10.3390/sym15101958.
 21. Azam M. H. Fuzzy Type-1 Triangular Membership Function Approximation Using Fuzzy C-Means / M. H. Azam, M. H. Hasan, S. Hassan, S. J. Abdulkadir // 2020 International Conference on Computational Intelligence (ICCI). — Bandar Seri Iskandar, Malaysia. — 2020. — Pp. 115–120. — DOI: 10.1109/ICCI51257.2020.9247773.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 1, pp. 7–15
DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-7-15

Modeling and Assessment of Security Risks of Intelligent Water Transport Systems

Information about authors

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

E-mail: baranov.miit@gmail.com

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

Mikhalevich I. F., PhD in Engineering, Associate Professor. E-mail: mif-orel@mail.ru

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

Abstract: A digital test bench for the analysis of IWTS object security is presented in this paper. Digital models of the automated vessel operation system, subsystems of the global navigation satellite system and the electronic chart display and information system, as well as the system of hybrid control security (HCS), telecommunications equipment, and an IWTS object information security violator have been developed. It allows promptly identifying new threats and vulnerabilities, their direction and rele-

vance to the object developing response measures and making justified decisions on the need to implement these measures. The specific features of the joint application of vulnerability quantitative assessments of computerized system components obtained from basic general-purpose metrics, fuzzy expert assessments and linguistic risk variables obtained for a particular object functioning are presented. The proposed models and algorithms for hybrid control security provide solutions to problems of automated search and development of effective measures to ensure the ISWT security at various stages of their life cycle.

Keywords: aggregation of information; security; hybrid control; information security; computer based system; linguistic variable; fuzzy assessment; risk; threat; vulnerability; digital test bench; CVSS.

References

1. Rosenberg I. N., Belyakov S. L., Bozhenyuk A. V., Gerasimenko E. M., Glushkov A. A., Kosenko O. V., Savelyeva M. N. *Metody i algoritmy sozdaniya intellektual'nykh geoinformatsionnykh sistem dlya upravleniya transportnymi protsessami* [Methods and algorithms for creating intelligent geoinformation systems for managing transport processes], Moscow: VINITI RAS Publ., 2019, 292 p. (In Russian)
2. Pundir A., Singh S., Kumar M., Bafila A., Saxena G. J. Cyber-Physical Systems Enabled Transport Networks in Smart Cities: Challenges and Enabling Technologies of the

- New Mobility Era. IEEE Access, January 2022, vol. 10, DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3147323.
3. Kul'ba V. V., Mikrin E. A., Pavlov B. V., Somov S. K. A Comprehensive Software Verification Technology for Onboard Control Systems of Spacecraft. Automation and Remote Control, 2023, vol. 84, I. 10, pp. 1047–1054, DOI: 10.1134/S0005117923100065.
 4. Kurek W., Pawlicki M., Pawlicka A., Kozik R., Choraś M. Explainable Artificial Intelligence 101: Techniques, Applications and Challenges. Advanced Intelligent Computing Technology and Applications, 2023, pp. 310–318, DOI: 10.1007/978-981-99-4752-26.
 5. Walter M. J., Barrett A., Tam K. A Red Teaming Framework for Securing AI in Maritime Autonomous Systems. Applied Artificial Intelligence, 2024, vol. 38(1), DOI: 10.1080/08839514.2024.2395750.
 6. Sai S., Yashvardhan U., Chamola V., Sikdar B. Generative AI for Cyber Security: Analyzing the Potential of ChatGPT, DALL-E, and Other Models for Enhancing the Security Space. IEEE Access, 2024, vol. 12, pp. 53497–53516, DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3385107.
 7. Moya Osorio D. P., Ahmad I., Vega Sanchez J. D., Gurtov A., Scholliers J., Kutilla M., Porambage P. Towards 6G-Enabled Internet of Vehicles: Security and Privacy. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2022, vol. 3, pp. 82–105, DOI: 10.1109/OJCOMS.2022.3143098.
 8. Shrestha R., Bajracharya R., Kim S. 6G Enabled Unmanned Aerial Vehicle Traffic Management: A Perspective. IEEE Access, 2021, vol. 9, pp. 91119–91136, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3092039.
 9. Khan S. K., Shiwakoti N., Stasinopoulos P., Warren M. Security assessment in Vehicle-to-Everything communications with the integration of 5G and 6G networks. 2021 International Symposium on Computer Science and Intelligent Controls (ISCSIC), Rome, Italy, 2021, pp. 154–158, DOI: 10.1109/ISCSIC54682.2021.00037.
 10. Mikhalevich I. F. Kontseptual'nye problemy transportnoy bezopasnosti vodnykh intellektual'nykh transportnykh sistem [Conceptual problems of transportation security of intelligent water transportation systems]. *Nadezhnost'* [Dependability], 2024, № 24(2), pp. 72–87, DOI: 10.21683/1729-2646-2024-24-2-72-87 (In Russian)
 11. Mikhalevich I. F. *Problemy obespecheniya bezopasnosti avtonomnogo sudokhodstva na vnutrennikh vodnykh putyakh* [Problems of Ensuring the Security of Autonomous Shipping on Inland Waterways]. Moscow: Goryachaya Liniya – Telecom Publ., 2024, 336 p. (In Russian)
 12. Popov P. A., Rozenberg E. N., Sabanov A. G., Shubinsky I. B. Kompleksnaya bezopasnost' ASU TP ob'ektov KII zheleznodorozhnogo transporta [Integrated Safety of ACS of Railway CII Facilities]. *Nadezhnost'* [Dependability], 2024, I. 24(4), pp. 48–57, DOI: 10.21683/1729-2646-2024-24-4-48-57. (In Russian)
 13. Shubinsky I. B., Rosenberg E. N., Bochkov A. V. *Nadezhnost', riski, bezopasnost' sistem upravleniya na zheleznodorozhnom transporte* [Reliability, risks, safety of control systems in railway transport]. Moscow; Vologda: Infra-Engineering, 2024, 416 p. (In Russian)
 14. Baranov L. A., Ivanova N. D., Mikhalevich I. F. Nechetkaya sistema otsenki riskov informatsionnoy bezopasnosti intellektual'nykh sistem vodnogo transporta [Fuzzy system for assessing the information security risk of intelligent water transport systems]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research], 2024, vol. 10, I. 1, pp. 7–17, DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-01-7-17. (In Russian)
 15. Ryjov A. P., Mikhalevich I. F. Hybrid intelligence framework for improvement of information security of critical infrastructures. Handbook of Research on Cyber Crime and Information Privacy, Hershey, PA, US 2021, DOI: 10.4018/978-1-7998-5728-0.ch016.
 16. Tam K., Jones K. MaCRA: a model-based framework for maritime cyber-risk assessment. WMU J Marit Affairs, 2019, vol. 18, pp. 129–163, DOI: 10.1007/s13437-019-00162-2.
 17. Kharchenko V., Illiashenko O., Fesenko H., Babeshko I. AI Cybersecurity Assurance for Autonomous Transport Systems: Scenario, Model, and IMECA-Based Analysis. Dziech A., Mees W., Niemiec M. (eds) Multimedia Communications, Services and Security. MCSS 2022. Communications in Computer and Information Science, 2022, vol. 1689, pp. 66–79. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-20215-5_6.
 18. Amro A., Gkioulos V. Cyber risk management for autonomous passenger ships using threat-informed defense-in-depth. International Journal of Information Security, 2023, vol. 22, pp. 249–288, DOI: 10.1007/s10207-022-00638-y.
 19. Kavallieratos G., Katsikas S. Managing Cyber Security Risks of the Cyber-Enabled Ship. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, I. 8 (768), 19 p., DOI: 10.3390/jmse8100768.
 20. Kerimkhulle S., Dildebayeva Z., Tokhmetov F., Amirova A., Tussupov J., Makhazhanova U., Adalbek A., Taberkhan R., Zakirova A., Salykbayeva A. Fuzzy Logic and Its Application in the Assessment of Information Security Risk of Industrial Internet of Things. Symmetry, 2023, vol. 15(10), 1958, DOI: 10.3390/sym15101958.
 21. Azam M. H., Hasan M. H., Hassan S., Abdulkadir S. J. Fuzzy Type-1 Triangular Membership Function Approximation Using Fuzzy C-Means. 2020 International Conference on Computational Intelligence (ICCI), Bandar Seri Iskandar, Malaysia, 2020, pp. 115–120, DOI: 10.1109/ICCI51257.2020.9247773.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РАСФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ

КУДЮКИН Владимир Валерьевич, заместитель генерального директора; e-mail: v.kudukin@vniias.ru
ВУКОЛОВ Александр Владимирович, начальник НТК интеллектуальных систем контроля и управления; e-mail: a.vukolov@vniias.ru

КУЗЬМИН Владислав Сергеевич, канд. техн. наук, ведущий специалист Отдела технологического обеспечения и робототехники Центра роботизации технологических процессов НТК интеллектуальных систем контроля и управления; e-mail: vs.kuzmin@vniias.ru

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), Москва

В рамках реализации Концепции «Цифровая железнодорожная станция» предполагается создание робототехнических комплексов, обеспечивающих автоматическую расцепку вагонов при роспуске железнодорожного подвижного состава на сортировочной горке. Настоящая статья посвящена вопросу выбора технико-эксплуатационных характеристик и алгоритма перемещения каретки мобильной платформы такого робототехнического комплекса. В статье приводится описание разработанной математической модели, учитывающей различные варианты перемещения каретки. С использованием разработанной модели было осуществлено сравнение различных вариантов выполнения мобильной платформы робототехнического комплекса, в том числе по количеству подряд сформированных отцепов. Моделирование показало, что увеличения числа подряд сформированных отцепов возможно достичь за счет повышения скорости и ускорения каретки мобильной платформы, а также за счет применения более сложного алгоритма перемещения каретки, требующего для своей реализации применения дополнительного путевого стационарного датчика, предназначенного для определения расстояния между текущими ординатами каретки и автосцепки, подлежащей расцепке.

Ключевые слова: сортировочная станция; сортировочная горка; робототехнический комплекс; роспуск железнодорожных составов; технико-эксплуатационные характеристики.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-16-29

▼ Введение

Автоматизация технологических процессов на железнодорожной станции требует внедрения новых технических средств, обеспечивающих среди прочего взаимодействие с элементами вагонов в рамках выполнения типовых технологических операций. К подобным средствам относятся, в том числе, робототехнические комплексы (далее — РТК), предназначенные для расцепки вагонов при расформировании составов на сортировочной горке. Такие РТК призваны с одной стороны исключить необходимость нахождения работников хозяйства перевозок в опасной зоне, а с другой — повысить скорость надвига [1].

Первостепенной задачей для разработчика таких технических средств является определение потребных величин технико-эксплуатационных

характеристик в зависимости от интенсивности протекания соответствующих процессов. Следует отметить, что в рассматриваемой области техники приводится описание достаточно большого количества прототипов и макетов, охватывающих как РТК в целом, так и отдельные их функциональные узлы и блоки. Так, в работе [2] приводится описание ранее выполненных экспериментальных исследований по определению конструкции манипулятора и модуля позиционирования с использованием макетов робототехнических комплексов в натуральную величину. В работе [3] описываются результаты структурно-функционального проектирования, направленные на разработку конструкторских решений и алгоритмов реализации управления мобильной платформой (далее — МП) такого РТК.

Изуровня техники хорошо известны различные варианты реализации технических решений для таких РТК. В работе [4] описывается стационарный вариант, который предлагает осуществлять расцепку за счет разности высот автосцепок, обеспечиваемой посредством подъема контррельсов. В работе [5] описывается стационарно размещаемый манипулятор, отличительной особенностью конструкции которого является наличие внешнего путевого датчика счета осей для определения автосцепки, подлежащей расцепке, а также модернизация самой автосцепки за счет установки на нее исполнительного механизма. Подобные технические решения ввиду необходимости модернизации подвижного состава дальнейшего развития не получили.

Намного чаще описываются решения, использующие мобильные каретки, перемещающиеся вдоль пути надвига и снабжаемые манипуляторами, с помощью которых осуществляется взаимодействие с цепью автосцепного устройства. В патентном документе [6] описывается РТК, каретка МП которого после окончания расцепки возвращается в исходную координату. В работе [7] для перемещения мобильной платформы предложено использовать дополнительную опорно-поворотную балку. В работе [8] мобильную платформу предложено разместить внутри колеи, а в качестве направляющих использовать ходовые рельсы железнодорожного пути. Подобное решение было описано и в патентном документе [9], однако в нем была решена задача повышения надежности выполнения расцепки за счет взаимодействия с цепями обоих автосцепных устройств вагонов.

Интересен и зарубежный опыт. Наиболее релевантными являются технические решения, предлагаемые китайскими авторами, хотя попытки использовать робототехнические комплексы предпринимались и в европейских странах — соответствующее решение в отношении винтовой сцепки описано в [10]. В работах [11, 12] используют зубчатую направляющую для увеличения скорости надвига. В работе [13] предложено техническое решение, совмещенное с функционалом устройства соединения тормозных шлангов.

Американские изобретатели предложили альтернативу применению направляющих — внедрение МП РТК на гусеничном ходу [14]. Однако такое решение может быть использовано только для отпуска тормозов или соединения тормозных рукавов и мало подходит для выполнения роспуска составов на сортировочной горке при высоких скоростях надвига.

Все вышеописанные работы объединяет отсутствие математического аппарата, который раскрывал бы взаимосвязь между такими основными технико-эксплуатационными характеристиками РТК для расцепки вагонов при роспуске составов на сортировочной горке, как: максимальная скорость надвига, количество подряд сформированных отцепов минимальной длины, длина зоны действия мобильной платформы робототехнического комплекса, максимальная скорость и ускорение каретки мобильной платформы. Исключением является работа [15], в которой приводятся расчетные формулы для определения числа подвижных манипуляторов (вернее сказать — кареток) МП РТК в составе РТК на один путь надвига в случае, когда каретка МП РТК всегда возвращается в некоторую заранее определенную начальную пространственную координату. Однако приведенное математическое обеспечение не позволяет определять такие важные показатели функционирования РТК, как количество подряд сформированных отцепов, протяженность зоны действия МП РТК, ордината установки стационарного датчика обнаружения автосцепки и др.

С учетом этого целью работы выбрана разработка математической модели перемещения кареток МП РТК при различных вариантах обработки железнодорожного состава, подлежащего расформированию, т.е. при различных событиях, инициирующих начало и окончание перемещения каретки МП РТК. В качестве объекта исследования выбраны РТК, предназначенные для расцепки вагонов при роспуске железнодорожных составов на сортировочной горке. В качестве предмета исследования выбрано влияние параметров РТК на количество подряд сформированных отцепов.

1. Построение модели функционирования робототехнического комплекса, предназначенного для расцепки вагонов при роспуске железнодорожного подвижного состава на сортировочной горке

1.1. Варианты перемещения каретки мобильной платформы робототехнического комплекса

Прежде, чем перейти к описанию разработанной модели, опишем основные варианты событий, инициирующих начало и окончание перемещения каретки МП РТК, а следовательно, и варианты перемещения самой каретки МП РТК (рис. 1). На рис. 1 приведены следующие обозначения:

V_H — скорость надвига (принимается постоянной в интервале отдельной технологической операции по выполнению расцепки), в м/с;

V_{max} — максимальная скорость каретки МП РТК, в м/с;

t_3 — время задержки на начало движения каретки МП РТК после ее стоянки / остановки, в секундах (учитывает потери времени на срабатывания датчиков обнаружения автосцепки, передачу информации, в том числе управляющих сигналов, на коммутацию силовых цепей привода МП РТК и т.п.);

t_p — время разгона каретки МП РТК до некоторой фактической скорости $V \leq V_{max}$, в секундах (на рис. 1 показан вариант, при котором $V = V_{max}$);

t_{pH1} — время равномерного движения каретки МП РТК с максимальной скоростью V_{max} , в секундах (если фактическая скорость V каретки МП РТК в течение отдельной технологической операции строго меньше V_{max} , то t_{pH1} приравнивается к нулю, поскольку каретка будет перемещаться только равноускоренно);

t_{T1} — время торможения от некоторой фактической скорости V до скорости надвига V_H , в секундах;

t_{pH2} — время равномерного движения каретки МП РТК со скоростью надвига V_H , в секундах (равно времени выполнения технологических операций по переводу манипулятора РТК из транспортировочного положения в рабочее, позиционирования манипулятора, выполнения

действий с цепью автосцепного устройства, перевод манипулятора из рабочего в транспортировочное положение; такое время определяется типом привода манипулятора и точностью его позиционирования и далее при моделировании будет приниматься произвольным и уточняться при выборе типа манипулятора и его привода);

t_{T2} — время торможения от V_H до нуля, в секундах;

t_{pO} — время разгона каретки МП РТК при движении в обратном направлении (здесь и далее под движением в обратном направлении будем считать движение каретки МП РТК в сторону парка приема), в секундах;

t_{pHO} — время равномерного движения каретки МП РТК в обратном направлении, в секундах ($t_{pHO} \geq 0$);

t_{TO} — время торможения каретки МП РТК при движении в обратном направлении, в секундах ($t_{TO} = t_{pO}$);

t_{Π} — суммарное время на выполнение движения каретки МП РТК в прямом направлении (здесь и далее под движением каретки МП РТК в прямом направлении будем считать движение по направлению к сортировочному парку);

t_{Σ} — суммарное время, затрачиваемое на перемещение каретки МП РТК в прямом и обратном направлении, т.е. за один цикл функционирования РТК.

Первый вариант перемещения (рис. 1, а) подразумевает, что каретка МП РТК осуществляет подготовку, продолжительность которой равна t_3 , и начинает движение только в случаях, когда ордината нахождения текущей автосцепки, подлежащей расцепке X_H^i равна или больше текущей ординаты каретки МП РТК $X_{РТК}^i$ (здесь и далее имеется ввиду ордината возимого датчика, установленного на каретке МП РТК). Чем больше разность ординат, которую далее будем обозначать как X_0 , тем больше расстояние S_{Π} , проходимое кареткой МП РТК в прямом направлении. Величина X_0 может быть равна нулю, если каретка МП РТК находится в точке начала отсчета ординат, или быть отличной от нуля в случае, когда автосцепка была обнаружена внешним стационарным датчиком, смещенным относительно текущей ординаты каретки МП РТК в сторону сортировочного

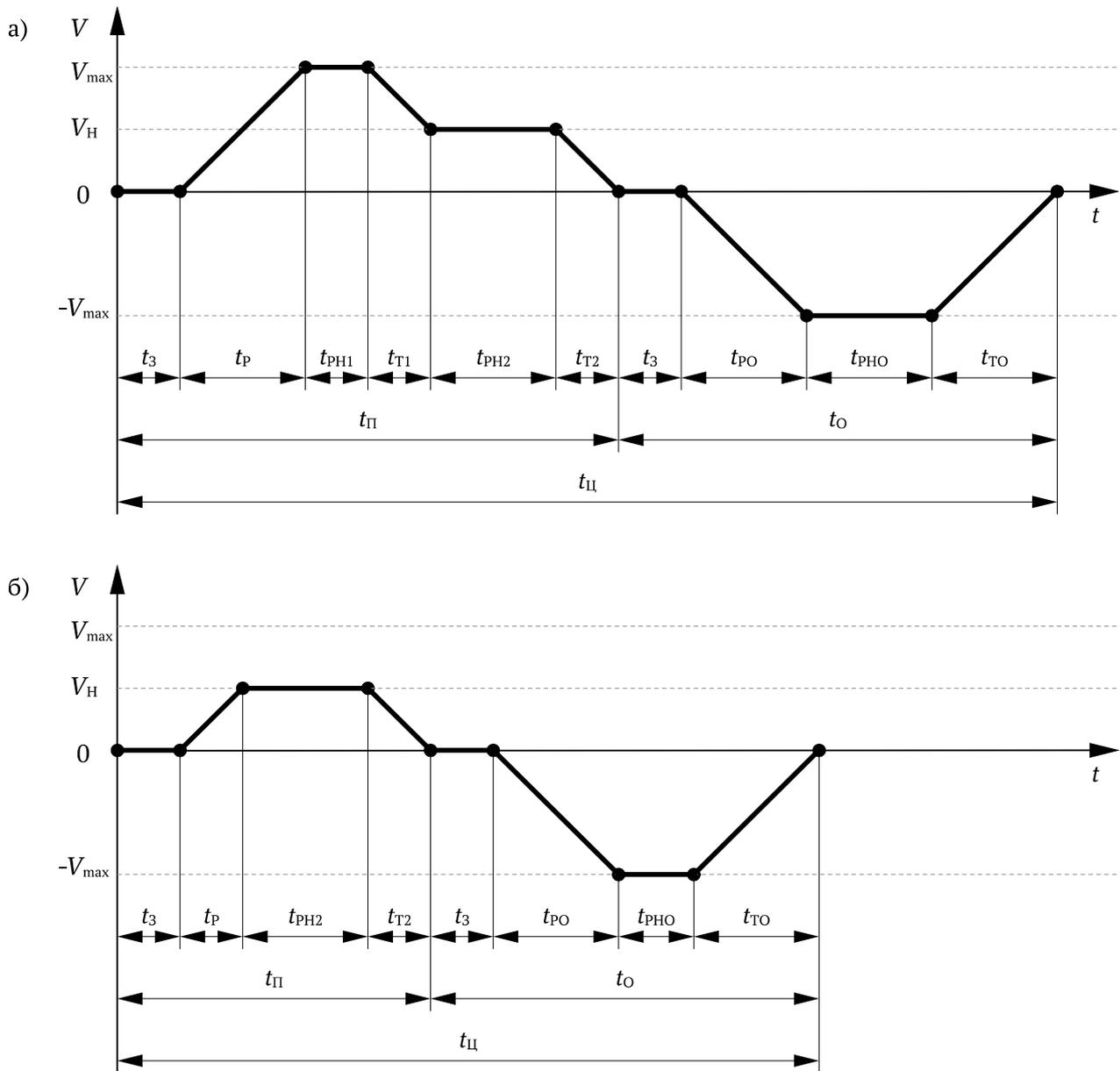


Рис. 1. Изменение скорости МП РТК во время выполнения технологических операций

парка, или же возимым на каретке МП РТК датчиком при движении каретки МП РТК в противоположном направлении.

Второй вариант перемещения (рис. 1, б) подразумевает, что каретка МП РТК начинает равноускоренное движение при условии, что $X_H^i < X_{РТК}^i$. При этом расстояние, проходимое кареткой МП РТК в прямом направлении, оказывается меньше, чем в первом варианте перемещения каретки РТК, так как отсутствует необходимость нагона автосцепки. Отметим, что такой вариант возможен, если имеют место стационарные (т.е. устанавливаемые не на каретке МП РТК) датчики, которые могут

получать информацию о текущей ординате следующей автосцепки, подлежащей расцепке, относительно начала ординат МП РТК. При этом такие датчики должны быть смещены относительно начала ординат МП РТК.

Движение каретки МП РТК в обратном направлении может осуществляться на различное расстояние в зависимости от варианта выбора точки прицельного торможения для движения каретки МП РТК в обратном направлении. Всего возможно четыре таких варианта:

1) безусловный возврат в начало ординат МП РТК (под безусловным следует понимать, что РТК вплоть до возврата в начало ординат

не предпринимает попыток расцепки заданных автосцепок, которые следуют мимо него);

2) возврат до обнаружения датчиком, установленным на каретке МП РТК, следующей автосцепки, подлежащей расцепке;

3) возврат каретки МП РТК и его остановка в точке, где будет находиться следующая автосцепка, подлежащая расцепке;

4) возврат каретки МП РТК и его остановка в точке, откуда может быть начато равноускоренное движение к следующей автосцепке, подлежащей расцепке.

Варианты 2 и 3 имеют место только при движении каретки МП РТК по алгоритму, приведенному на рис. 1, а, а вариант 4 — только при движении каретки МП РТК по алгоритму, приведенному на рис. 1, б (в противном случае начальная ордината каретки МП РТК в новом цикле будет больше, чем по варианту 2 или 3, что будет приводить к снижению эффективности функционирования РТК). В свою очередь вариант 1 является универсальным для обоих вариантов перемещения каретки МП РТК.

1.2. Ограничения и допущения при построении математической модели движения каретки мобильной платформы

Отметим следующие ограничения и допущения, принятые при разработке модели и последующем моделировании:

1. МП РТК и размещенные на ней устройства, а также автосцепки, подлежащие расцепке, представляют собой материальные точки, перемещающиеся вдоль одной оси; МП РТК может перемещаться в обоих направлениях; автосцепки, подлежащие расцепке, могут перемещаться только в одном направлении; направление оси совпадает с направлением движения автосцепок; за нулевую ординату принято начало зоны действия МП РТК (наиболее удаленная от горба горки ордината зоны действия МП РТК).

2. Для первого варианта движения каретки МП РТК (рис. 1, а) справедливо следующее соотношение скоростей: $V_H < V_{\max}$. Для второго варианта движения МП РТК (рис. 1, б) справедливо следующее соотношение скоростей: $V_H \leq V_{\max}$.

3. МП РТК не начинает движение, если:

- не выполняется соответствующее ее варианту движения в прямом направлении условие по п. 2;
- разность между протяженностью зоны действия МП РТК и текущей ординатой каретки МП РТК меньше расстояния, которое потребуется пройти в прямом направлении для нагона и расцепки автосцепки, а также последующей остановки каретки МП РТК: $L_{РТК} - X_{РТК}^i < S_{\Pi}$.

4. Фактическая протяженность зоны действия РТК $L_{РТК}$ должна быть не менее $L_{РТК}^{\min}$.

5. Автосцепное устройство всегда полностью исправно.

6. Величины вероятностей ошибок первого и второго рода для системы технического зрения при решении задачи позиционирования манипулятора и регистрации факта выполнения расцепки равны нулю.

7. Наихудшими условиями функционирования МП РТК следует считать:

- максимальную скорость надвига V_H^{\max} ;
- минимальную длину отцепа $L_{ОТЦ}^{\min}$, которая может быть принята равной 1 условной единице длины, т.е. 14 м (по стандартной длине полувагона по осям автосцепок);
- минимальную протяженность зоны действия МП РТК $L_{РТК}^{\min}$, равную максимальному расстоянию, проходимому МП РТК в прямом направлении S_{Π}^{\max} , получаемую при нулевой начальной ординате МП РТК при V_H^{\max} .

8. Влияние природно-климатических условий на величину максимального расстояния, проходимого МП РТК в прямом S_{Π}^{\max} и обратном S_{Π}^{\max} направлениях, не учитывается.

С учетом вышеизложенного далее разработаем модель, описывающую движение МП РТК.

1.3. Математическая модель движения каретки мобильной платформы

Для определения временных параметров перемещения каретки МП РТК до момента времени, когда она и автосцепка будут находиться в состоянии покоя друг относительно друга, может быть записана система уравнений (1):

$$\begin{cases} S_H = X_0 + V_H[t_3 + t_p + t_{PH1} + t_{T1}], \\ S_H = \frac{at_p^2}{2} + V_{max}t_{PH1} + at_pt_{T1} - \frac{at_{T1}^2}{2}; \end{cases} \quad (1)$$

где S_H — ордината автосцепки или каретки МП РТК в момент, когда ординаты и скорости мобильной платформы РТК и автосцепки равны, в метрах;

a — ускорение МП РТК, в м/с².

С учетом (1) значения t_p , t_{PH1} , t_{T1} и t_{T2} могут быть определены с использованием выражений (2)–(5) соответственно:

$$t_p = \begin{cases} \frac{V_H^\Phi}{a} + \sqrt{\frac{V_H^\Phi}{a} \left[\frac{V_H^\Phi}{2a} + t_3 \right] + \frac{X_0}{a}}, \\ \text{если} \left(V_H^\Phi + a \sqrt{\frac{V_H^\Phi}{a} \left[\frac{V_H^\Phi}{2a} + t_3 \right] + \frac{X_0}{a}} \right) > V_{max}, \\ \frac{V_{max}}{a}, \\ \text{если} \left(V_H^\Phi + a \sqrt{\frac{V_H^\Phi}{a} \left[\frac{V_H^\Phi}{2a} + t_3 \right] + \frac{X_0}{a}} \right) \leq V_{max}; \end{cases} \quad (2)$$

$$t_{PH1} = \begin{cases} \frac{X_0 + V_H^\Phi t_3 - \frac{(V_H^\Phi)^2}{2a} - \frac{V_{max}}{a} [V_{max} - 2V_H]}{V_{max} - V_H^\Phi}, \\ \text{если } t_p = \frac{V_{max}}{a}, \\ 0, \text{ если } t_p < \frac{V_{max}}{a}; \end{cases} \quad (3)$$

$$t_{T1} = \frac{at_p - V_H^\Phi}{a}, \quad (4)$$

$$t_{T2} = \frac{V_H^\Phi}{a}. \quad (5)$$

Фактическое расстояние, проходимое кареткой МП РТК при движении в прямом направлении, в данном случае будет определяться выражением (6), а максимальное расстояние — выражением (7):

$$\begin{aligned} S_{\Pi}^\Phi &= V_{max}t_{PH1} + at_pt_{T1} + \\ &+ V_H^\Phi(t_{PH2} + t_{T2}) + \frac{a[t_p^2 - t_{T1}^2 - t_{T2}^2]}{2}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} S_{\Pi}^{max} &= V_{max}t_{PH1} + at_pt_{T1} + V_H^{max}(t_{PH2} + t_{T2}) + \\ &+ \frac{a[t_p^2 - t_{T1}^2 - t_{T2}^2]}{2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Теперь рассмотрим перемещение каретки МП РТК в случае, когда начало движения осуществляется до проследования автосцепки (рис. 1, б). Расстояние S_d от точки установки датчика до начала ординат мобильной платформы РТК можно определить с использованием формулы (8):

$$S_d = V_H^{max} \left[t_3 + \frac{V_H^{max}}{2a} \right]. \quad (8)$$

Коррекция времени задержки на начало движения Δt при снижении скорости надвига до некоторого фактического значения V_H^Φ может быть определена с использованием выражения (9):

$$\Delta t = \frac{V_H^{max}}{V_H^\Phi} \left[t_3 + \frac{V_H^{max}}{2a} \right] - \frac{V_H^\Phi}{2a} - t_3. \quad (9)$$

При таком характере движения параметры t_{PH1} и t_{T1} приравниваются к нулю, параметр t_{PH2} равен времени выполнения технологических операций манипулятором РТК, а параметры t_p и t_{T2} могут быть определены с использованием выражения (10):

$$t_p = t_{T2} = \frac{V_H^\Phi}{a}. \quad (10)$$

Фактическое расстояние, проходимое мобильной платформой РТК при движении в прямом направлении, в данном случае будет определяться выражением (11), а максимальное расстояние — выражением (12):

$$S_{\Pi}^{\Phi} = V_{\text{H}}^{\Phi} (t_{\text{PH2}} + t_{\text{P}}), \quad (11)$$

$$S_{\Pi}^{\text{max}} = V_{\text{H}}^{\text{max}} (t_{\text{PH2}} + t_{\text{P}}). \quad (12)$$

Подчеркнем, что формулы (7) и (12) следует использовать при определении минимальной протяженности зоны действия МП РТК.

Теперь рассмотрим движение каретки МП РТК в обратном направлении. Отметим, что вне зависимости от модели движения каретки МП РТК в обратном направлении время разгона t_{PO} и время торможения t_{TO} мобильной платформы в обратном направлении равны между собой и могут быть определены в простейшем случае возврата каретки МП РТК в начало ординат с использованием выражения (13):

$$t_{\text{PO}} = t_{\text{TO}} = \begin{cases} \sqrt{\frac{X_{\text{РТК}}^i}{a}}, & \text{если } \left(\frac{X_{\text{РТК}}^i}{V_{\text{max}}} - \frac{V_{\text{max}}}{a} \right) = 0, \\ \frac{V_{\text{max}}}{a}, & \text{если } \left(\frac{X_{\text{РТК}}^i}{V_{\text{max}}} - \frac{V_{\text{max}}}{a} \right) > 0. \end{cases} \quad (13)$$

В остальных вариантах алгоритма движения МП РТК в обратном направлении данные параметры могут быть определены с использованием выражения (14):

$$t_{\text{PO}} = t_{\text{TO}} = \begin{cases} -\frac{V_{\text{H}}^{\Phi}}{a} + \sqrt{\left(\frac{V_{\text{H}}^{\Phi}}{a} \right)^2 + P_1 Q_1}, & \text{если } \left(\frac{Q_1 - P_2}{V_{\text{max}} + V_{\text{H}}^{\Phi}} \right) = 0, \\ \frac{V_{\text{max}}}{a}, & \text{если } \left(\frac{Q_1 - P_2}{V_{\text{max}} + V_{\text{H}}^{\Phi}} \right) > 0; \end{cases} \quad (14)$$

где

$$P_1 = \begin{cases} \frac{1}{a}, & \text{если } X_{\text{РТК}}^{i+1} \geq X_{\text{H}}^{i+1}, \\ \frac{2}{a}, & \text{если } X_{\text{РТК}}^{i+1} < X_{\text{H}}^{i+1}; \end{cases}$$

$$P_2 = \begin{cases} \frac{V_{\text{max}}}{a} [V_{\text{max}} - 2V_{\text{H}}^{\Phi}], & \text{если } X_{\text{РТК}}^{i+1} \geq X_{\text{H}}^{i+1}, \\ \frac{V_{\text{max}}}{2a} [V_{\text{max}} + 2V_{\text{H}}^{\Phi}], & \text{если } X_{\text{РТК}}^{i+1} < X_{\text{H}}^{i+1}; \end{cases}$$

$$Q_1 = \begin{cases} \sum L_{\text{отц}} - V_{\text{H}}^{\Phi} \left[t_3 + \frac{V_{\text{H}}}{2a} \right], & \text{если } X_{\text{РТК}}^{i+1} \geq X_{\text{H}}^{i+1}, \\ \sum L_{\text{отц}} - V_{\text{H}}^{\Phi} \left[t_3 + \frac{V_{\text{H}}}{2a} + \Delta t \right], & \text{если } X_{\text{РТК}}^{i+1} < X_{\text{H}}^{i+1}; \end{cases}$$

$X_{\text{РТК}}^{i+1}$ — ордината будущей остановки мобильной платформы РТК;

X_{H}^{i+1} — ордината местонахождения автосцепки, подлежащей расцепке, в момент будущей остановки мобильной платформы;

$\sum L_{\text{отц}}$ — сумма длин отцепов, которые мобильная платформа РТК пропустит в процессе следования в обратном направлении.

Время равномерного движения каретки МП РТК в обратном направлении может быть определено с использованием выражения (15), а фактическое расстояние, проходимое мобильной платформой в обратном направлении, может быть определено по формуле (16):

$$t_{\text{PHO}} = \frac{X_{\text{РТК}}^i - P_2}{V_{\text{max}} + V_{\text{H}}^{\Phi}}, \quad (15)$$

$$S_{\text{O}}^{\Phi} = at_{\text{PO}}^2 + V_{\text{max}} t_{\text{PHO}}. \quad (16)$$

Отметим, что минимальное расстояние, проходимое кареткой МП РТК в обратном направлении, может быть определено при таком граничном (наихудшем) условии, как максимальная величина скорости надвига.

В заключении построения модели отметим, что в случае, когда текущая разность между текущей ординатой каретки МП РТК $X_{\text{РТК}}^i$ и фактическим расстоянием V_{H}^{Φ} , проходимым кареткой МП РТК в обратном направлении, для рассматриваемой $\sum L_{\text{отц}}$ окажется отрицательной, следует осуществлять расчет такого движения каретки МП РТК в обратном направлении, как движение в начало ординат.

2. Результаты моделирования

Для анализа влияния максимальной скорости надвига, максимальной скорости, ускорения и варианта движения МП РТК на минимальную протяженность зоны действия МП РТК были построены зависимости, показанные на рис. 2, 3 и 4 соответственно.

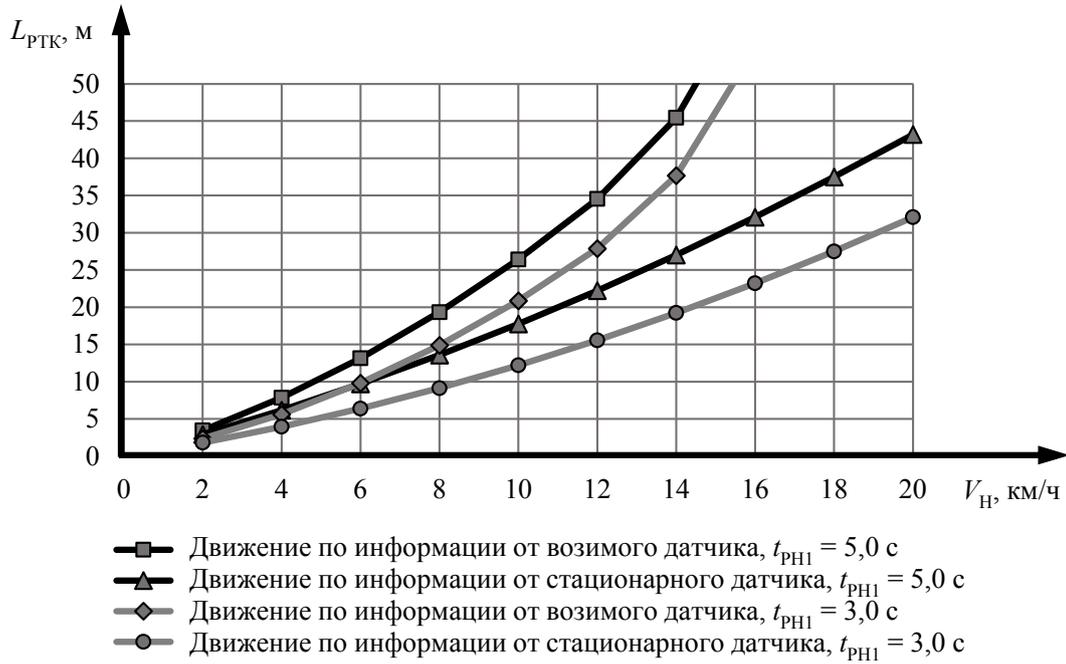


Рис. 2. Результаты моделирования влияния максимальной скорости надвига на протяженность зоны действия МП РТК ($t_3 = 0,2$ с, $t_{PH2} = 5,0$ с, $a = 2$ м/с², $V_{max} = 20$ км/ч)

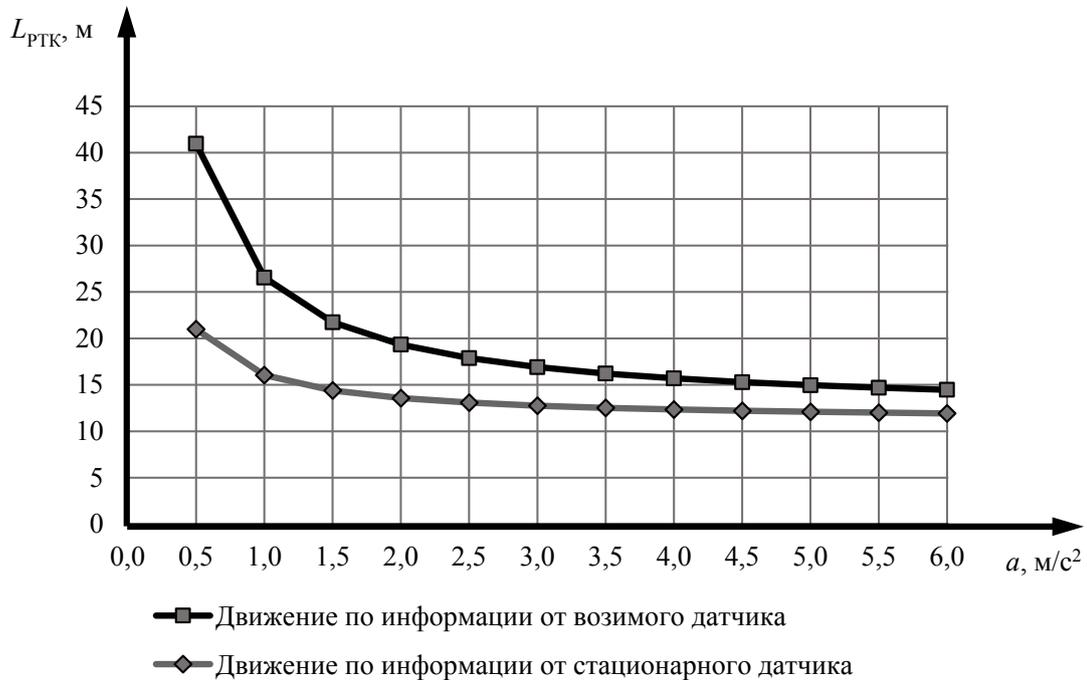


Рис. 3. Результаты моделирования влияния ускорения МП РТК на протяженность зоны действия МП РТК ($t_3 = 0,2$ с, $t_{PH2} = 5,0$ с, $V_{max} = 20$ км/ч, $V_H = 8$ км/ч)

На рис. 5 показана зависимость разности ординат начала зоны действия МП РТК и размещения стационарного путевого датчика от максимальной скорости надвига при различных величинах ускорения a МП РТК. На рис. 6

представлена серия зависимостей времени задержки на начало движения, формируемой при наличии разности между максимальной и фактической (текущей) скоростями надвига. Для анализа влияния начальной ординаты МП

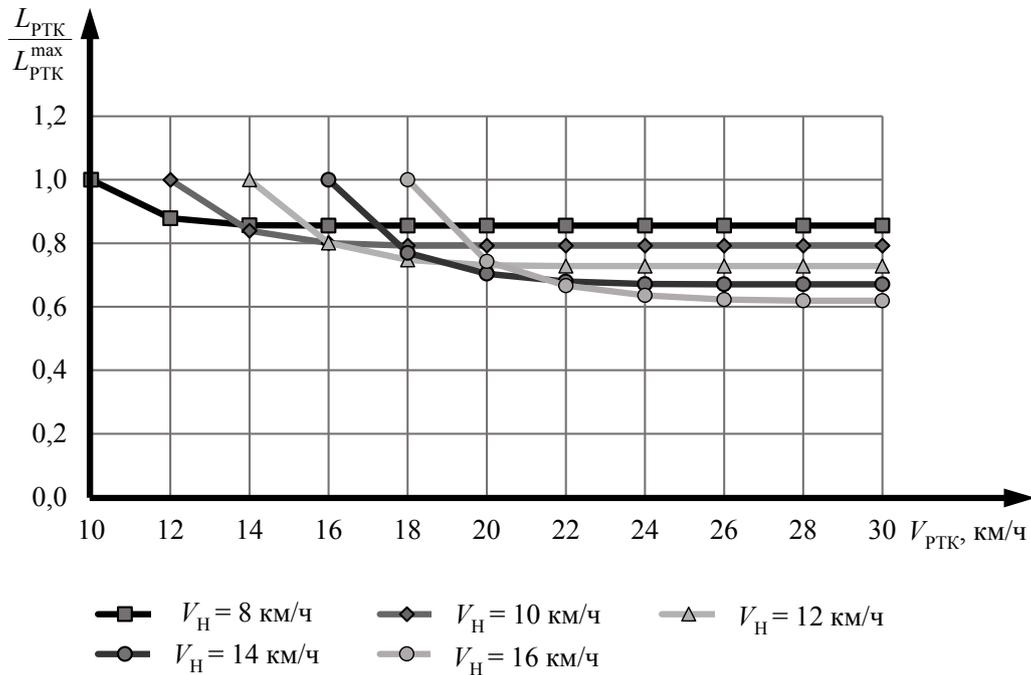


Рис. 4. Результаты моделирования влияния максимальной скорости МП РТК на протяженность зоны действия МП РТК ($t_3 = 0,2$ с, $t_{PH2} = 5,0$ с)

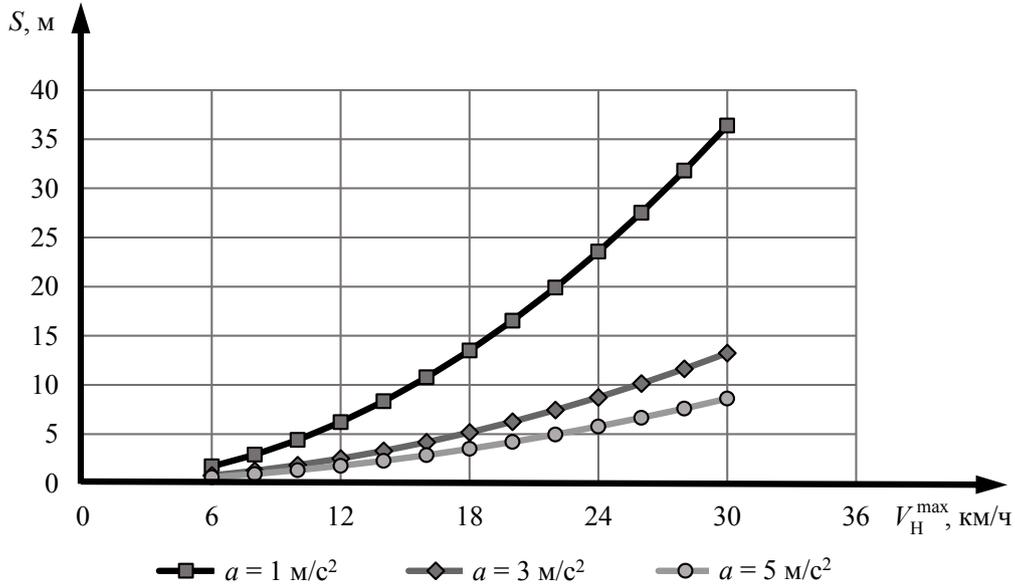


Рис. 5. Зависимость разности ординат начала зоны действия МП РТК и размещения стационарного путевого датчика от максимальной скорости надвига

РТК на количество подряд сформированных отцепов при произвольно заданных параметрах движения МП РТК построен ряд зависимостей, приведенных на рис. 7.

Из результатов моделирования, приведенных на рис. 2, следует, что сокращение зоны действия МП РТК (а также расстояния, проходимого кареткой МП РТК при ее движении в прямом

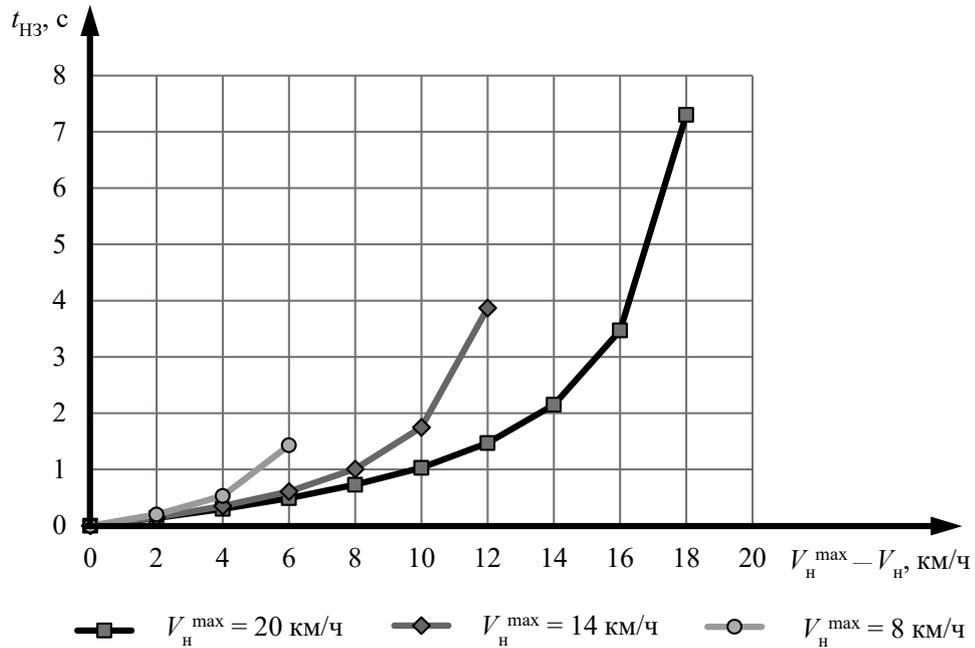


Рис. 6. Зависимость времени задержки на начало движения МП РТК от разности между максимальной и фактической скоростями надвига

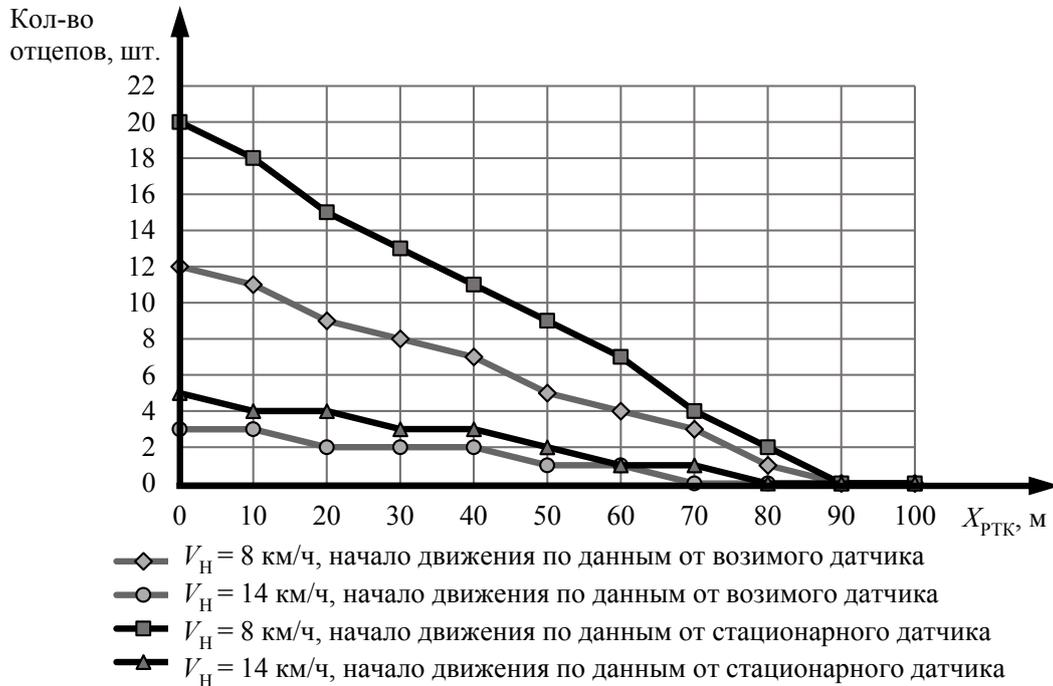


Рис. 7. Влияние начальной ординаты МП РТК на количество подряд сформированных отцепов при возврате МП РТК до обнаружения автосцепки, подлежащей расцепке, возимым датчиком или до достижения ординаты автосцепки, подлежащей расцепке, получаемой по данным от внешнего датчика
 $(t_3 = 0,2 \text{ с}, t_{PH2} = 5,0 \text{ с}, a = 2 \text{ м/с}^2, V_{\max} = 20 \text{ км/ч}, L_{РТК} = 100 \text{ м})$

направлении) возможно за счет использования стационарного путевого датчика и сокращения времени выполнения технологических операций с использованием манипулятора и системы технического зрения. Из результатов моделирования, приведенных на рис. 3, следует, что увеличение ускорения также приводит к сокращению потребной зоны действия МП РТК.

Из результатов моделирования, приведенных на рис. 4, следует, что увеличение максимальной скорости каретки МП РТК при малых скоростях надвига не позволяет существенно сократить минимальную протяженность зоны действия МП РТК. Так, при скорости надвига в 8 км/ч протяженность зоны действия МП РТК сокращается при максимальной скорости 30 км/ч не более чем на 14 % в относительной величине и на 3,26 м — в абсолютной. Однако с увеличением максимальной скорости надвига сокращение зоны действия МП РТК становится существеннее. Так, последующее увеличение максимальной скорости надвига до 14 км/ч приводит к сокращению протяженности зоны действия МП РТК за счет увеличения ее максимальной скорости до 30 км/ч уже на 32,9 %, или 21,25 м, а при скорости надвига 16 км/ч — на 38,1 %, или 32,68 м. С учетом этого при проектировании РТК следует руководствоваться не текущими, а перспективными (потребными) значениями скорости надвига.

Из результатов моделирования, приведенных на рис. 5, видно, что увеличение ускорения каретки МП РТК позволяет существенно сократить разность ординат между началом зоны действия МП РТК и местом установки стационарного путевого датчика для обнаружения автосцепок при одной и той же максимальной скорости надвига. Из данных результатов также следует, что разность между максимальной и фактической скоростями надвига может быть компенсирована за счет задержки на начало движения каретки МП РТК в случае, когда она осуществляет до взаимодействия с автосцепкой, подлежащей расцепке, только равноускоренное движение. Кроме того, график указывает, что чем больше разница между максимальной и фактической скоростями надвига, тем больше времени у каретки МП РТК на движение в обратном направлении.

Из результатов моделирования, приведенных на рис. 7, следует, что увеличение зоны действия позволяет увеличить количество подряд сформированных отцепов минимальной длины при прочих равных. Кроме того, из соответствующих результатов моделирования следует, что целесообразно применять алгоритмы движения МП РТК, использующие данные о пространственных координатах автосцепки, подлежащей расцепке, от внешних путевых датчиков.

С учетом полученных результатов далее для нужд проектирования требуется получить расчетные выражения для определения максимального количества подряд сформированных отцепов при заданных характеристиках РТК.

3. Определение максимального количества подряд сформированных отцепов при заданных характеристиках РТК

Исходя из анализа особенностей движения кареток МП РТК может быть получена формула (17), определяющая максимальное количество N подряд формируемых отцепов одной длины при заданных $L_{РТК}$ и $X_{РТК}^i$, а также при условии, что $L_{РТК} > S_{П} > S_{О}$:

$$N = \left\lfloor \frac{L_{РТК} - X_{РТК}^i - S_{П}}{S_{П} - S_{О}} \right\rfloor. \quad (17)$$

Для формулы (17) справедливы следующие допущения и ограничения:

- $S_{П}$ — расстояние, проходимое кареткой МП РТК в прямом направлении при обслуживании только одной автосцепки, подлежащей расцепке;
- $S_{О}$ — расстояние, проходимое кареткой МП РТК в обратном направлении в ожидании начала движения в прямом направлении за следующей автосцепкой, подлежащей расцепке (между двумя подряд следующими автосцепками, подлежащими расцепке);
- каретка МП РТК мгновенно достигает максимальной скорости при движении в обратном направлении, а $S_{О}$ не зависит от $S_{П}$.

Подставляя в (17) выражения (6), (11) и (16), получим следующую формулу (18):

$$N = \begin{cases} \left\lfloor \frac{L_{\text{РТК}} - X_{\text{РТК}}^{i-1} - \left[V_{\text{max}} t_{\text{PH1}} + at_{\text{P}} t_{\text{T1}} + V_{\text{H}}^{\Phi} (t_{\text{PH2}} + t_{\text{T2}}) + \frac{a[t_{\text{P}}^2 - t_{\text{T1}}^2 - t_{\text{T2}}^2]}{2} \right]}{\left[V_{\text{max}} t_{\text{PH1}} + at_{\text{P}} t_{\text{T1}} + V_{\text{H}}^{\Phi} (t_{\text{PH2}} + t_{\text{T2}}) + \frac{a[t_{\text{P}}^2 - t_{\text{T1}}^2 - t_{\text{T2}}^2]}{2} \right]} - \left[at_{\text{PO}}^2 + V_{\text{max}} t_{\text{PHO}} \right]} \right\rfloor, & \text{если } X_{\text{H}}^i \geq X_{\text{РТК}}^i, \\ \left\lfloor \frac{L_{\text{РТК}} - X_{\text{РТК}}^{i-1} - \left[V_{\text{H}}^{\Phi} (t_{\text{PH2}} + t_{\text{P}}) \right]}{\left[V_{\text{H}}^{\Phi} (t_{\text{PH2}} + t_{\text{P}}) \right]} - \left[at_{\text{PO}}^2 + V_{\text{max}} t_{\text{PHO}} \right]} \right\rfloor, & \text{если } X_{\text{H}}^i < X_{\text{РТК}}^i. \end{cases} \quad (18)$$

Для формулы (18) справедливы те же ограничения и допущения, что и для формулы (17). Отметим, что при $S_{\text{П}} \leq S_{\text{O}}$ все отцепы одной длины формируются правильно, т.е. в соответствии с сортировочным листком.

Из результатов моделирования и формулы (18) следует, что наибольшего числа подряд сформированных отцепов возможно добиться путем:

- уменьшения скорости надвига;
- увеличения максимальной скорости и ускорения каретки РТК (сокращение $S_{\text{П}}$ и увеличение S_{O});
- использования в дополнение к возимому на каретке МП РТК датчику путевого стационарного датчика, обеспечивающего получение информации о следующей автосцепке, подлежащей расцепке, без дополнительного перемещения каретки МП РТК;
- увеличения количества кареток МП РТК, обслуживающих один путь надвига.

Отметим, что первый вариант реализации движения каретки МП РТК накладывает при необходимости обеспечения высоких значений эксплуатационных показателей существенные ограничения на протяженность зоны действия РТК и расстояние S_{O} , проходимое кареткой МП РТК в обратном направлении. С учетом этого более предпочтительным на стадии разработки и проектирования выглядит увеличение максимальной скорости и ускорения каретки РТК, а также применение дополнительного путевого стационарного датчика, обеспечивающего получение информации о следующей автосцепке, подлежащей расцепке.

Заключение

В результате выполнения работы создана математическая модель перемещения кареток МП РТК при различных событиях,

инициирующих начало и окончание перемещения каретки МП РТК.

На основе анализа результатов моделирования возможно сформулировать следующие основные выводы:

1. При проектировании РТК следует стремиться к сокращению времени задержки на начало движения каретки МП РТК и времени выполнения технологических операций с использованием манипулятора, размещаемого на каретке МП РТК с тем, чтобы сокращать протяженность зоны действия МП РТК, а также расстояния, проходимого кареткой МП РТК при движении в прямом направлении. Для этого требуется определить и осуществить рациональный выбор телекоммуникационного оборудования РТК, его МП и приводов манипуляторов.

2. При выборе привода МП РТК следует стремиться к увеличению максимальной скорости и ускорения МП. Это позволит как сократить расстояние, проходимое МП РТК в прямом направлении, так и сократить время на движение МП РТК в обратном направлении.

3. Сравнение вариантов выполнения МП РТК при ее разработке, проектировании или формировании к ней технических требований должно быть осуществлено с использованием имитационного моделирования, базирующегося на разработанной математической модели.

4. Максимальную протяженность зоны действия РТК следует выбирать с учетом результатов статистического анализа сортировочных листков на предмет частоты возникновения подряд идущих отцепов минимальной длины. В случае, когда количество таких подряд следующих отцепов минимальной длины в фактическом сортировочном листке превышает выбранный при проектировании показатель,

следует обеспечивать дополнительные меры для исключения пропуска РТК автосцепок, подлежащих расцепке.

Приведенные результаты предполагается использовать при разработке технических требований на РТК, а также указаний по их проектированию и пуско-наладочным работам.

Перспективными направлениями исследований в данной области следует считать уточнение зависимости количества подряд сформированных отцепов от природно-климатических условий, а также оценку влияния различных мер, направленных на исключение пропуска РТК автосцепок, подлежащих расцепке, на эксплуатационные показатели сортировочной горки и сортировочной станции в целом. ▲

Список источников

1. Дудоров Е. А. Робототехнические комплексы для обслуживания подвижного состава / Е. А. Дудоров, К. А. Котова, В. В. Кудюкин, И. Г. Жиденко // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. — 2022. — № 1(57). — С. 50–55.
2. Кудюкин В. В. Роботизация как элемент цифровой трансформации / В. В. Кудюкин, Е. А. Дудоров, А. В. Вуколов, К. А. Котова // Железнодорожный транспорт. — 2022. — № 5. — С. 19–23.
3. Дудоров Е. А. Система управления манипулятором робототехнического комплекса для обслуживания механизмов сцепки и тормозной системы железнодорожных вагонов / Е. А. Дудоров, К. А. Котова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. — 2021. — Т. 12, № 1. — С. 58–64.
4. Суюнбаев Ш. М. Устройство по автоматической расцепке вагонов при расформировании составов на сортировочной горке / Ш. М. Суюнбаев // Материалы первой международной Научно-технической конференции «железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы»: материалы Первой Международной научно-технической конференции (Ташкент, 20–23 апреля 2022 г.). Ташкент, 20–23 апреля 2022 года. — Ташкент: Ташкентский государственный транспортный университет (ТГТрУ), 2022. — С. 161–165.
5. Патент № 2410262 С1 Российская Федерация, МПК В61G 7/04. Устройство для автоматического расцепления автосцепок движущихся вагонов: № 2009143451/11: заявл. 24.11.2009; опубл. 27.01.2011 / О. В. Москвичев, В. В. Суетин, А. Г. Кузнецов [и др.]; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (СамГУПС). — 6 с.
6. Патент на полезную модель № 208417 U1 Российская Федерация, МПК В61G 7/04. Промышленный робот для автоматического расцепления движущихся грузовых вагонов: № 2021121688: заявл. 21.07.2021; опубл. 17.12.2021 / Р. Р. Садуев. — 8 с.
7. Патент № 2700208 С1 Российская Федерация, МПК В61G 7/04. Устройство для автоматического расцепления вагонов движущихся поездов: № 2018140628: заявл. 19.11.2018; опубл. 13.09.2019 / Ю. А. Панин, Д. И. Матях; заявитель Акционерное общество Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (АО «ВНИКТИ»). — 11 с.
8. Патент № 2728968 С1 Российская Федерация, МПК В61G 7/04. Способ автоматического расцепления автосцепок движущихся вагонов и устройство его осуществления: № 2019132718: заявл. 16.10.2019; опубл. 03.08.2020 / В. Н. Зайков; заявитель Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». — 12 с.
9. Патент на полезную модель № 216043 U1 Российская Федерация, МПК В61G 7/04. Устройство автоматического расцепления вагонов: № 2022128548: заявл. 02.11.2022; опубл. 16.01.2023 / А. А. Сергеев, А. А. Заец, А. В. Дубовицкий [и др.]; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева» Министерства обороны Российской Федерации. — 9 с.
10. Патент 3095666 В1 Европейское патентное ведомство, МПК В61G1/24. Vorrichtung zum entkuppeln einer langgemachten schraubenkupplung [Устройство для расцепления длинной винтовой сцепки]; № 16166741.5: заявл. 22.04.2016; опубл. 23.11.2016 / Patrick Harrer, Mathias Hattinger, Martin Pachler, Christoph Zellner; заявитель: FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH. — 12 с.
11. Патент 212861458 U Китайская Народная Республика, МПК В61G 7/04, В25J 11/00. Train unhooking robot system [Роботизированная система расцепки состава]; № 202021983274 .4: заявл. 11.09.2020; опубл. 02.04.2021 / YAO XIN, XIANG JIANG, LI YAN, ZHANG YANZHAO, LI CHAO, WANG RUGUI, YANG TAO, HUANG SHUGUANG, YANG XINHANG, CUI YUHUA, FANG HAITAO, WANG WEIYAO, SHAN NI; заявитель Shanghai Cool Robot Co Ltd. — 8 с.
12. Патент 211617712 U Китайская Народная Республика, МПК В61G 7/04. Unhooking robot system for railway hump operation [Роботизированная система отцепления для эксплуатации железнодорожной горки]; № 201922371071.3: заявл. 26.12.2019;

опубл. 02.10.2020 / ZHANG XIAOQIANG, MA YUKUN, AN DI, HU GAN, LI KEJIA, BAO LUKUN, CHE DEHUI, ZHANG LIANG, ZHANG DEFU, REN JIANZHONG, LI YANG, MA BIN, YU WANG, YANG LIN, ZHAO QINGYU, YANG GUANGWEI; заявитель Shenyang Qihui Robot Application Technology Co Ltd China Academy of Railway Sciences Corp Ltd CARS China Railway Shenyang Group Co Ltd Transportation and Economics Research Institute of CARS. — 16 с.

13. Патент 114802335 A Китайская Народная Республика, МПК В61G 7/04, В61Н 13/00, В61D 15/00. Pin pulling and air pipe picking robot for train couplers [Робот для вытягивания штифтов и подбора воздушных труб для сцепок поездов]; № 202210300236 .1: заявл. 25.03.2022; опубл. 29.07.2022 / HUANG SHUGUANG,

YANG TAO, WANG RUGUI, YANG XINHANG; заявитель Beijing Huili Intelligent Technology Co Ltd. — 10 с.

14. Патент 10471976 B2 Соединенные Штаты Америки, МПК В61G 7/04, В25J 5/00, G05D 1/02. Railway maintenance device [Устройство для обслуживания железных дорог]; № 15 / 201,336: заявл. 01.07.2016; опубл. 12.11.2019 / Zahid F. Mian; заявитель International Electronic Machines Corp. — 27 с.
15. Патент № 2450946 С1 Российская Федерация, МПК В61G 7/04. Система авторасцепки вагонов на сортировочной горке: № 2010151130/11: заявл. 14.12.2010: опубл. 20.05.2012 / В. Б. Свердлов, С. Г. Акмалов, Г. Ю. Иргер; заявитель Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». — 12 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 1, pp. 16–29
DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-16-29

Simulation Modeling of the Robotic System Operations Designed for Parallel Train Break-Up on Automated Humps

Information about authors

Kudyukin V. V., Deputy General Director. E-mail: v.kudyukin@vniias.ru

Vukolov A. V., Head of the Scientific and Technical Complex of Intelligent Control and Management Systems. E-mail: a.vukolov@vniias.ru

Kuz'min V. S., PhD in Engineering, Leading Specialist of the Department of Technological Support and Robotics of the Center for Robotization of Technological Processes of the Scientific and Technical Complex of Intelligent Monitoring and Control Systems. E-mail: vs.kuzmin@vniias.ru

JSC Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication in Railway Transport (JSC NIIAS), Moscow

Abstract: Within the framework of the Digital Railway Terminal Concept, it is expected to create robotic complexes that provide automatic train break-up and wagon uncoupling at a sorting hump. This article deals with the issue of selecting technical and operational characteristics and algorithm for a mobile platform moving part of such a robotic complex. The article describes the developed mathematical model that takes into account various options of the mobile platform movements. Using the developed model, various designs of the robotic complex mobile platform have been compared including those by a number of consecutively formed wagon cuts. The simulation has shown that a greater number of consecutively formed wagon cuts can be achieved by increasing the speed and acceleration of the mobile platform carriage, as well as by using a more complex algorithm for the mobile platform carriage. This requires the use of an additional fixed track sensor designed for measuring the distance between the current carriage ordinates and automated couplers to be uncoupled.

Keywords: marshaling yard; hump; robotic complex; train break-up from hump; technical and operational characteristics.

References

1. Dudorov E. A., Kotova K. A., Kudyukin V. V., Zhidenko I. G. Robototexnicheskie komplekсы dlya obsluzhivaniya podvizhnogo sostava [Robotic systems for servicing rolling stock]. *Vestnik Instituta problem estestvenny`x monopolij: Tekhnika zheleznny`x*

dorog [Bulletin of the Institute for Problems of Natural Monopolies: Railway Engineering], 2022, l. 1(57), pp. 50–55. (In Russian)

2. Kudyukin V. V., Dudorov E. A., Vukolov A. V., Kotova K. A. Robotizaciya kak e`lement cifrovoy transformacii [Robotization as an element of digital transformation]. *Zheleznodorozhny`j transport* [Railway transport], 2022, l. 5, pp. 19–23. (In Russian)
3. Dudorov E. A., Kotova K. A. Sistema upravleniya manipulyatorom robototexnicheskogo kompleksa dlya obsluzhivaniya mexanizmov scepki i tormoznoj sistemy` zheleznodorozhny`x vagonov [Manipulator control system for a robotic complex for servicing coupling mechanisms and braking systems of railway cars]. *Aktual`ny`e problemy` sovremennoj nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Current problems of modern science, technology and education], 2021, vol. 12, l. 1, pp. 58–64. (In Russian)
4. Suyunbaev Sh. M. Ustrojstvo po avtomaticheskoj rascepkе vagonov pri rasformirovanii sostavov na sortirovochnoj gorke [Device for automatic uncoupling of cars when disbanding trains at a sorting hump]. *Proceedings of Conference «Zheleznodorozhny`j podvizhnoj sostav: problemy`, resheniya, perspektivy`»* [Railway rolling stock: problems, solutions, prospects]. Tashkent, April 20–23, 2022, pp. 161–165. (In Russian)
5. Pat. 2410262 (RU). *Ustrojstvo dlya avtomaticheskogo rascepleniya avtoscepok dvizhushhixsya vagonov* [Pat. 2410262 (RU). Device to automatically disconnect running car automatic couplers], 2011.
6. Pat. 208417 (RU). *Promy`shlenny`j robot dlya avtomaticheskogo rascepleniya dvizhushhixsya gruzovy`x vagonov* [Pat. 208417 (RU). Industrial robot for automatic uncoupling of moving freight wagons], 2021.
7. Pat. 2700208 (RU). *Ustrojstvo dlya avtomaticheskogo rascepleniya vagonov dvizhushhixsya poezdov* [Pat. 2700208 (RU). Device for automatic disengagement of cars of moving trains], 2019.
8. Pat. 2728968 (RU). *Sposob avtomaticheskogo rascepleniya avtoscepok dvizhushhixsya vagonov i ustrojstvo ego osushhestvleniya* [Pat. 2728968 (RU). Method for automatic disengagement of automatic couplings of moving cars and device for its implementation], 2020.
9. Pat. 216043 (RU). *Ustrojstvo avtomaticheskogo rascepleniya vagonov* [Pat. 216043 (RU). Device for automatic uncoupling of wagons], 2023.
10. Pat. 3095666 (EP). *Vorrichtung zum entkuppeln einer langgemachten schraubenkupplung*, 2016.
11. Pat. 212861458 (CN). *Train unhooking robot system*, 2021.
12. Pat. 211617712 (CN). *Unhooking robot system for railway hump operation*, 2020.
13. Pat. 114802335 (CN). *Pin pulling and air pipe picking robot for train couplers*, 2022.
14. Pat. 10471976 (US). *Railway maintenance device*, 2016.
15. Pat. 2450946 (RU). *Sistema avtorasceпки vagonov na sortirovochnoj gorke* [Pat. 2450946 (RU). Automatic system to uncouple cars on hump yard], 2012.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА СКОРОСТИ НАЧАЛА АКВАПЛАНИРОВАНИЯ В АЛГОРИТМАХ БЕСПИЛОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ

КУВЕРИН Игорь Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: igorkuv@mail.ru

ГУСЕВА Инна Андреевна, аспирант; e-mail: guseva11.ia@yandex.ru

ГУСЕВ Сергей Александрович, д-р экон. наук, профессор, заведующий кафедрой; e-mail: o051nm@yandex.ru

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., кафедра «Организация перевозок, безопасность движения и сервис автомобилей», Саратов

В статье представлена аналитическая модель расчета скорости начала аквапланирования автотранспортного средства с учетом текущих дорожных условий. Актуальность исследования обусловлена высокой долей дорожно-транспортных происшествий, связанных с нарушением скоростного режима движения в неблагоприятных погодных условиях. Авторами разработана математическая модель, основанная на интегральных уравнениях сохранения массы и импульса, учитывающая геометрические параметры шины, характеристики водяной пленки и дорожного покрытия. Предложенная модель позволяет рассчитать критическую скорость начала аквапланирования для конкретного транспортного средства. В статье приведены результаты расчетного моделирования исследования влияния различных факторов на скорость начала аквапланирования по разработанной модели. Результаты исследования могут быть использованы для повышения безопасности дорожного движения, в том числе при эксплуатации беспилотных транспортных средств, проектировании транспортной инфраструктуры, проведении автотехнической экспертизы, а также для обеспечения безопасного взлета и посадки летательных аппаратов самолетного типа.

Ключевые слова: аквапланирование; безопасность дорожного движения; критическая скорость движения; математическое моделирование; дорожные условия; водяная пленка на дорожном покрытии; беспилотные транспортные средства.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-30-54

▼ Введение

Организация безопасности дорожного движения как комплекс мер по поддержанию заданного уровня обслуживания дорожного движения включает в себя вопросы помощи водителю в поддержании безопасных режимов движения с учетом состояния дорожного покрытия, погодных условия и других факторов. Согласно статистике, большое количество дорожно-транспортных происшествий (ДТП) происходит под влиянием неблагоприятных климатических факторов, а именно: атмосферных осадков, таяния льда и снежного покрова. Так, по статистике Российской Федерации за 2023 год, только в зимние месяцы причиной 15 % ДТП с выездом на полосу, предназначенную для встречного движения, стала мокрая дорога [1]. Для повышения безопасности дорожного движения (БДД) в условиях воздействия указанных факторов необходимо ограничение скорости между автотранспортными средствами до

безопасных значений. В 2023 году почти пятая часть (19,7 %, или 26 106) [1] всех ДТП была связана с нарушением скоростного режима движения. На данные происшествия пришлось более четверти (26,8 %, или 3 881) погибших и почти пятая часть (19,9 %, или 33 174) раненых [1]. При этом количество ДТП возросло на 8,6 %, число погибших — на 2,2 %, раненых — на 8 % [1]. Рост показателей аварийности отмечается пятый год подряд. ДТП, связанные с нарушением скоростного режима движения, включают происшествия, произошедшие из-за несоответствия скорости конкретным условиям движения (92 %) и превышения установленной скорости движения (8 %).

В связи с этим особую актуальность приобретает определение безопасной скорости движения автотранспортных средств при текущем состоянии дорожного покрытия [2]. При наличии водяной пленки на поверхности дорожного покрытия и определенной скорости

движения возможна потеря управляемости вследствие влияния аквапланирования. Явление аквапланирования заключается в отрыве колеса от дорожного покрытия под действием водяного клина и потере управляемости вследствие отсутствия контакта между колесом и дорогой. Скорость начала аквапланирования зависит от целого ряда факторов, основные из которых — толщина водяной пленки, нагрузка на колесо, геометрические параметры колеса и др. В связи с этим объективная оценка водителем скорости начала аквапланирования затруднительна, так как базируется в основном на опыте профессиональной деятельности, что позволяет сформулировать задачу об актуальности расчетного определения данной скорости для конкретного автотранспортного средства в текущих дорожных условиях.

Особую актуальность данная задача приобретает для организации движения беспилотных автотранспортных средств, так как ее решение позволяет разработать алгоритмы управления движением с учетом обеспечения безопасных режимов. Одновременно с указанными вопросами задача обеспечения БДД может решаться не только в процессе эксплуатации автотранспортных средств, но и при проектировании транспортной инфраструктуры. При этом наличие достоверных методов определения скорости начала аквапланирования позволит выявить опасные участки и предотвратить потенциальное возникновение ДТП в ходе проектирования наложением эффективного стока воды, ограничением скорости движения, подбором способов и методов обслуживания дорожного покрытия. Объективная оценка явления аквапланирования имеет большое значение при проведении автотехнической экспертизы для установления истинных причин ДТП и наказания виновных. Точная оценка безопасной скорости движения до начала аквапланирования может не только повысить уровень БДД, но и подобрать максимально возможный с точки зрения безопасности скоростной режим, тем самым повысив экономические показатели транспортного процесса и уровень обслуживания дорожного движения. Также методика определения скорости начала аквапланирования может

использоваться в обеспечении безопасного взлета и посадки атмосферных и аэрокосмических летательных аппаратов самолетного типа.

Целью работы является создание уточненной модели расчета скорости начала аквапланирования конкретного автотранспортного средства в текущих дорожных условиях. Задачи исследования: провести анализ существующих методических подходов к определению скорости начала аквапланирования автотранспортных средств; научно обосновать необходимость учета толщины водяной пленки, нагрузки на колесо, геометрических параметров колеса при расчетах; разработать уточненную модель расчета скорости начала аквапланирования с учетом параметров конкретного автотранспортного средства и текущих дорожных условий; разработать программное обеспечение для автоматизированного расчета на основе разработанной модели.

1. Существующие способы определения скорости начала аквапланирования

Существует несколько подходов к расчету скорости начала аквапланирования, каждый из которых имеет свои особенности и применимость в зависимости от условий исследования и доступных данных.

1. Расчет на основе экспериментальных данных.

Этот подход основывается на результатах экспериментов, в которых моделируются реальные условия движения автомобиля по мокрой поверхности. Экспериментальные данные позволяют учесть множество факторов, влияющих на аквапланирование, например, состояние дорожного покрытия, тип и износ шины [3].

Экспериментальные методы расчета скорости начала аквапланирования основываются на обработке данных, полученных в ходе испытаний шин в реальных условиях или на специально оборудованных полигонах. Эти методы позволяют учесть множество факторов, связанных с поведением автомобиля на мокрой дороге, таких как давление в шинах, глубина протектора, толщина водяного слоя и характеристики дорожного покрытия. На основании этих данных были разработаны несколько эмпирических моделей, наиболее известные из которых [4]: Галлауэя, PAVDRN, Университета

Южной Флориды (USF), NASA (модель Horne-Dreher, по именам авторов — Уильяма Хорна и Роберта Дрехера), Общества автомобильных инженеров (SAE), Horne-Lane (разработана инженерами NASA Уильямом Хорном (William Horne) и Джоном Лейном (John Lane)). Каждая из этих моделей имеет свои особенности и ограничения, однако для всех них можно выделить общие недостатки:

- ограниченность данных. Экспериментальные модели строятся на основе данных, собранных в определенных условиях (например, на конкретных типах шин и дорожных покрытиях). Это ограничивает их универсальность — такие модели могут быть менее точными при условиях, отличающихся от тех, что использовались в испытаниях;
- простота уравнений. Большинство эмпирических моделей используют относительно простые формулы с эмпирическими коэффициентами, которые не всегда могут адекватно описать сложное взаимодействие шины и водной пленки. Это упрощение может приводить к ошибкам в расчетах при сложных условиях, таких как неровности дорожного покрытия или изношенные шины;
- невозможность учета всех факторов. Экспериментальные модели часто не могут учесть все факторы, влияющие на аквапланирование.

2. *Расчет на основе совместного использования вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics — CFD) и конечномерного анализа (Finite Element Analysis — FEA).*

Конечномерный анализ (методы конечных элементов) и вычислительная гидродинамика позволяют детализировано моделировать взаимодействие колеса с водной поверхностью, учитывая сложные геометрические и физические параметры.

Совместное использование подходов CFD и FEA представляет собой наиболее точный и детализированный подход для определения скорости аквапланирования [5–9]. Этот метод позволяет учесть как гидродинамические процессы, связанные с движением воды под шиной, так и механическое поведение шины, включающее ее деформацию под воздействием нагрузок. В отличие от традиционных эмпирических моделей, которые используют упрощенные

уравнения, подход CFD и FEA позволяет моделировать сложные физические взаимодействия и получить более точные результаты.

К преимуществам сопряженного моделирования CFD и FEA относятся:

- высокая точность; сопряженное моделирование позволяет более точно моделировать сложные процессы аквапланирования, учитывая как гидродинамические, так и механические аспекты;
- гибкость; можно моделировать различные дорожные условия, типы шин и сценарии движения, что делает метод универсальным для различных ситуаций;
- визуализация: CFD и FEA позволяют получить наглядные данные о том, как вода распределяется под шиной, как шина деформируется и как изменяется контактная площадь. Это помогает глубже понять механизм аквапланирования;
- моделирование сложной геометрии: FEA позволяет учитывать сложную геометрию шины, включая протектор и материалы, что важно для точного предсказания поведения шины.

Недостатки данного подхода:

- высокие вычислительные затраты: сопряженное моделирование требует значительных вычислительных ресурсов и времени. Для проведения точных расчетов может потребоваться суперкомпьютер или кластер;
- сложность настройки: настройка граничных условий, геометрии и сетки требует высокой квалификации и опыта. Неправильно настроенные параметры могут привести к неверным результатам;
- долгое время расчета: из-за сложности моделирования и большого количества итераций между CFD и FEA расчеты могут занимать несколько дней или даже недель, особенно для детализированных моделей.

Сопряженное моделирование CFD и FEA является эффективным инструментом для анализа аквапланирования. Оно позволяет более точно предсказать скорость начала аквапланирования и учесть все ключевые факторы, влияющие на этот процесс. Хотя метод требует высоких вычислительных ресурсов и значительных затрат времени, его преимущества в

точности и гибкости делают его незаменимым для разработки шин, дорожных покрытий и систем безопасности автомобилей. В будущем развитие вычислительных технологий и совершенствование методов моделирования могут сделать данный подход более доступным для применения в повседневной практике и проектировании транспортных средств. Однако в настоящее время в условиях эксплуатации его применение практически невозможно.

3. *Расчет скорости начала аквапланирования на основе аналитических уравнений, выведенных из уравнений гидрогазодинамики.*

Аналитический подход основывается на применении уравнений гидродинамики для вычисления гидродинамической подъемной силы, действующей на колесо при его движении по водной поверхности. Этот метод позволяет определить скорость аквапланирования на основе базовых физических законов и параметров автомобиля, таких как нагрузка на колесо и характеристики дорожного покрытия. Он наиболее применим для теоретического анализа и построения моделей, позволяющих предсказать поведение автомобиля при различных условиях.

Достоинства аналитических методов:

- позволяют быстро оценить ключевые параметры системы без необходимости проведения сложных численных расчетов или экспериментов;
- обеспечивают глубокое понимание физических процессов, лежащих в основе явления аквапланирования;
- аналитические формулы могут быть легко интегрированы в более сложные модели или использованы для предварительного анализа.

Недостатки аналитических методов:

- часто основаны на упрощенных предположениях, что может приводить к значительным погрешностям в реальных условиях;
- не всегда учитывают сложные взаимодействия между различными факторами, такими как динамика автомобиля, свойства шин и дорожного покрытия;
- для повышения точности в ряде случаев требуется дополнение аналитических моделей экспериментальными данными или численными методами.

2. Модель скорости начала аквапланирования В. А. Ковалева, А. И. Фадеева, Е. С. Воеводина и др.

В модели скорости начала аквапланирования В. А. Ковалева, А. И. Фадеева, Е. С. Воеводина и др. [10] предложен аналитический метод расчета скорости начала аквапланирования, основанный на моделировании взаимодействия шины с водяной пленкой на дорожном покрытии. Метод базируется на гидродинамических принципах, учитывающих баланс сил, действующих на шину в условиях аквапланирования. Основная идея заключается в определении критической скорости, при которой гидродинамическое давление воды под шиной превышает давление контакта шины с дорогой, что приводит к потере сцепления.

Метод предполагает использование уравнения баланса сил, действующих на шину в продольном и поперечном направлениях. Основная формула, выведенная для расчета скорости начала глиссирования имеет вид:

$$V_{\text{гп}} = \sqrt{\frac{10^6 G_{\text{к}}}{h \lambda b_{\text{ш}} \frac{\pi}{2} \rho \eta}}, \quad (1)$$

где $G_{\text{к}}$ — нагрузка, передаваемая на дорожное покрытие от колеса;
 h — высота водного слоя воды;
 λ — степень увеличения глубины воды перед колесом;
 $b_{\text{ш}}$ — ширина беговой дорожки шины;
 ρ — плотность воды;
 η — коэффициент учета влияния рисунка протектора.

Достоинства метода:

1. Простота и наглядность: метод позволяет получить аналитическое выражение для критической скорости, что делает его удобным для использования в инженерных расчетах.
2. Универсальность: формула применима для различных типов шин и дорожных условий при условии корректного задания параметров.
3. Минимальные требования к входным данным: для расчета необходимы только основные параметры, такие как высота водного слоя воды, ширина беговой дорожки шины и др.

Недостатки метода:

1. Упрощенность модели: метод не учитывает ряд факторов, таких как форма протектора шины, неравномерность распределения давления в контактной зоне, а также динамические эффекты, возникающие при движении автомобиля.

2. Ограниченная точность: в реальных условиях толщина водяной пленки может варьироваться по длине контактного пятна, что не учитывается в предложенной модели.

3. Зависимость от эмпирических данных: для повышения точности расчетов требуется калибровка коэффициентов на основе экспериментальных данных, что ограничивает универсальность метода.

3. Модель скорости начала аквапланирования Г. Э. Шульца, Д. Э. Карри и А. Л. А. Симойнсома

Более совершенная модель аквапланирования предложена Г. Э. Шульцом, Д. Э. Карри и А. Л. А. Симойнсом [11]. Авторы предлагают гидродинамическую модель аквапланирования, которая фокусируется на поведении тонкой пленки воды между шиной автомобиля и дорожным покрытием. В отличие от более упрощенных моделей, эта модель стремится к более детальному описанию физических процессов, происходящих в зоне контакта шины и воды.

Модель рассматривает аквапланирование как результат формирования и поведения тонкой пленки воды под шиной. Эта пленка создается из-за того, что шина не успевает вытеснить воду из зоны контакта на высокой скорости.

Ключевым фактором аквапланирования является гидродинамическое давление, возникающее в пленке воды. Это давление создается движением шины и попыткой вытеснить воду. Если гидродинамическое давление становится достаточно высоким, оно может «поднять» шину над дорожным покрытием и привести к потере контакта.

Модель учитывает вязкость воды (сопротивление течению) и инерцию воды (сопротивление изменению скорости). Вязкость влияет на сопротивление движению воды и формирование давления, а инерция важна при высоких скоростях и быстром изменении условий.

Модель принимает во внимание геометрию зоны контакта между шиной и дорогой, включая форму шины и микрорельеф дорожного покрытия. Эти факторы влияют на распределение давления в водяной пленке и эффективность отвода воды.

Модель стремится к определению критической скорости аквапланирования, то есть скорости, при которой начинается значительная потеря сцепления из-за образования водяной пленки.

Модель основана на уравнениях гидродинамики, описывающих движение вязкой жидкости. Эти уравнения позволяют рассчитать распределение давления и скорости потока воды в пленке под шиной.

Конечные расчетные формулы, полученные авторами, имеют вид:

$$F_T = \sqrt{\frac{\pi M}{\Omega_1 \left(1 - \frac{b}{B}\right) \frac{H}{2} \left[r\sqrt{1 - (H - r)^2} - (H - r)\sqrt{1 - r^2} \right] + \Omega_2 H^{\Omega_3} \sqrt{1 - r^2}}}; \quad (2a)$$

$$F_T = \sqrt{\frac{\pi M}{\Omega_1 \left(1 - \frac{bt}{Bh}\right) \frac{H}{2} \left[r\sqrt{1 - (H - r)^2} - (H - r)\sqrt{1 - r^2} \right] + \Omega_2 H^{\Omega_3} \sqrt{1 - r^2}}}, \quad (2б)$$

где формула (2a) используется, когда толщина водяной пленки меньше или равна высоте водоотводящей канавки $h \leq t$, а формула (2б) используется, когда толщина водяной больше или равна высоте водоотводящей канавки $h \geq t$.

В формуле приняты следующие обозначения:

$F_T = V / \sqrt{(Rg)}$ — безразмерная скорость аквапланирования, названная авторами числом Фруда шины по аналогии с формой безразмерного параметра для открытых потоков, V — скорость автомобиля, R — радиус колеса;

$M = W / (\pi \rho g R^2 B)$ — безразмерная нагрузка, соотношение между нагрузкой и весом баллона с водой с размерами шины, ρ — плотность воды, B — ширина колеса;

$H = h / R$ и $r = R_R / R$ — это, соответственно, нормированная (по отношению к радиусу колеса) глубина водной пленки и коэффициент сжатия шины, R_R — радиус сжатой шины;

$\Omega_1 = 1 - \varphi$, φ — коэффициент разбрызгивания воды;

$\Omega_2 = \pi \Xi Y / 2$, Ξ — коэффициент полуэллиптической площади отрыва шины от дороги от максимально возможной $\Xi < 1$;

Y и Ω_3 — экспериментальные коэффициенты, учитывающие влияние толщины водяной пленки в зависимости от степени заполненности водой полуэллиптического пространства в пятне контакта на величину подъемной силы:

$$F_p = \frac{\pi \Xi Y}{2} \rho V^2 \left(\frac{h}{R} \right)^{\Omega_3} BR \sqrt{1 - \left(\frac{R_R}{R} \right)^2}, \quad (3)$$

где V — скорость автомобиля.

Преимущества модели:

1) физическая обоснованность: модель основана на фундаментальных принципах гидродинамики, что делает ее более физически обоснованной и потенциально более точной, чем эмпирические или упрощенные модели;

2) детальное описание водяной пленки: внимание к поведению тонкой пленки воды позволяет лучше понять механизм аквапланирования на микроскопическом уровне. Это может быть важно для разработки более эффективных мер по предотвращению аквапланирования;

3) учет вязкости и инерции воды, что делает модель более реалистичной, особенно для высоких скоростей и различных типов воды (например, с добавками);

4) возможность учета геометрии контакта: учет формы шины и микрорельефа дороги позволяет моделировать аквапланирование для различных типов шин и дорожных покрытий, что важно для практического применения;

5) потенциал для оптимизации: более глубокое понимание гидродинамики аквапланирования, полученное с помощью этой модели, может быть использовано для оптимизации конструкции шин и дорожных покрытий с целью снижения риска аквапланирования. Например, можно исследовать влияние рисунка протектора, водоотводящих каналов и текстуры дорожного покрытия;

6) модель аквапланирования, представленная в статье, является более продвинутой и физически обоснованной, чем многие упрощенные модели;

7) более точное прогнозирование критической скорости и условий аквапланирования: благодаря учету большего количества физических факторов (вязкость, инерция, геометрия контакта), модель потенциально способна более точно предсказывать критическую скорость аквапланирования для различных условий. Это включает в себя:

- разные типы шин: модель может быть адаптирована для анализа различных рисунков протектора, глубины канавок и геометрии шин, что позволяет оценить их эффективность в отводе воды и сопротивлении аквапланированию;
- разные типы дорожного покрытия: учет микрорельефа дорожного покрытия позволяет моделировать аквапланирование на различных типах асфальта, бетона, с разной степенью износа и текстурой;
- различные условия на дороге: модель может учитывать толщину водяной пленки, температуру воды (влияющую на вязкость), а также скорость автомобиля. Это позволяет создавать более реалистичные сценарии и оценивать риск аквапланирования в различных погодных условиях;
- нестационарные режимы: в отличие от стационарных моделей, гидродинамическая модель может быть адаптирована для анализа нестационарных режимов, таких как резкое торможение или маневрирование в

условиях аквапланирования, что важно для понимания динамики потери управления;

8) возможность анализа влияния различных параметров на аквапланирование: модель позволяет исследователям и инженерам систематически изучать влияние различных параметров на возникновение и развитие аквапланирования. Это, в свою очередь, открывает возможности для:

- оптимизации конструкции шин: модель может использоваться для виртуального тестирования различных вариантов рисунка протектора, формы канавок, материалов шин и их геометрии, с целью максимизации водоотвода и снижения гидродинамического давления. Это может привести к разработке более безопасных и эффективных шин;
- оптимизации дорожного покрытия: модель может помочь в разработке дорожных покрытий с улучшенными водоотводящими свойствами. Например, можно исследовать влияние пористости, текстуры и уклона дорожного покрытия на отвод воды и снижение риска аквапланирования;
- разработки систем активной безопасности: понимание механизмов аквапланирования, полученное с помощью модели, может быть использовано для разработки более совершенных систем активной безопасности автомобиля, таких как ABS, ESP и систем контроля тяги, которые могут более эффективно реагировать на потерю сцепления в условиях аквапланирования;
- разработки алгоритмов предупреждения: модель может быть использована для создания алгоритмов, которые, используя данные с датчиков автомобиля и дорожных условий, могут предупреждать водителя о повышенном риске аквапланирования и рекомендовать снижение скорости;

9) более глубокое понимание физических процессов: в отличие от эмпирических моделей, которые часто являются «черным ящиком», гидродинамическая модель обеспечивает более прозрачное и интуитивно понятное понимание физических процессов, происходящих в зоне контакта шины и воды. Модель позволяет выделить наиболее важные

факторы, влияющие на аквапланирование, и понять их взаимосвязь. Например, можно оценить относительную важность вязкости воды, скорости автомобиля и геометрии шины.

Однако рассматриваемой модели присущи и некоторые недостатки: скорость движения воды по водоотводящим канавкам задается равной скорости автомобиля. Таким образом, предполагается, что вода не перемещается относительно канавок, что не соответствует действительности, о чем свидетельствуют результаты экспериментальных исследований [12]. Кроме того, в конечных уравнениях присутствуют коэффициенты, которые должны определяться экспериментальным путем, что затрудняет использование метода. Также в данной модели отсутствуют поперечные замкнутые канавки.

4. Вывод аналитических зависимостей модели расчета скорости начала аквапланирования автотранспортного средства в текущих дорожных условиях

Основными уравнениями, описывающими процессы, происходящие при аквапланировании, являются интегральные уравнения сохранения массы и импульса в устойчивом состоянии, представленные уравнениями (4) и (5), соответственно.

$$\int_{sc} \rho \vec{V} d\vec{A} = 0, \quad (4)$$

где ρ — плотность жидкости;

\vec{V} — вектор скорости жидкости;

\vec{A} — вектор элементарной площади поверхности;

sc — контрольная поверхность (*surface control*).

Уравнение (4) утверждает, что для установившегося течения суммарный поток массы через замкнутую контрольную поверхность равен нулю. Другими словами, сколько массы входит в контрольный объем, столько же и выходит. Это справедливо, поскольку в установившемся состоянии масса внутри контрольного объема не изменяется со временем.

$$F_x = \int_{sc} V \rho \vec{V} d\vec{A}, \quad (5)$$

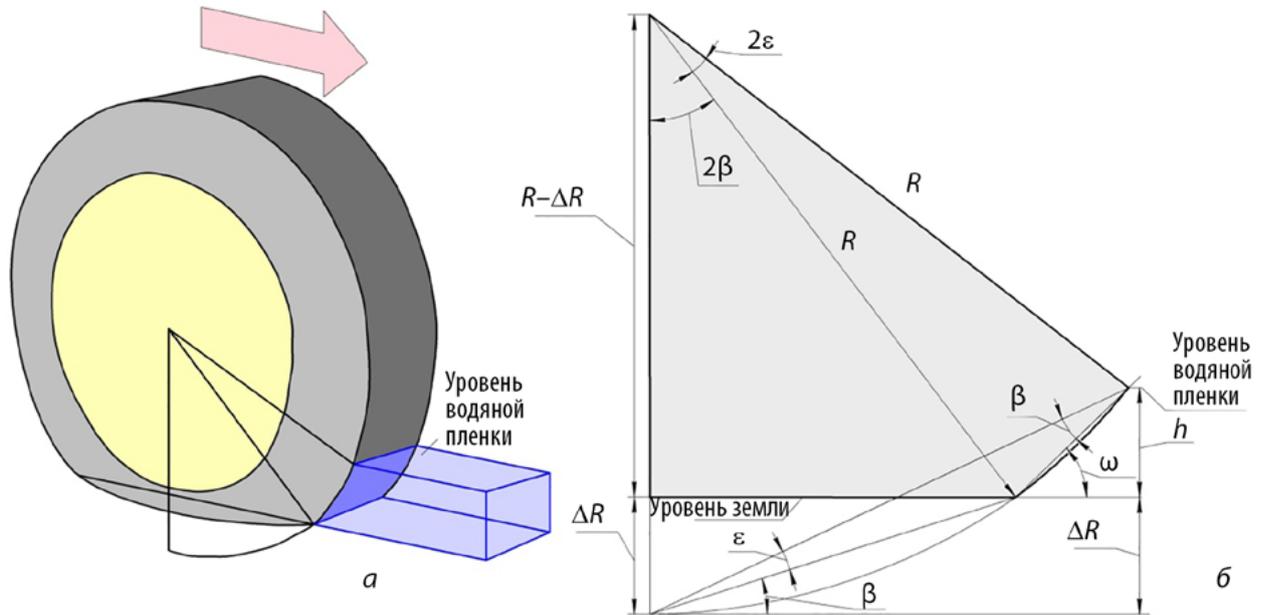


Рис. 1. а — Шина с вертикальным смещением (плоскостность) и движущаяся на фоне водяной пленки; б — Геометрические параметры, рассматриваемые в данном исследовании

где F_x — результирующая сила, действующая на жидкость в контрольном объеме в направлении оси x ;

V — скорость в направлении оси x .

Уравнение (5) утверждает, что результирующая сила, действующая на жидкость в контрольном объеме в направлении оси x , равна суммарному потоку импульса в этом направлении через контрольную поверхность. Импульс — это произведение массы на скорость. Таким образом, это уравнение связывает силы, действующие на жидкость, с изменением ее импульса.

Рассмотрим деформацию шины как податливый резервуар под давлением при воздействии заданной нагрузки. Деформированная шина показана на рис. 1, увеличенном для демонстрации геометрии и используемых здесь переменных. Последовательно на рис. 2 показан контрольный объем, принятый для настоящих расчетов.

Переменные, показанные на рис. 1 и 2, объясняются на эскизах. Из них η (рис. 2, в) — это количество дождевых канавок вдоль поверхности шины (протектора), а B — общая длина ширины шины, которая не касается земли. Переменная ω (рис. 1, б) называется углом атаки, соответствующим среднему углу,

образующемуся между поверхностью шины (протектора), погруженной в водную пленку, и землей, под воздействием которого шина продвигается относительно водной пленки. Как и в аэродинамике, его определение зависит от геометрических ориентиров. В настоящем исследовании он определяется как угол между хордой, образованной с помощью полного радиуса R (или свободного радиуса), и углом 2 (рис. 1, б), который ограничивает толщину водяной пленки h . Для краткости в тексте используется $R_r = R - R$ (рис. 1, б, 2, а), а R_r — это радиус сжатой шины. Для применения формулы контрольного объема предполагается, что вода движется поперечно продольному движению шины в областях, где шина соприкасается с дорожным покрытием. Другими словами, вода в контрольном объеме ускоряется и распространяется (разбрызгивается) поперечно, по боковым контрольным поверхностям (рис. 2, б, боковой выход). Из этого также следует, что по отношению к контрольному объему значения скорости на входе и выходе в передней и задней областях (рис. 2, в) движущегося объема, соответственно, являются скоростью V шины (или транспортного средства). Скорость поперечных брызг воды складывается с внешней продольной скоростью пленки, определяя

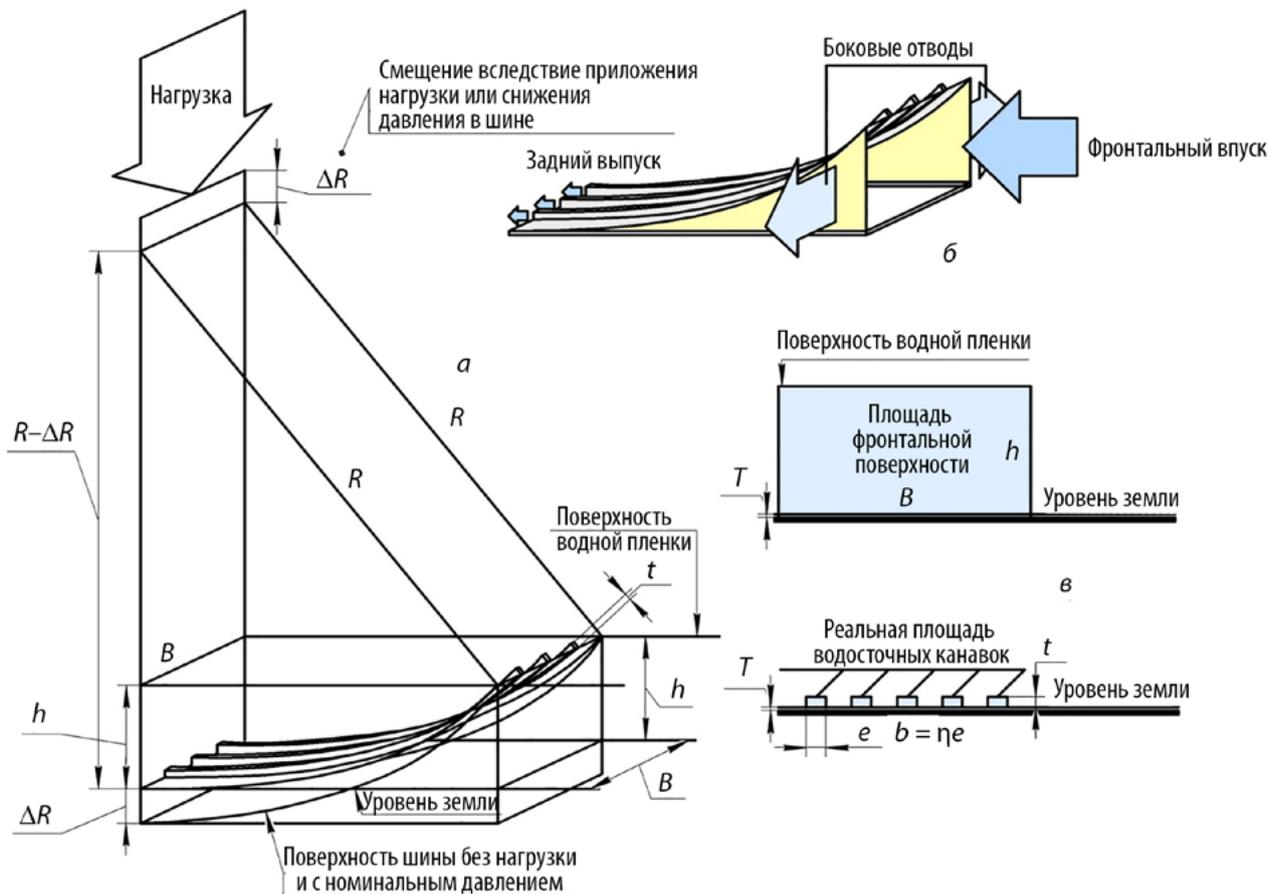


Рис. 2. а — 3D-эскиз вертикального смещения шины и водяной пленки; б — Контрольный объем, движущийся вместе с шиной; передняя и задняя контрольные поверхности, важные для данного исследования; в — Водоотводящие канавки.

скорость глissирования. Применение уравнения неразрывности (1) к контрольному объему на рис. 2, б и в приводит к следующим результатам:

$$V_{\text{боковая}} A_{\text{боковая}} = V A_{\text{фронтальная}} - V_{\text{задняя}} A_{\text{задняя}}, \quad (6a)$$

где A — площадь соответствующей (боковой, фронтальной или задней) поверхности водооттока или водопритока.

Тогда боковая скорость определяется как V :

$$V_{\text{боковая}} = \frac{V A_{\text{фронтальная}} - V_{\text{задняя}} A_{\text{задняя}}}{A_{\text{боковая}}}. \quad (6б)$$

Уравнение импульса (5), примененное к тому же контрольному объему для продольного направления и использующее уравнение (6б), приводит к:

$$\begin{aligned} \Sigma F_{\text{продольная}} &= m_{\text{фронтальная}} V(1-\varphi) - \\ &- m_{\text{задняя}} V_{\text{задняя}} (1-\varphi) = (1-\varphi) \times \\ &\times (Q_{\text{фронтальная}} V - Q_{\text{задняя}} V_{\text{задняя}}) \rho = \\ &= (1-\varphi) (A_{\text{фронтальная}} V^2 - A_{\text{задняя}} V_{\text{задняя}}^2) \rho. \end{aligned} \quad (7)$$

V — это продольная скорость в боковой зоне вблизи дна, связанная со скоростью автомобиля, но на которую влияют брызги воды, как показано на рис. 3. Коэффициент φ выражает это влияние.

Продольные компоненты соответствующих параметров для количественной оценки V показаны на рис. 4, продольный разрез движущегося контрольного объема. Указанная горизонтальная сила $J / (\sin \omega \cos \omega)$ имеет $J / \cos \omega$ в качестве составляющей, перпендикулярной наклонной поверхности управления, которая,

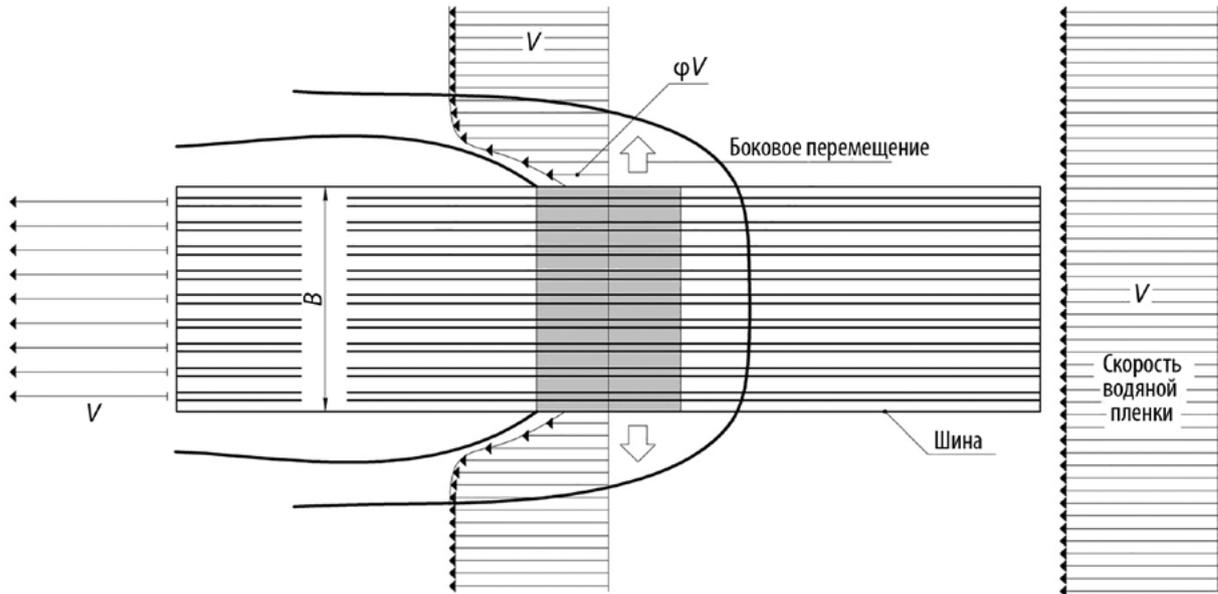


Рис. 3. Вид снизу на относительное движение между пленкой и шиной (скорость V). Боковой всплеск может повлиять на значение продольной скорости вдоль области влияния всплеска

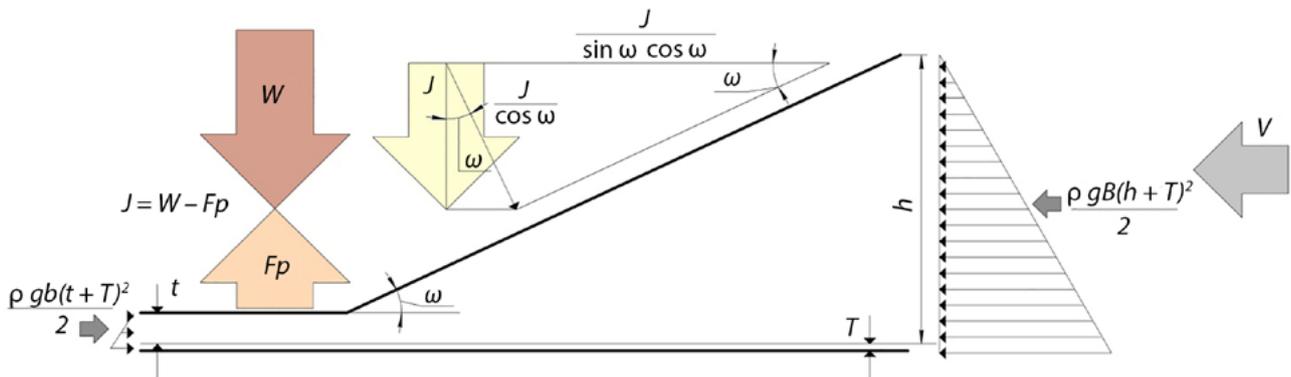


Рис. 4. Силы, действующие на контрольный объем и воду, приближающуюся со скоростью V

в свою очередь, имеет J , нагрузку автомобиля на шину (W) минус динамическое давление, действующее на деформированную поверхность подковообразного пятна контакта (F_p), в качестве вертикальной составляющей ($J = W - F_p$). F_p — называется подъемной силой следа. Таким образом, $J / (\sin \omega \cos \omega)$ — это сила, которая должна быть приложена в горизонтальном направлении для преодоления J за счет отклонения воды на наклонной поверхности. Гидростатические силы, связанные с водяными столбами, также показаны на рис. 4, но их величина намного меньше, чем импульс, передаваемый между водой и шиной при движении шины, и ими можно пренебречь. Необходимо обратить внимание на то,

что поверхность воды открыта для атмосферы, а передняя, задняя и боковые поверхности контрольного объема открыты, что позволяет воде проходить через них (рис. 2, б). Глубина текстуры T имеет минимальное влияние и ей можно пренебречь.

Подставляя результирующую продольную силу, показанную на рис. 4, в уравнение (7), используя $t = h$ для условия $h \leq t$, в то время как для условия $h > t$ само t остается неизменным, и переставляя члены, получаем для $h \leq t$:

$$\begin{aligned} & \frac{W - F_p}{\sin(\omega)\cos(\omega)} + \rho \frac{g}{2} [(bh)^2 - (Bh)^2] = \\ & = \rho(1 - \varphi)(BhV^2 - bhV_{\text{задняя}}^2). \end{aligned} \quad (8a)$$

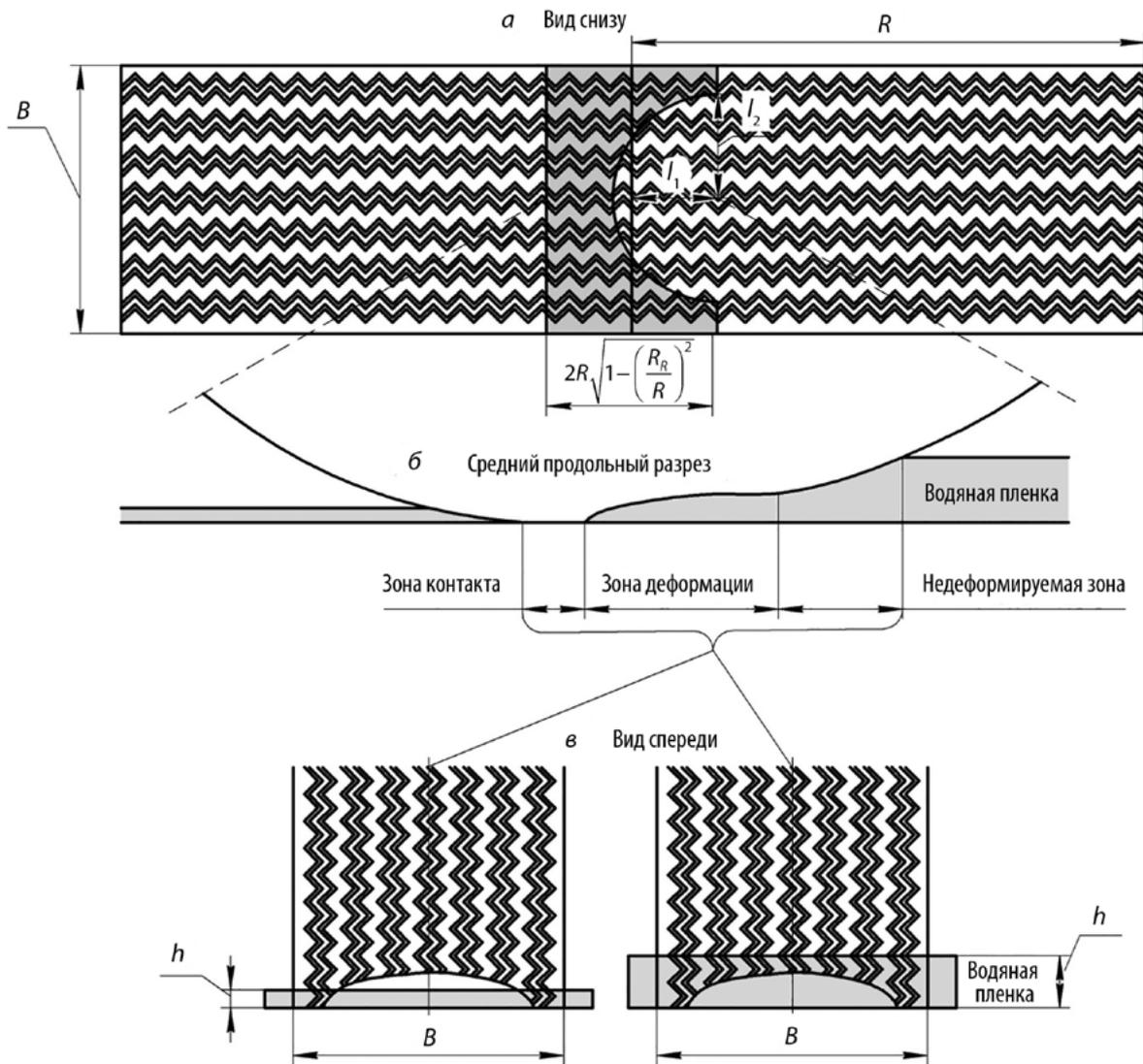


Рис. 5. Площадь пятна контакта, рассчитанная с использованием трех зон между шиной и дорожным покрытием

И для $h > t$:

$$A_{HS} = \frac{\pi l_1 l_2}{2}. \tag{9}$$

$$\frac{W - F_p}{\sin(\omega) \cos(\omega)} + \rho \frac{g}{2} [(bt)^2 - (Bh)^2] = \rho(1 - \phi)(BhV^2 - btV_{задняя}^2). \tag{8б}$$

A_{HS} — площадь подковы, а l_1 и l_2 — большой и малый радиусы (полуоси) эллипса. Для образования замкнутой области размер l_1 должен быть меньше продольного размера следа шины, т.е.:

$$l_1 < 2R\sqrt{1 - \left(\frac{R_R}{R}\right)^2}. \tag{10}$$

Аналогично, l_2 должно быть меньше полуширины шины, т.е.:

$$l_2 < \frac{B}{2}. \tag{11}$$

F_p получается путем умножения динамического давления $pV^2/2$ на площадь пятна контакта в деформированной нижней части шины. Для расчета F_p используется схема трех зон сопряжения шины с дорожным покрытием, показанная на рис. 5. Для подковообразного пятна контакта шины с опорной поверхностью можно принять полуэллиптическую форму, т.е.:

Из уравнений (9)–(11) следует, что:

$$A_{HS} < \pi BR \sqrt{1 - \left(\frac{R_R}{R}\right)^2}. \quad (12a)$$

Или

$$A_{HS} = \pi \Xi BR \sqrt{1 - \left(\frac{R_R}{R}\right)^2}, \text{ где } \Xi < 1.0. \quad (12б)$$

Учитывая, что при движении автомобиля возможен отрыв шины от дорожного покрытия (например, на неровностях дорожного покрытия), целесообразно силу F_p рассчитывать для всей нижней прямоугольной деформированной части шины:

$$F_p = \frac{\rho V^2}{2} 2BR \sqrt{1 - \left(\frac{R_R}{R}\right)^2} = \rho V^2 BR \sqrt{1 - \left(\frac{R_R}{R}\right)^2}. \quad (13)$$

Из геометрических размеров рис. 1, б получается следующее тождество:

$$\begin{aligned} \sin(\omega) \cos(\omega) &= \\ &= \frac{1}{2} \left[r \sqrt{1 - (H-r)^2} - (H-r) \sqrt{1-r^2} \right], \end{aligned} \quad (14)$$

где $r = \frac{R_R}{R}$ — коэффициент сжатия шины (отношение радиуса шины под нагрузкой к свободному радиусу шины).

Получим формулу для скорости аквапланирования при условии, что $h \leq t$.

1. Сначала подставим формулы (13) и (14) в формулу (8a):

$$\begin{aligned} & \frac{W - \rho V^2 BR \sqrt{1 - \left(\frac{R_R}{R}\right)^2}}{\frac{1}{2} \left[r \sqrt{1 - (H-r)^2} - (H-r) \sqrt{1-r^2} \right]} + \\ & + \rho \frac{g}{2} [bh^2 - Bh^2] = \\ & = \rho(1-\phi) (BhV^2 - bhV_{\text{задняя}}^2). \end{aligned} \quad (15)$$

2. Умножим обе части уравнения на

$$\frac{1}{2} \left[r \sqrt{1 - (H-r)^2} - (H-r) \sqrt{1-r^2} \right]:$$

$$\begin{aligned} & W - \rho V^2 BR \sqrt{1 - \left(\frac{R_R}{R}\right)^2} + \rho \frac{g}{2} [bh^2 - Bh^2] \times \\ & \times \frac{1}{2} \left[r \sqrt{1 - (H-r)^2} - (H-r) \sqrt{1-r^2} \right] = \\ & = \rho(1-\phi) (BhV^2 - bhV_{\text{задняя}}^2) \times \\ & \times \frac{1}{2} \left[r \sqrt{1 - (H-r)^2} - (H-r) \sqrt{1-r^2} \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

3. Сгруппируем члены с V^2 :

$$\begin{aligned} & -\rho V^2 BR \sqrt{1 - \left(\frac{R_R}{R}\right)^2} - \rho(1-\phi) BhV^2 \times \\ & \times \frac{1}{2} \left[r \sqrt{1 - (H-r)^2} - (H-r) \sqrt{1-r^2} \right] = \\ & = -W - \rho \frac{g}{2} [bh^2 - Bh^2] \frac{1}{2} \left[r \sqrt{1 - (H-r)^2} - \right. \\ & \left. - (H-r) \sqrt{1-r^2} \right] - \rho(1-\phi) bhV_{\text{задняя}}^2 \times \\ & \times \frac{1}{2} \left[r \sqrt{1 - (H-r)^2} - (H-r) \sqrt{1-r^2} \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

4. Вынесем V^2 за скобки:

$$\begin{aligned} & V^2 \left(\rho BR \sqrt{1 - \left(\frac{R_R}{R}\right)^2} + \rho(1-\phi) Bh \times \right. \\ & \left. \times \frac{1}{2} \left[r \sqrt{1 - (H-r)^2} - (H-r) \sqrt{1-r^2} \right] \right) = \\ & = W + \rho \frac{g}{2} [bh^2 - Bh^2] \frac{1}{2} \left[r \sqrt{1 - (H-r)^2} - \right. \\ & \left. - (H-r) \sqrt{1-r^2} \right] + \rho(1-\phi) bhV_{\text{задняя}}^2 \times \\ & \times \frac{1}{2} \left[r \sqrt{1 - (H-r)^2} - (H-r) \sqrt{1-r^2} \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

5. Окончательно выразим V :

$$V = \sqrt{\frac{W + \rho \frac{g}{2} [bh^2 - Bh^2] \frac{1}{2} \left[r\sqrt{1-(H-r)^2} - (H-r)\sqrt{1-r^2} \right] - \rho(1-\varphi)bhV_{\text{задняя}}^2 \frac{1}{2} \left[r\sqrt{1-(H-r)^2} - (H-r)\sqrt{1-r^2} \right]}{\rho BR \sqrt{1-\left(\frac{R_R}{R}\right)^2} + \rho(1-\varphi)Bh \frac{1}{2} \left[r\sqrt{1-(H-r)^2} - (H-r)\sqrt{1-r^2} \right]}}. \quad (19)$$

Это окончательное выражение для скорости V . Дальнейшее упрощение затруднительно из-за сложной структуры выражения и наличия различных параметров.

Для удобства можно обозначить выражение $\frac{1}{2} \left[r\sqrt{1-(H-r)^2} - (H-r)\sqrt{1-r^2} \right]$ как некоторую константу k , тогда формула примет вид:

$$V = \sqrt{\frac{W + \rho \frac{g}{2} [bh^2 - Bh^2] k + \rho(1-\varphi)bhV_{\text{задняя}}^2 k}{\rho BR \sqrt{1-\left(\frac{R_R}{R}\right)^2} + \rho(1-\varphi)Bhk}}. \quad (20)$$

Это позволит сделать формулу более компактной и удобной для дальнейших вычислений.

Получим формулу для скорости аквапланирования при условии, что $h \leq t$.

1. Сначала подставим формулу (13) для F_p в формулу (8б):

$$\frac{W - \rho V^2 BR \sqrt{1-\left(\frac{R_R}{R}\right)^2}}{\sin(\omega)\cos(\omega)} + \rho \frac{g}{2} [bt^2 - Bh^2] = \rho(1-\varphi)(bhV^2 - btV_{\text{задняя}}^2). \quad (21)$$

2. Подставим формулу (14) для $\sin(\omega)\cos(\omega)$:

$$\frac{W - \rho V^2 BR \sqrt{1-\left(\frac{R_R}{R}\right)^2}}{\frac{1}{2} \left[r\sqrt{1-(H-r)^2} - (H-r)\sqrt{1-r^2} \right]} + \rho \frac{g}{2} [bt^2 - Bh^2] = \rho(1-\varphi)(BhV^2 - btV_{\text{задняя}}^2). \quad (22)$$

3. Умножим обе части уравнения на $\frac{1}{2} \left[r\sqrt{1-(H-r)^2} - (H-r)\sqrt{1-r^2} \right]$:

$$\begin{aligned} & W - \rho V^2 BR \sqrt{1-\left(\frac{R_R}{R}\right)^2} + \rho \frac{g}{2} [bt^2 - Bh^2] \frac{1}{2} \left[r\sqrt{1-(H-r)^2} - (H-r)\sqrt{1-r^2} \right] = \\ & = \rho(1-\varphi)(BhV^2 - btV_{\text{задняя}}^2) \frac{1}{2} \left[r\sqrt{1-(H-r)^2} - (H-r)\sqrt{1-r^2} \right]. \end{aligned} \quad (23)$$

4. Сгруппируем члены с V^2 :

$$\begin{aligned} & -\rho V^2 BR \sqrt{1-\left(\frac{R_R}{R}\right)^2} - \rho(1-\varphi)BhV^2 \frac{1}{2} \left[r\sqrt{1-(H-r)^2} - (H-r)\sqrt{1-r^2} \right] = -W - \rho \frac{g}{2} [bt^2 - Bh^2] \times \\ & \times \frac{1}{2} \left[r\sqrt{1-(H-r)^2} - (H-r)\sqrt{1-r^2} \right] - \rho(1-\varphi)btV_{\text{задняя}}^2 \frac{1}{2} \left[r\sqrt{1-(H-r)^2} - (H-r)\sqrt{1-r^2} \right]. \end{aligned} \quad (24)$$

5. Вынесем V^2 за скобки:

$$V^2 \left(-\rho BR \sqrt{1 - \left(\frac{R_R}{R}\right)^2} - \rho(1 - \varphi) Bh \frac{1}{2} \left[r \sqrt{1 - (H - r)^2} - (H - r) \sqrt{1 - r^2} \right] \right) = -W - \rho \frac{g}{2} [bt^2 - Bh^2] \times \\ \times \frac{1}{2} \left[r \sqrt{1 - (H - r)^2} - (H - r) \sqrt{1 - r^2} \right] + \rho(1 - \varphi) bt V_{\text{задняя}}^2 \frac{1}{2} \left[r \sqrt{1 - (H - r)^2} - (H - r) \sqrt{1 - r^2} \right]. \quad (25)$$

6. Окончательно выразим V :

$$V = \sqrt{\frac{W + \rho \frac{g}{2} [bt^2 - Bh^2] \frac{1}{2} \left[r \sqrt{1 - (H - r)^2} - (H - r) \sqrt{1 - r^2} \right] + \rho(1 - \varphi) bt V_{\text{задняя}}^2 \frac{1}{2} \left[r \sqrt{1 - (H - r)^2} - (H - r) \sqrt{1 - r^2} \right]}{\rho BR \sqrt{1 - r^2} + \rho(1 - \varphi) Bh \frac{1}{2} \left[r \sqrt{1 - (H - r)^2} - (H - r) \sqrt{1 - r^2} \right]}}. \quad (26)$$

Это окончательное выражение для V . Упростить его дальше довольно сложно из-за наличия нескольких радикалов и сложных выражений в числителе и знаменателе.

Для удобства по аналогии с формулой (20) можно обозначить:

$$k = \frac{1}{2} \left[r \sqrt{1 - (H - r)^2} - (H - r) \sqrt{1 - r^2} \right]. \quad (27)$$

Тогда формула имеет вид:

$$V = \sqrt{\frac{W + \rho \frac{g}{2} [bt^2 - Bh^2] k + \rho(1 - \varphi) bt V_{\text{задняя}}^2 k}{\rho BR \sqrt{1 - r^2} + \rho(1 - \varphi) Bhk}}. \quad (28)$$

Это более компактная форма записи того же выражения.

В полученных формулах для нахождения скорости аквапланирования присутствует скорость воды, выходящей с задней части шины. Для ее нахождения используем уравнение Бернулли для потока воды через канавку относительно поверхности канавки. Для этого рассмотрим два сечения на входе в канавку и на выходе из канавки. В общем виде уравнение Бернулли выглядит следующим образом:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \Sigma h. \quad (29)$$

где z_1, z_2 — геометрические высоты на входе и выходе из канавки;

P_1, P_2 — давления на входе и соответственно на выходе из канавки;

v_1, v_2 — скорости на входе и соответственно на выходе из канавки;

Σh — суммарные потери напора:

$$\Sigma h = h_{\text{вх}} + h_{\text{вых}} + h_{\lambda}; \quad (30)$$

$h_{\text{вх}}$ — местные потери напора на входе в канавку;

$h_{\text{вых}}$ — местные потери напора на выходе из канавки;

h_{λ} — потери напора на трение;

ρ — плотность воды;

$$\rho = \frac{995,7}{0,984 + 0,483 \cdot 10^{-3} t_{\text{воды}}}, \quad (31)$$

где $t_{\text{воды}}$ — температура воды в °С.

Чтобы оценить давление на входе в канавку, можно рассмотреть устойчивый поток воды через протектор. Основное давление создается за счет «вдавливания» воды в канавку шиной, движущейся по мокрой поверхности. В соответствии с законом сохранения импульса давление на канавку по аналогии с (13):

$$P_1 = \rho V^2 (1 - \phi) / 2. \quad (32)$$

Местные потери напора определяют по формуле Вейсбаха [13]:

$$h_M = \zeta \frac{V^2}{2g}. \quad (33)$$

Примем $\xi_{\text{вх}} = 0,5$ для острых кромок. С учетом того, что вода вытекает на дорогу на пространство, свободное от воды, так как на скоростях движения автомобиля вода не успевает затечь обратно в образовавшуюся колею, принимаем согласно теореме Борда — Карно $\xi_{\text{вых}} = 1$ [14].

Для определения потерь напора на трение в потоках любой формы используем обобщенную формулу Дарси — Вейсбаха:

$$h_\lambda = \lambda \frac{\ell}{4R_r} \frac{V_{\text{ср}}^2}{2g}, \quad (34)$$

где R_r — гидравлический радиус;

λ — коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси).

Этот коэффициент зависит от числа Рейнольдса Re и от безразмерного геометрического фактора — относительной шероховатости Δ/d (или Δ/R_r , где R_r — гидравлический радиус канавки).

Здесь Δ — средняя высота бугорков неровностей (шероховатостей) внутри канавок).

Число Рейнольдса для потока любой произвольной формы:

$$Re = \frac{V_{\text{по канавке}} 4R_r}{\nu} = \frac{V_{\text{по канавке}} d_{\text{экв}}}{\nu}, \quad (35)$$

где R_r — гидравлический (эквивалентный) радиус;

$d_{\text{экв}}$ — эквивалентный (гидравлический) диаметр;

ν — кинематическая вязкость воды.

Здесь V — характерная скорость (для канавки — средняя по сечению скорость жидкости относительно стенок канавки), ν — кинематический коэффициент вязкости; $d_{\text{экв}}$ — некоторый характерный для данного потока линейный размер. Например, при движении в круглой трубе в качестве характерного размера выбирают диаметр трубы d .

Гидравлический радиус — это отношение площади поперечного сечения потока жидкости к длине смоченного периметра этого сечения:

$$R_r = S / \Pi, \quad (36)$$

где R_r — гидравлический радиус;

S — площадь поперечного сечения потока;

Π — длина смоченного периметра.

Гидравлическим радиусом канала произвольного сечения называют отношение площади поперечного сечения потока S к смоченному периметру Π . Смоченный периметр — это часть периметра сечения потока, которая контактирует со стенками канала или трубы. Таким образом, гидравлический радиус позволяет учесть как размер, так и форму поперечного сечения потока. Чем больше гидравлический радиус, тем при прочих равных условиях меньше будет гидравлическое сопротивление движению жидкости.

Для прямоугольной канавки со сторонами a и b

$$R_r = \frac{ab}{2(a+b)}, \quad d_3 = \frac{2ab}{a+b}. \quad (37)$$

По аналогии с прямоугольной канавкой:

при $h < t$

$$R_r = \frac{S}{\Pi} = \frac{eh}{(e+2h)}; \quad (38)$$

при $h \geq t$

$$R_r = \frac{S}{\Pi} = \frac{et}{2(e+t)}. \quad (39)$$

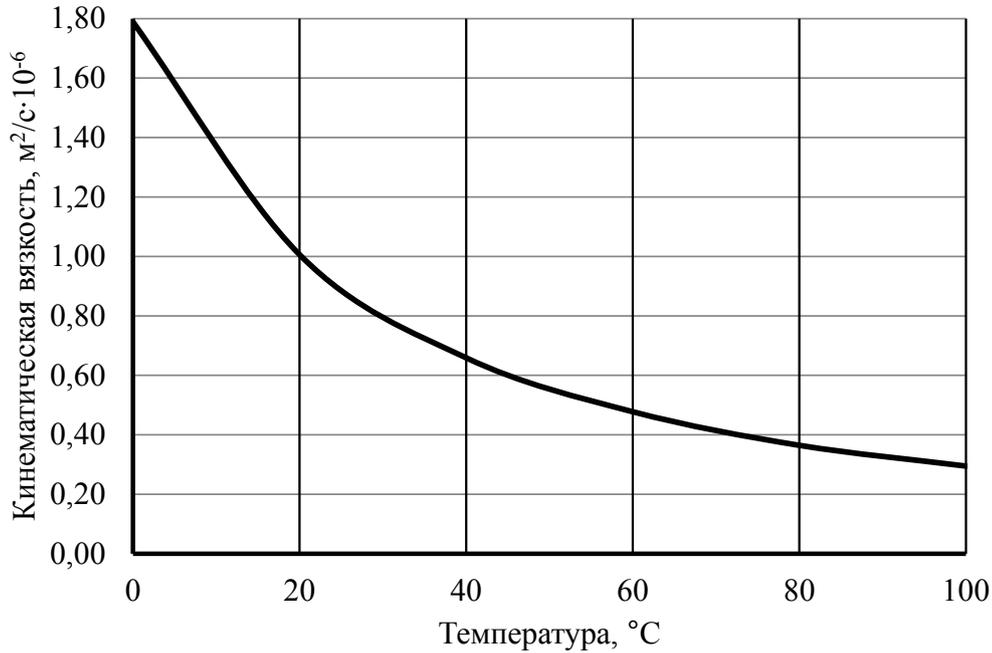


Рис. 6. Зависимость кинематической вязкости воды от температуры

Для определения коэффициента гидравлического сопротивления (коэффициента Дарси) в зависимости от числа Рейнольдса и шероховатости труб рассмотрим режимы течения жидкости согласно графику И. И. Никурадзе.

Этот коэффициент зависит от числа Рейнольдса Re и от безразмерного геометрического фактора — относительной шероховатости Δ/d (или Δ/r_0 , где r_0 — радиус трубы).

Кинематическая вязкость воды зависит от температуры (рис. 6) [15]. Для аппроксимации таблицы $\nu = f(t)$, рекомендуемой в настоящее время 26-ой Международной конференцией опытовых бассейнов (МКОБ) (таблица ИТТС 2011 г.)

$$\begin{aligned} \nu = & ((0,017128174t)^8 - (0,02125249t)^7 + \\ & + (0,02485816t)^6 - (0,028163366t)^5 + \\ & + (0,031412194t)^4 - (0,03529024t)^3 + \\ & + (0,041895224t)^2 - 0,06254897t + \\ & + 1,7920288) \cdot 10^{-6}. \end{aligned} \quad (40)$$

Также может быть использована эмпирическая формула Пуазейля:

$$\nu = \frac{0,0178}{(1 + 0,0337t + 0,000221t^2)}, \text{ см}^2/\text{с}, \quad (41)$$

где t — температура воды, °C.

Как известно, впервые наиболее исчерпывающей работы по определению λ были даны И. И. Никурадзе, который на основе опытных данных построил график зависимости $\lg(1000\lambda)$ от $\lg Re$ для ряда значений Δ/r_0 . Опыты Никурадзе были проведены на трубах с искусственно заданной шероховатостью, полученной путем приклейки песчинок определенного размера на внутренние стенки трубопровода. Результаты этих исследований представлены в виде графика И. И. Никурадзе, где построены кривые зависимости $\lg(1000\lambda)$ от $\lg Re$ для ряда значений Δ/r_0 [16].

Прямая 1 графика соответствует ламинарному режиму движения жидкости ($Re < 2300$).

Коэффициент гидравлического трения, который для ламинарного потока вычисляется по закону Гагена — Пуазейля:

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (42)$$

В зоне переходного режима от ламинарного к турбулентному ($2300 < Re < 4000$) А. М. Калякиным и Е. В. Чесноковой [17] предложена следующая зависимость, получившая экспериментальное подтверждение:

$$\lambda = \varphi(Re) = -53,27 + 130,57 \left(\frac{10}{\ln Re} \right) - 106,46 \left(\frac{10}{\ln Re} \right)^2 + 28,89 \left(\frac{10}{\ln Re} \right)^3. \quad (43)$$

Далее на графике можно рассматривать три области. Первая область — область малых Re и Δ/r_0 , где коэффициент λ не зависит от шероховатости, а определяется лишь числом Re (отмечена на графике И. И. Никурадзе прямой 2 [16]). Это область гидравлически гладких труб. Если число Рейнольдса лежит в диапазоне $4000 < Re < 10(d/\Delta_3)$, коэффициент λ определяется по полуэмпирической формуле Блазиуса:

$$\lambda_T = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (44)$$

Для определения λ существует также эмпирическая формула П. К. Конакова, которая применима для гидравлически гладких труб:

$$\lambda_T = \frac{1}{(1,81g Re - 1,5)^2}. \quad (45)$$

Во второй области, расположенной справа от линии 2, коэффициент λ зависит одновременно от двух параметров — числа Re и относительной шероховатости Δ/r_0 , которую можно заменить на Δ_3 . Для определения коэффициента λ в этой области может служить универсальная формула А. Д. Альтшуля:

$$\lambda_T = 0,11 \left(\frac{\Delta_3}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (46)$$

где Δ_3 — эквивалентная абсолютная шероховатость.

Третья область — область больших Re и Δ/r_0 , где коэффициент λ не зависит от числа Re , а определяется лишь относительной

шероховатостью (область расположена справа от пунктирной линии). Это область шероховатых труб, в которой все линии с различными шероховатостями параллельны между собой. Эту область называют областью автоточности, или режимом квадратичного сопротивления, так как здесь гидравлические потери пропорциональны квадрату скорости. Определение λ для этой области производят по упрощенной формуле Альтшуля:

$$\lambda_T = 0,11 \left(\frac{\Delta_3}{d} \right)^{0,25} \quad (47)$$

или по формуле Прандтля — Никурадзе:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_T}} = -2 \log \left(\frac{\Delta_3}{3,71d} \right). \quad (48)$$

Пользоваться приведенными в таблице формулами для определения коэффициента λ не всегда удобно. Для облегчения расчетов можно воспользоваться номограммой Колбрука — Уайта, при помощи которой по известным Re и Δ_3/d определяется λ . Для большей наглядности приведем данную диаграмму (рис. 7).

Так как мы рассматриваем прямоугольные канавки при расчетах коэффициента гидравлического сопротивления λ_T вместо диаметра принимаем эквивалентный диаметр:

$$d = d_{\text{экв}} = 4R_T.$$

Для нахождения относительной скорости потока воды через водоотводящую канавку подставим в уравнение Бернулли (29) все составляющие, содержащие данную скорость, при этом также учтем, что скорости на входе и на выходе из канавки равны $V_1 = V_2$:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + h = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + \sum h. \quad (49)$$

$$\frac{P_1}{\rho g} + h = \lambda \frac{l}{4R_T} \frac{V_{\text{отн}}^2}{2g} + \xi_{\text{вх}} \frac{V_{\text{отн}}^2}{2g} + \xi_{\text{вых}} \frac{V_{\text{отн}}^2}{2g}. \quad (50)$$

$$\frac{P_1}{\rho g} + h = \lambda \frac{l}{4R_T} \frac{V_{\text{отн}}^2}{2g} + \xi_{\text{вх}} \frac{V_{\text{отн}}^2}{2g} + \xi_{\text{вых}} \frac{V_{\text{отн}}^2}{2g}. \quad (51)$$

Определение коэффициента гидравлического трения

Режим движения	Число Рейнольдса		Определение λ
Ламинарный	$Re < 2300$		$\lambda = \frac{64}{Re}$ или $\lambda = \frac{75}{Re}$
Переходный	$2300 < Re < 4000$		$\lambda = \varphi(Re) = -53,27 + 130,57 \left(\frac{10}{\ln Re} \right) - 106,46 \left(\frac{10}{\ln Re} \right)^2 + 28,89 \left(\frac{10}{\ln Re} \right)^3$ (формула Калякина, Чесноковой)
Турбулентный	1-я область	$4000 < Re < 10 \frac{d}{\Delta_э}$	$\lambda_T = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$ (формула Блазиуса) $\lambda_T = \frac{1}{(1,8 \log Re - 1,5)^2}$ (формула Конакова)
	2-я область	$10 \Delta \frac{d}{\Delta_э} < Re < 560 \frac{d}{\Delta_э}$	$\lambda_T = 0,11 \left(\frac{\Delta_э}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$ (формула Альтшуля)
	3-я область	$Re > 560 \frac{d}{\Delta_э}$	$\lambda_T = 0,11 \left(\frac{\Delta_э}{d} \right)^{0,25}$ (формула Альтшуля) $\frac{1}{\sqrt{\lambda_T}} = -2 \log \left(\frac{\Delta_э}{3,71d} \right)$ (формула Никурадзе)

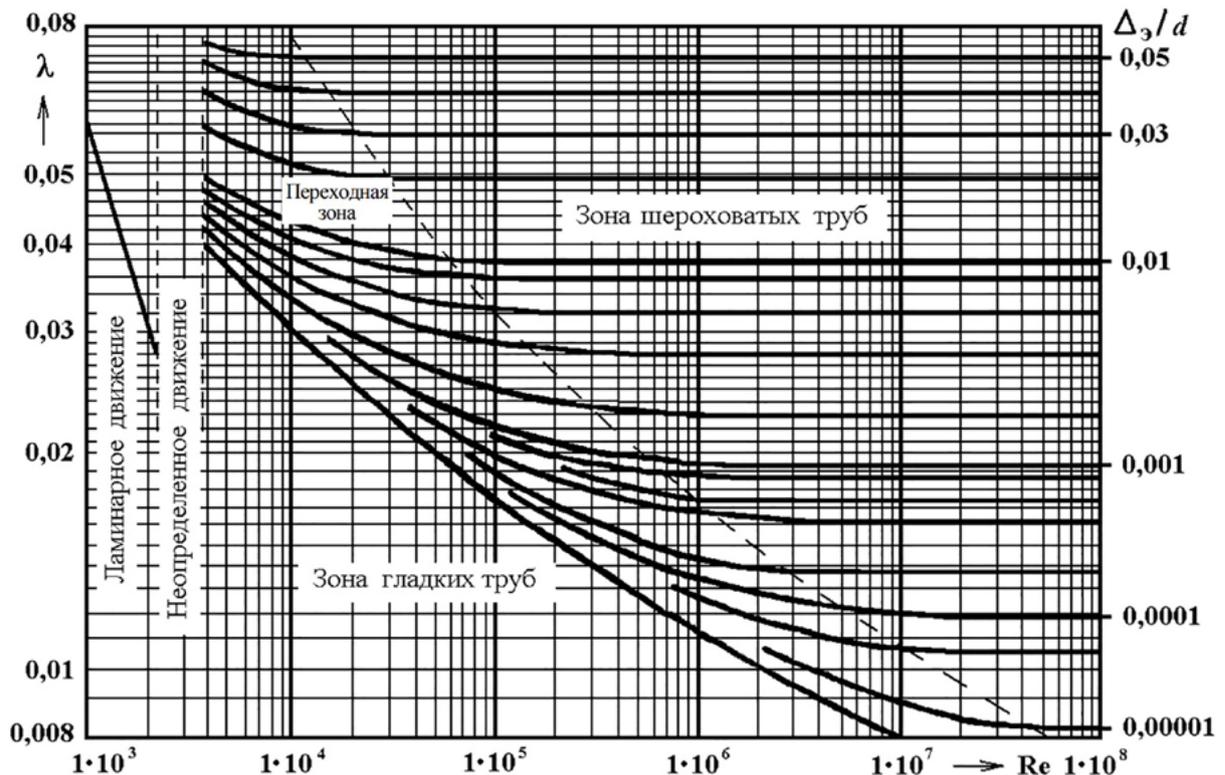


Рис. 7. Номограмма Колбрука – Уайта для определения коэффициента гидравлического трения

$$V_{\text{отн}} = \sqrt{\frac{\frac{P_1}{\rho g} + h}{\lambda \frac{l}{4R_1 2g} + \frac{\xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{вых}}}{2g}}}. \quad (52)$$

В формулах (50)–(52)

$$l = 2R\sqrt{1-r^2}.$$

Поскольку линейная скорость поверхности канавки относительно оси колеса равна скорости движения автомобиля V , выражение для скорости движения воды в канавке относительно оси колеса будет иметь вид:

$$V_{\text{в канавке}} = V + V_{\text{отн}}. \quad (53)$$

Далее находим расход воды через водоотводящую канавку. В общем случае расход жидкости определяется как произведение действительной скорости истечения V на фактическую площадь сечения:
при $h < t$:

$$Q = V_{\text{в канавке}} S = V_{\text{в канавке}} eh; \quad (54)$$

при $h > t$:

$$Q = V_{\text{в канавке}} S = V_{\text{в канавке}} et. \quad (55)$$

Далее с учетом того, что геометрические размеры канавок могут быть различны даже в пределах одной шины, находят расход жидкости для каждой i -й канавки и затем суммарный расход через все продольные водоотводящие канавки (задний выпуск на рис. 2):

$$Q_{\text{прод.}} = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (57)$$

где n — число канавок.

Кроме того, необходимо учесть, что на шине могут быть не только специальные водоотводящие канавки, но и другие типы канавок (например, поперечные), через которые вода будет также отводиться из пятна контакта, но в меньшей степени, так как она будет «заперта» в объеме канавки и не будет

перетекать из зоны высокого давления (передняя часть колеса) в зону пониженного давления (задняя или боковая поверхность колеса) относительно поверхности канавки. Для таких канавок введем понятие удельной площади канавок на единицу длины поверхности колеса $S_{\text{удельная}}$. Расход воды через замкнутые канавки составит:
при $h < t$:

$$Q_{\text{зам}} = VS_{\text{удельная}}h; \quad (58)$$

при $h > t$:

$$Q_{\text{зам}} = VS_{\text{удельная}}t. \quad (59)$$

Затем определяем суммарный поток через все типы канавок:

$$Q_{\text{задний}} = Q_{\text{прод}} + Q_{\text{зам}}. \quad (60)$$

Далее определяем среднюю скорость течения через все типы канавок относительно поверхности колеса (задний выпуск на рис. 2):

$$V_{\text{задняя по колесу}} = \frac{Q_{\text{задний}}}{S_{\text{заднего}}}, \quad (61)$$

где $S_{\text{заднего}}$ — площадь заднего выпуска (площадь всех канавок).

5. Расчетное моделирование влияния различных факторов на скорость начала аквапланирования

На основе разработанной модели составлена расчетная программа на языке Visual Basic for Application в среде MS Excel. Скриншот программы с примером расчета представлен на рис. 8.

Для выявления наиболее значимых факторов, влияющих на скорость начала аквапланирования автотранспортных средств, с помощью разработанной программы было проведено расчетное моделирование влияния различных факторов на скорость начала аквапланирования. Результаты моделирования представлены на рис. 9–13. При построении каждого графика менялся один из факторов, остальные

W (вес автомобиля, Н)	5000		
g (ускорение свободного падения, м/с ²)	9,81		
eta (число водоотводящих канавок)	4		
h (толщина водяной плёнки, м)	0,01		
e1 (ширина первой канавки, м)	0,01		
e2 (ширина второй канавки, м)	0,01		
e3 (ширина третьей канавки, м)	0,01		
e4 (ширина четвертой канавки, м)	0,01		
e5 (ширина пятой канавки, м)	0		
e6 (ширина шестой канавки, м)	0		
e7 (ширина седьмой канавки, м)	0		
e8 (ширина восьмой канавки, м)	0		
e9 (ширина девятой канавки, м)	0		
e10 (ширина десятой канавки, м)	0		
B (ширина протектора шины, м)	0,2		
t (глубина канавок, м)	0,01		
r (коэффициент сжатия шины)	0,98		
V (предполагаемая скорость аквапланирования, м/с)	10		
tводы (температура воды, °C)	20		
Формула (29) (коэффициент разбрызгивания воды)	0,05		
Rsh (радиус шины в свободном состоянии, м)	0,5		
Delta (эквивалентная абсолютная шероховатость, мм)	0,12		
S Удельная (удельная площадь канавок, м ² /м)	0,002		
Результаты расчета:			
V (скорость аквапланирования, м/с)	15,6834027		
Re (число Рейнольдса)	102 167		
rho (плотность воды)	1002,05302		
nu (кинематическая вязкость воды, м ² /с)	1,0034E-06		
V_ начальная (скорость при последнем приближении, м/с)	15,6833261		
P1 (давление на входе в канавку, Па)	117074,053		
lambda (коэффициент гидравлического трения)	0,03640726		
Q прод. (суммарный расход через продольные канавки)	0,01037468		
Q зам (расход через замкнутые канавки м ² /с)	0,00031367		
V_ Задняя (средняя скорость течения через все типы канавок, м/с)	26,7208588		
Режим потока	турбулентный, 3-я область		
Количество итераций	4		

Рис. 8. Скриншот программы расчета скорости начала аквапланирования

оставались неизменными и соответствовали значениям, приведенным на рис. 8.

Как видно из полученных результатов, наибольшее влияние на скорость начала

аквапланирования оказывает нагрузка на шину и коэффициент сжатия шины, который определяется давлением в шине и ее конструктивными особенностями.

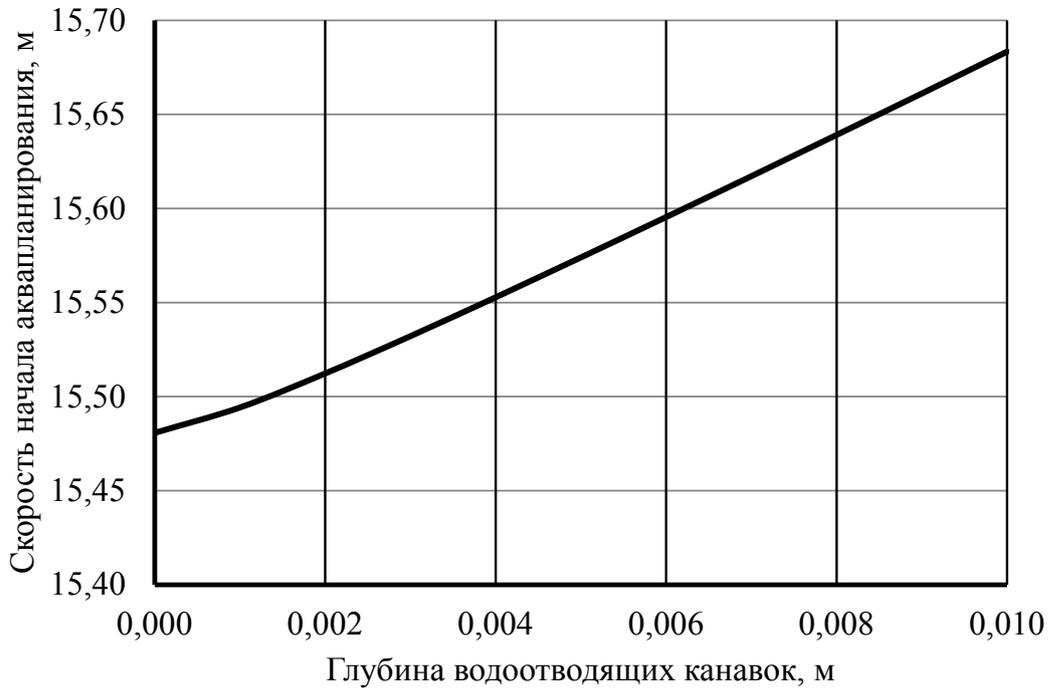


Рис. 9. Влияние глубины водоотводящих канавок на скорость начала аквапланирования

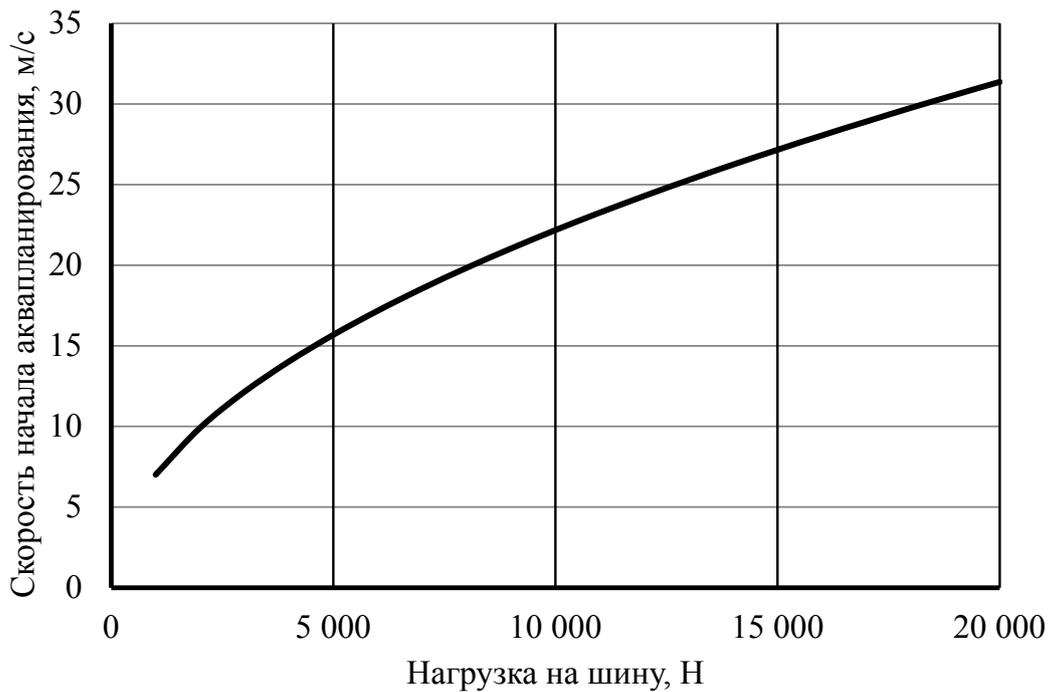


Рис. 10. Влияние нагрузки на шину на скорость начала аквапланирования

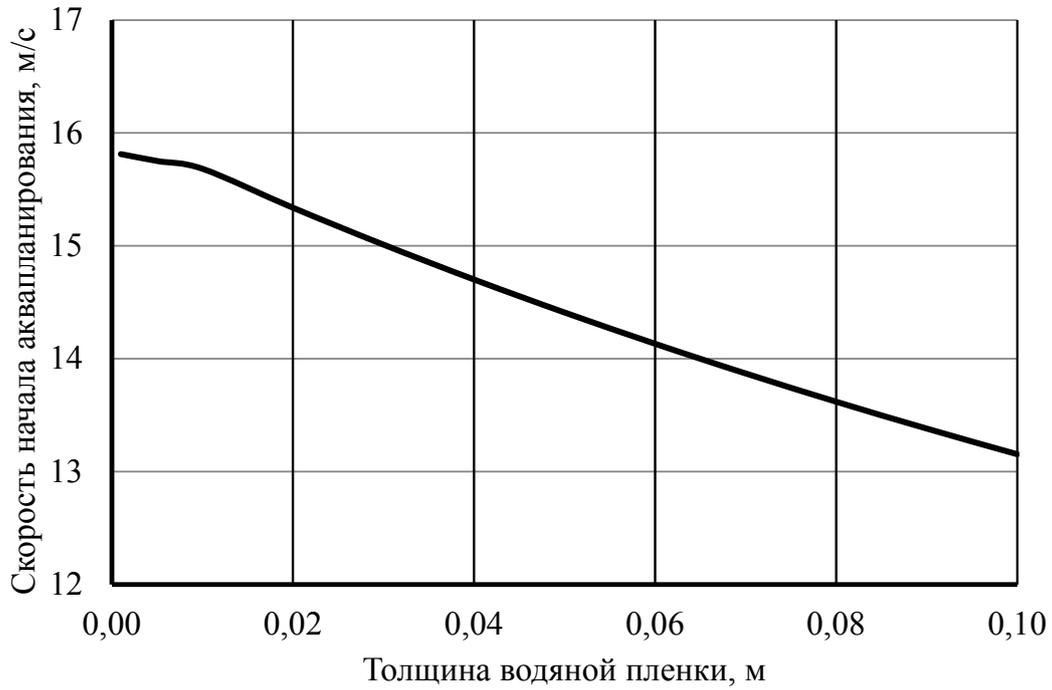


Рис. 11. Влияние толщины водяной пленки на скорость начала аквапланирования

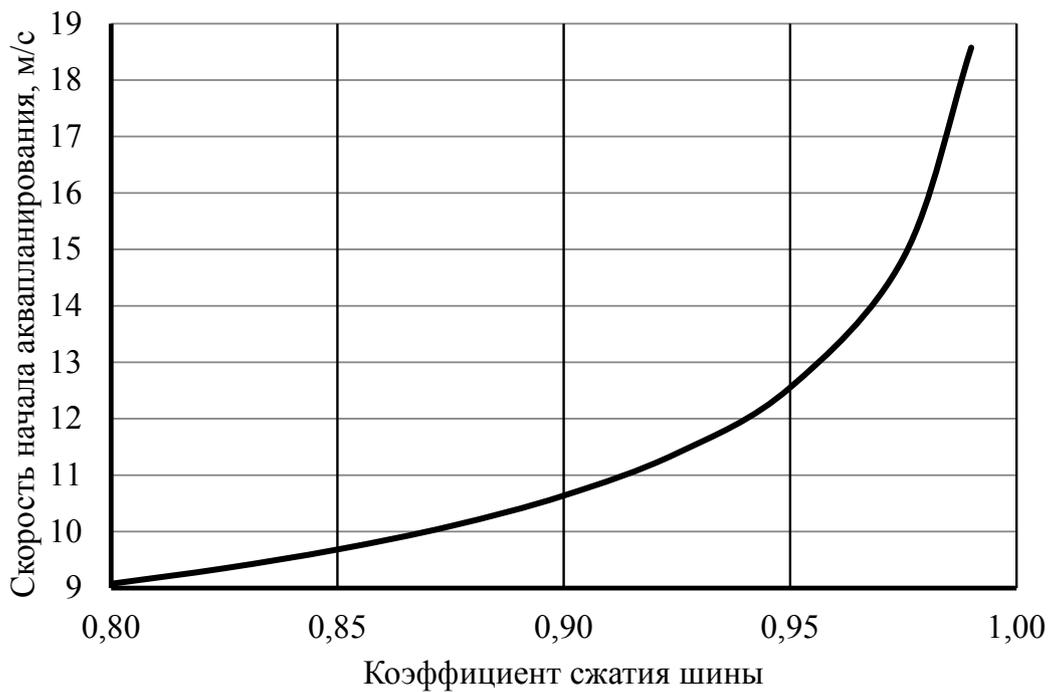


Рис. 12. Влияние коэффициента сжатия шины на скорость начала аквапланирования

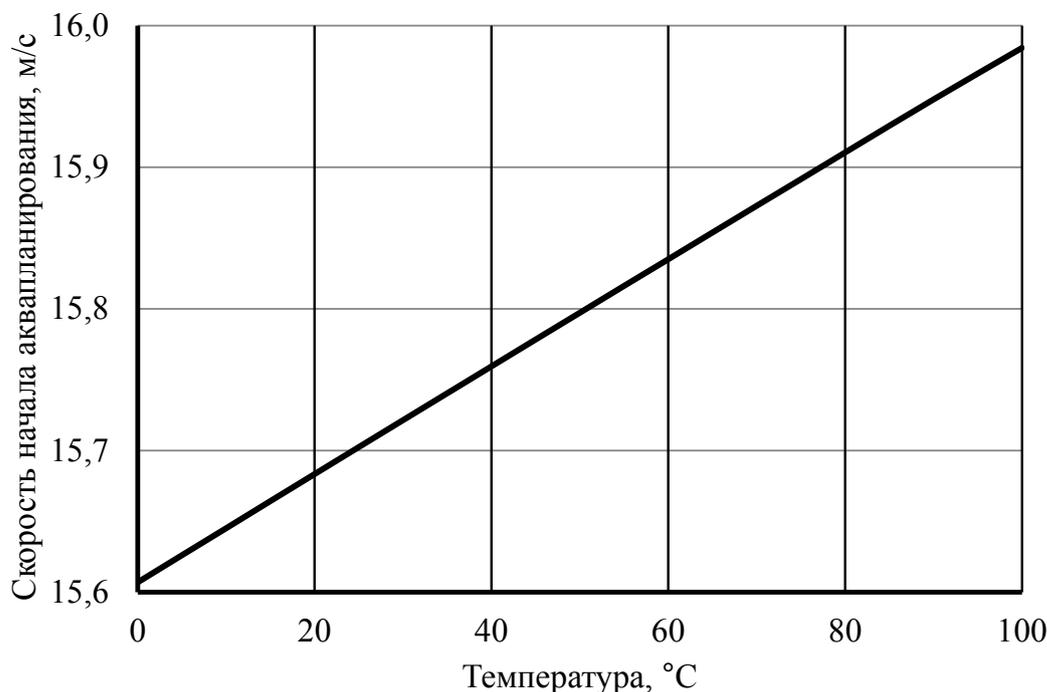


Рис. 13. Влияние температуры водяной пленки на скорость начала аквапланирования

Заключение

Представленный анализ существующих подходов к определению скорости начала аквапланирования выявил как их достоинства, так и недостатки. Эмпирические модели, основанные на экспериментальных данных, несмотря на свою практическую применимость в определенных условиях, не всегда способны учесть весь спектр факторов, влияющих на аквапланирование, и обладают ограниченной областью экстраполяции. В свою очередь, методы конечномерного анализа, хотя и обеспечивают высокую точность, требуют значительных вычислительных ресурсов и не всегда пригодны для оперативной оценки в реальном времени.

В этой связи разработка аналитической модели, основанной на фундаментальных уравнениях гидродинамики, представляется весьма перспективным направлением. Предложенная нами модель, учитывающая геометрические параметры шины, характеристики водяной пленки и дорожного покрытия, позволяет получить более глубокое понимание физических процессов, лежащих в основе

явления аквапланирования, и, как следствие, более точную и адекватную оценку критической скорости.

Практическая значимость разработанной модели заключается в возможности ее использования для решения широкого круга задач, связанных с обеспечением безопасности дорожного движения. Внедрение модели в системы управления современных автомобилей, включая беспилотные транспортные средства, позволит оперативно оценивать риск аквапланирования и адаптировать скоростной режим в зависимости от текущих дорожных условий [18–20]. Это, в свою очередь, будет способствовать снижению вероятности ДТП и повышению общей безопасности на дорогах.

Кроме того, результаты исследования могут быть использованы при проектировании транспортной инфраструктуры для выявления потенциально опасных участков и разработки мер по их устранению, а также в процессе автотехнической экспертизы для объективной оценки причин ДТП, связанных с аквапланированием. Не исключается и возможность применения разработанной методики в

авиации для обеспечения безопасности взлета и посадки летательных аппаратов.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на экспериментальную верификацию предложенной модели, а также на разработку практических рекомендаций по ее использованию в различных областях. ▲

Список источников

1. Баканов К. С. Дорожно-транспортная аварийность в Российской Федерации в 2023 году: Информационно-аналитический обзор / К. С. Баканов, П. В. Ляхов, А. С. Айсанов [и др.]. — М.: ФКУ «НЦ БДД МВД России», 2024. — 154 с. — EDN: BYRSGR.
2. Witcher C. Determination of rates of occurrence for hydroplaning events with naturalistic driving data / C. Witcher, D. Christ, J. Sudweeks, C. Layman, M. Perez // *Journal of Safety Research*. — 2024. — Vol. 91. — Pp. 303–313. — DOI: 10.1016/j.jsr.2024.09.018.
3. Hermange C. Experimental investigation of the leading parameters influencing the hydroplaning phenomenon / C. Hermange, V. Todoroff, F. Biesse, Y. Le-Chenadec // *Vehicle System Dynamics*. — 2022. — Vol. 60. — № 7. — Pp. 2375–2392. — DOI: 10.1080/00423114.2021.1901941. — EDN: KUGNKN.
4. Dehnad M. H. A review of numerical and experimental studies on hydroplaning of vehicles in motion on road surfaces / M. H. Dehnad, A. Yazdi // *Results in Engineering*. — 2024. — Vol. 23. — Article 102438. — DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102438.
5. Jing C. Numerical study of the tire hydroplaning behavior of aircraft on grooved concrete pavement / C. Jing, Du Nizhi, Z. Nan, Li Yue, D. Xue, Z. Hui // *PLoS ONE*. — 2023. — Vol. 18. — № 11. — DOI: 10.1371/journal.pone.0292701.
6. Vilsan A. Hydroplaning of Tires: A Review of Numerical Modeling and Novel Sensing Methods / A. Vilsan, C. Sandu // *Proceedings of the ASME 2023 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. — 2023. — DOI: 10.1115/DETC2023-116314.
7. Lee H. S. FDOT's Enhanced Hydroplaning Prediction Tool / Lee H. S., Carvajal M., Holzschuher C., Choubane B. // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. — 2021. — Vol. 2675. — № 10. — DOI: 10.1177/03611981211011479.
8. Hermange C. In-depth analysis of hydroplaning phenomenon accounting for tire wear on smooth ground / C. Hermange, G. Oger, Y. Le-Chenadec, M. De Leffe // *Journal of Fluids and Structures*. — 2022 — Vol. 111(11–14). — Article 103555. — DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2022.103555.
9. Chen X. Permeable friction course design with consideration of hydroplaning risk / X. Chen, H. Wang // *Canadian Journal of Civil Engineering*. Canadian Science Publishing. — 2024. — DOI: 10.1139/cjce-2024-0267.
10. Ковалев В. А. Определение скорости возможного аквапланирования / В. А. Ковалев, А. И. Фадеев, Е. С. Воеводин [и др.] // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. — 2014. — № 5(88). — С. 115–119. — EDN: SGJFEN.
11. Schulz H. E. A Water Films and Hydroplaning on Highways: Hydrodynamic Aspects / H. E. Schulz, J. E. Curry, A. L. Simões // *Journal of Transportation Engineering*. Part B: Pavements. — 2021. — May. — DOI: 10.1061/JPEODX.0000309.
12. Cabut D. Analysis of the water flow inside tire grooves of a rolling car using refraction particle image velocimetry / D. Cabut, M. Michard, S. Simoens, L. Mees, V. Todoroff, C. Hermange, Y. Le-Chenadec // *Physics of Fluids*. — 2021. — Vol. 33(3). — Article 032101. — DOI: 10.1063/5.0038834.
13. Акименко А. В. Методика и алгоритм расчета местных потерь напора в трубопроводах / А. В. Акименко, Е. А. Аникеев, Р. Ю. Медведев // *Моделирование систем и процессов*. — 2023. — Т. 16. — № 4. — С. 7–15. — DOI: 10.12737/2219-0767-2023-16-4-7-15. — EDN: MUAJWN.
14. Семин М. А. Совершенствование методов расчета эквивалентного напора эжекторных установок в горных выработках большого сечения / М. А. Семин, С. В. Мальцев, В. А. Родионов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. — 2024. — Т. 335. — № 7. — С. 185–195. — DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4393. — EDN: QSJVTA.
15. Соколов М. А. Сравнение способов представления зависимости кинематической вязкости пресной воды от температуры / М. А. Соколов // *Труды Крыловского государственного научного центра*. — 2020. — № 1(391). — С. 42–49. — DOI 10.24937/2542-2324-2020-1-391-42-49. — EDN: LCQOBP.
16. Корсун А. С. Интегральная модель описания профиля скорости в шероховатых каналах для инженерных расчетов гидравлического сопротивления / А. С. Корсун, М. И. Писаревский, Ю. Н. Писаревская, В. Н. Федосеев // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*. — 2022. — № 2. — С. 132–140. — EDN: CTHLIR.
17. Калякин А. М. Новая зависимость для определения коэффициента гидравлического сопротивления в переходной зоне сопротивления (от ламинарного режима к турбулентному) / А. М. Калякин, Е. В. Чеснокова // *Инженерно-строительный журнал*. — 2012. — № 2(28). — С. 51–55. — EDN: OWKIRD.
18. Montini E. Development and Experimental Assessment of a Control Logic for Hydroplaning Prevention / E. Montini, M. Salierno, S. Frigerio, S. Melzi // *16th International Symposium on Advanced Vehicle Control*. — 2024. — Pp. 293–300. — DOI: 10.1007/978-3-031-70392-8_42.
19. Gurganus C. F., Chang S., Gharaibeh N. G. Evaluation of hydroplaning potential using Mobile Lidar measurements for network-level pavement management applications // *Road Materials and Pavement Design*. — 2021. — Vol. 23. — № 1. — Pp. 1–10. — DOI: 10.1080/14680629.2021.1899962.
20. Rana Md. M. Impact of autonomous truck implementation: rutting and highway safety perspectives / Md. M. Rana, K. Hossain // *Road Materials and Pavement Design*. — 2022. — Vol. 23. — № 10. — P. 2205–2226. — DOI: 10.1080/14680629.2021.1963815. — EDN: CNFWXE.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 1, pp. 30–54
DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-30-54

Analytical Model for Calculating the Speed at Starting Hydroplaning in Unmanned Control Algorithms

Information about authors

Kuverin I. Yu., PhD in Engineering, Associate Professor. E-mail: igorkuv@mail.ru

Guseva I. A., Postgraduate Student. E-mail: guseva11.ia@yandex.ru

Gusev S. A., Doctor in Engineering, Professor, Head of the Department.

E-mail: o051nm@yandex.ru

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Department of Organization of Transportation, Traffic Safety and Car Service, Saratov

Abstract: This paper presents an analytical model for vehicle speed calculations at starting aquaplaning in real-time road conditions. High percentage of accidents associated with speed violations in adverse weather conditions makes the study relevant. A mathematical model based on the integral equations of mass and momentum conservation taking into account the tire geometric parameters, water film characteristics and those of the road surface has been developed. The proposed model makes it possible to calculate the critical speed of aquaplaning initiation for a specific vehicle. The paper presents the results of the simulation researching various factors affecting the aquaplaning initiation speed according to the developed model. The results of the study can be used for improving road safety including the unmanned vehicle operation, transport infrastructure design, as well as carrying out vehicle expertise and ensuring an aircraft take-off and landing safety.

Keywords: hydroplaning; road safety; critical speed; mathematical modelling; road conditions; water film on road surface; unmanned vehicles.

References

- Bakanov K. S., Lyakhov P. V., Aisanov A. S. [et al.]. *Dorozhno-transportnaya aviariynost' v Rossiyskoy Federatsii v 2023 godu: Informatsionno-analiticheskiy obzor* [Road traffic accidents in the Russian Federation in 2023: An information and analytical review]. Moscow: NC BDD of the Ministry of Internal Affairs of Russia Publ., 2024, 154 p., EDN: BYRSGR. (In Russian)
- Witcher C., Christ D., Sudweeks J., Layman C., Perez M. Determination of rates of occurrence for hydroplaning events with naturalistic driving data. *Journal of Safety Research*, 2024, vol. 91, pp. 303–313, DOI: 10.1016/j.jsr.2024.09.018.
- Hermange C., Todoroff V., Biesse F., Le-Chenadec Y. Experimental investigation of the leading parameters influencing the hydroplaning phenomenon. *Vehicle System Dynamics*, 2022, vol. 60, I. 7, pp. 2375–2392, DOI: 10.1080/00423114.2021.1901941, EDN: KUGNKN.
- Dehnad M. H., Yazdi A. A review of numerical and experimental studies on hydroplaning of vehicles in motion on road surfaces. *Results in Engineering*, 2024, vol. 23, article 102438, DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102438.
- Cai Jing, Du Nizhi, Zhou Nan, Li Yue, Dai Xue, Zhang Hui. Numerical study of the tire hydroplaning behavior of aircraft on grooved concrete pavement. *PLoS ONE*, 2023, vol. 18, I. 11, DOI: 10.1371/journal.pone.0292701.
- Vilsan A., Sandu C. Hydroplaning of Tires: A Review of Numerical Modeling and Novel Sensing Methods. *Proceedings of the ASME 2023 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2023, DOI: 10.1115/DETC2023-116314.
- Lee H. S., Carvajal M., Holzschuher C., Choubane B. FDOT's Enhanced Hydroplaning Prediction Tool. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2021, vol. 2675, I. 10, DOI: 10.1177/03611981211011479.
- Hermange C., Oger G., Le Chenadec Y., De Leffe M. In-depth analysis of hydroplaning phenomenon accounting for tire wear on smooth ground. *Journal of Fluids and Structures*, 2022, vol. 111(11–14), article 103555, DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2022.103555.
- Chen X., Wang H. Permeable friction course design with consideration of hydroplaning risk. *Canadian Journal of Civil Engineering. Canadian Science Publishing*, 2024, DOI: 10.1139/cjce-2024-0267.
- Kovalev V. A., Fadeev A. I., Voevodin E. S. [et al.]. Opredeleeniye skorosti vozmozhnogo akvaplanirovaniya [Determination of the speed of possible aquaplaning]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2014, I. 5(88), pp. 115–119, EDN: SGJFEH. (In Russian)
- Schulz H. E., Curry J. E., Simões A. L. A. Water Films and Hydroplaning on Highways: Hydrodynamic Aspects. *Journal of Transportation Engineering. Part B: Pavements*, 2021, May, DOI: 10.1061/JPEODX.0000309.
- Cabut D., Michard M., Simoens S., Mees L., Todoroff V., Hermange C., Le Chenadec Y. Analysis of the water flow inside tire grooves of a rolling car using refraction particle image velocimetry. *Physics of Fluids*, 2021, vol. 33(3), Article 032101, DOI: 10.1063/5.0038834.
- Akimenko A. V., Anikeev E. A., Medvedev R. Y. Metodika i algoritm rascheta mestnykh poter' napora v truboprovodakh [Methodology and algorithm for calculating local pressure losses in pipelines]. *Modelirovaniye sistem i protsessov* [Modeling of systems and processes], 2023, vol. 16, I. 4, pp. 7–15, DOI: 10.12737/2219-0767-2023-16-4-7-15, EDN: MUAJWN. (In Russian)
- Semin M. A., Maltsev S. V., Rodionov V. A. Sovershenstvovaniye metodov rascheta ekvivalentnogo napora ezhektornykh ustanovok v gornyykh vyrabotkakh bol'shogo secheniya [Improvement of methods for calculating the equivalent pressure of ejector installations in large-section mine workings]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering], 2024, vol. 335, I. 7, pp. 185–195, DOI 10.18799/24131830/2024/7/4393, EDN: QSVJTA. (In Russian)
- Sokolov M. A. Sravneniye sposobov predstavleniya zavisimosti kinematicheskoy vyazkosti presnoy vody ot temperatury [Comparison of ways of representing the dependence of kinematic viscosity of fresh water on temperature]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* [Proceedings of the Krylov State Scientific Center], 2020, I. 1(391), pp. 42–49, DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-391-42-49, EDN: LCQOBP. (In Russian)
- Korsun A. S., Pisarevsky M. I., Pisarevskaya Yu. N., Fedoseev V. N. Integral'naya model' opisaniya profilya skorosti v sherokhovatykh kanalakh dlya inzhenernykh raschetov gidravlicheskogo soprotivleniya [An integral model for describing the velocity profile in rough channels for engineering calculations of hydraulic resistance]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Yaderno-reaktornyye konstanty* [Issues of atomic science and technology. Series: Nuclear reactor constants], 2022, I. 2, pp. 132–140, EDN: CTHLIR. (In Russian)
- Kalyakin A. M., Chesnokova E. V. Novaya zavisimost' dlya opredeleniya koeffitsiyenta gidravlicheskogo soprotivleniya v perekhodnoy zone soprotivleniya (ot laminarnogo rezhima k turbulentnomu) [A new dependence for determining the coefficient of hydraulic resistance in the transition zone of resistance (from laminar to turbulent regime)]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Engineering and Construction Magazine], 2012, I. 2(28), pp. 51–55, EDN: OWBIRD. (In Russian)
- Montini E., Salerno M., Frigerio S., Melzi S. Development and Experimental Assessment of a Control Logic for Hydroplaning Prevention. *16th International Symposium on Advanced Vehicle Control*, 2024, pp. 293–300, DOI: 10.1007/978-3-031-70392-8_42.
- Gurganus C. F., Chang S., Gharaibeh N. G. Evaluation of hydroplaning potential using Mobile Lidar measurements for network-level pavement management applications. *Road Materials and Pavement Design*, 2021, vol. 23, I. 1, pp. 1–10, DOI: 10.1080/14680629.2021.1899962.
- Rana Md. M., Hossain K. Impact of autonomous truck implementation: rutting and highway safety perspectives. *Road Materials and Pavement Design*, 2022, vol. 23, I. 10, pp. 2205–2226, DOI: 10.1080/14680629.2021.1963815, EDN: CNFWXE.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ НАРУШЕНИЙ В СОБЛЮДЕНИИ ТРЕБОВАНИЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТАХ НА ОБЪЕКТАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

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

КУЛАГИН Максим Алексеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры; e-mail: maksimkulagin06@yandex.ru

РОДИНА Дарья Михайловна, ведущий разработчик ГК «Иннотех»; e-mail: dk.957@ya.ru

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

В статье рассматриваются вопросы повышения безопасности труда работников, осуществляющих ремонт и техническое обслуживание железнодорожной инфраструктуры. Основной целью работы является повышение уровня контроля за соблюдением требований охраны труда путем разработки и внедрения интеллектуальной системы обнаружения нарушений в соблюдении требований безопасности при работах на объектах железнодорожной инфраструктуры. Объектом исследования является алгоритм выявления нарушений в части охраны труда работниками железных дорог. В рамках исследования, представленного в статье, осуществлен сбор и разметка данных, необходимых для обучения моделей для создаваемой системы. Разработан обобщенный алгоритм определения нарушений в ношении средств индивидуальной защиты с использованием результатов работы модели детектирования людей из рабочей бригады и классификации нарушений в ношении средств индивидуальной защиты. Проведены исследования функционирования модели распознавания нарушений требований охраны труда при разных способах интерполяции изображений, которые показали, что на качество работы модели на тестовой выборке влияют количество эпох обучения и тип интерполяции. Представленное в статье исследование логически встраивается в семантическую сеть моделей предиктивной аналитики на железнодорожном транспорте и подтверждает практическую ценность полученных ранее теоретических результатов по построению иерархии таких моделей.

Ключевые слова: сверточная нейронная сеть; детектирование; охрана труда; безопасность; средства индивидуальной защиты; интеллектуальная система.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-55-65

▼ Введение

Железнодорожный транспорт играет ключевую роль в экономическом развитии и социальной инфраструктуре страны. Обеспечение безопасности на железнодорожном транспорте остается одной из главных задач, требующих постоянного внимания и совершенствования. В последние годы развитие цифровизации стимулирует решения в области безопасности, внедряя современные информационные и коммуникационные технологии для мониторинга, анализа и предотвращения потенциальных опасностей и аварийных ситуаций.

Цифровые решения в обеспечении безопасности предполагают использование:

- систем видеонаблюдения [1];
- датчиков для отслеживания состояния инфраструктуры и подвижного состава [2];

- информационных и автоматизированных систем сбора и анализа больших данных для выявления тенденций развития неисправностей и прогнозирования возможных проблем [3, 4].

Данные инструменты позволяют оперативно реагировать на происшествия, проводить расследование инцидентов и предотвращать аварии, обеспечивая безопасность движения поездов. Цифровая трансформация железнодорожного сектора не только изменяет подходы к безопасности, но и переопределяет роль транспортных средств и инфраструктуры. Создание цифровой железной дороги соответствует стратегии развития цифровой экономики и способствует улучшению качества транспортно-логистических услуг, повышению конкурентоспособности железнодорожной отрасли

как на внутреннем, так и на международном рынке.

Компания ОАО «РЖД» активно работает над повышением эффективности своей деятельности, создавая комплексные системы управления процессами в реальном времени. Это позволяет планировать и контролировать внутренние производственные процессы, интегрируя современные информационные и телекоммуникационные технологии, искусственный интеллект, методы моделирования и регулирования транспортных потоков. Проект Московского центрального кольца является примером успешной реализации такого подхода, где внедрение инновационных технологий обеспечило безопасное и комфортное движение поездов с сокращенными интервалами между ними. Несмотря на значительный прогресс, вопросы безопасности на железнодорожном транспорте остаются актуальными, чему способствует появление новых технологий, приносящих новые вызовы [5, 6].

Особое внимание уделяется требованиям охраны труда при текущем содержании и ремонте железнодорожной инфраструктуры. Железнодорожная система представляет собой сложный комплекс хозяйственных процессов, и обеспечение безопасности труда является неотъемлемой частью ее функционирования. Меры по обеспечению безопасности труда регламентируются отраслевыми правилами, устанавливающими стандарты безопасности на различных участках железнодорожной инфраструктуры, включая обслуживание сигнальных систем, работу ремонтных бригад и другие аспекты [7, 8]. Важным элементом безопасности труда является использование средств индивидуальной защиты (СИЗ). Монтеры пути должны быть обеспечены специальной одеждой, специальной обувью и СИЗ, которые включают различные элементы защиты в зависимости от выполняемых работ и условий труда. Соблюдение требований охраны труда, включая правильное использование СИЗ, является обязательным для всех работников, что способствует снижению рисков и предотвращению несчастных случаев [9, 10].

Развитие искусственного интеллекта и машинного обучения открывает новые

возможности в области охраны труда и промышленной безопасности [11, 12]. Эти инновации трансформируют традиционные методы работы, автоматизируя рутинные процессы, создавая более безопасную и комфортную рабочую среду и оказывая влияние на все аспекты организации труда в компаниях. Технологии искусственного интеллекта позволяют существенно снизить количество ошибок, связанных с усталостью или невнимательностью человека. Автоматизация множества задач повышает эффективность рабочего процесса, предоставляя сотрудникам обратную связь в режиме реального времени и осуществляя активное наблюдение за производственными процессами [13, 14].

Использование методов машинного обучения, особенно глубокого обучения и компьютерного зрения, позволит создать интеллектуальную систему обнаружения нарушений в соблюдении требований безопасности при работах на объектах железнодорожной инфраструктуры. Обученные модели могут классифицировать действия работников, выявляя отклонения от норм безопасности, такие как отсутствие СИЗ или неправильное использование оборудования. Это способствует повышению уровня безопасности, снижению количества несчастных случаев и повышению эффективности технического обслуживания и ремонта.

В текущих условиях обеспечение охраны труда и промышленной безопасности при проведении работ по ремонту и обслуживанию объектов железнодорожной инфраструктуры, а конкретно — соблюдение правил ношения СИЗ, возлагается на самих рабочих и их руководителей. Такой подход подразумевает влияние человеческого фактора, что может привести к неисполнению обязательств и как следствие к авариям и несчастным случаям.

Цель исследования заключается в повышении уровня контроля за соблюдением требований охраны труда при осуществлении ремонта и обслуживания инфраструктуры путем создания и внедрения интеллектуальной системы обнаружения нарушений в соблюдении требований безопасности на объектах железнодорожной инфраструктуры, использующих подходы машинного обучения и компьютерного зрения.

Фрагмент классификации объектов и субъектов предиктивной аналитики [15, 16]

Мета-классы, абстрагированные от содержания модели		
Мета-классы, абстрагированные от прикладного содержания	Класс объекта	Люди
Прикладные классы, абстрагированные от свойств экземпляров	Тип объекта	Наблюдаемые
	Род занятий человека	Сотрудник на путях на рабочем месте
Элементы, экземпляры		Кадр с сотрудниками на путях на рабочем месте
Целевая функция		Определение наличия СИЗ
Примеры признаков		Видеоизображение
Примеры управленческих решений		Предупреждение о нарушении техники безопасности

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Сбор, анализ и разметка данных для создания моделей и алгоритмов системы.
2. Разработка моделей и алгоритма выявления нарушений требований охраны труда при осуществлении ремонта и обслуживания инфраструктуры.
3. Проведение исследования по оценке влияния типов интерполяции изображений на качество работы модели классификации нарушений в использовании СИЗ.

В рамках разработанной авторами в статье [15] иерархии моделей предиктивной аналитики, реализуемых для объектов и субъектов, функционирующих в ОАО «РЖД», рассматриваемые в данной статье объекты классифицируются так, как показано в таблице.

1. Алгоритм выявления нарушений в ношении СИЗ

Алгоритм включает в себя два основных этапа (рис. 1):

1. Обнаружение (детектирование) человека, выполняющего работы по ремонту железнодорожной инфраструктуры, на фото или видеопотоке (блок 2–4).
2. Классификация полученного изображения на наличие нарушений в ношении СИЗ (блок 5–9).

Под детектированием будем подразумевать процесс обнаружения координат объектов на изображении на основе данных, получаемых в видеопотоке.

На вход алгоритма поступает видеопоток. Затем выполняется первый этап — обнаружение

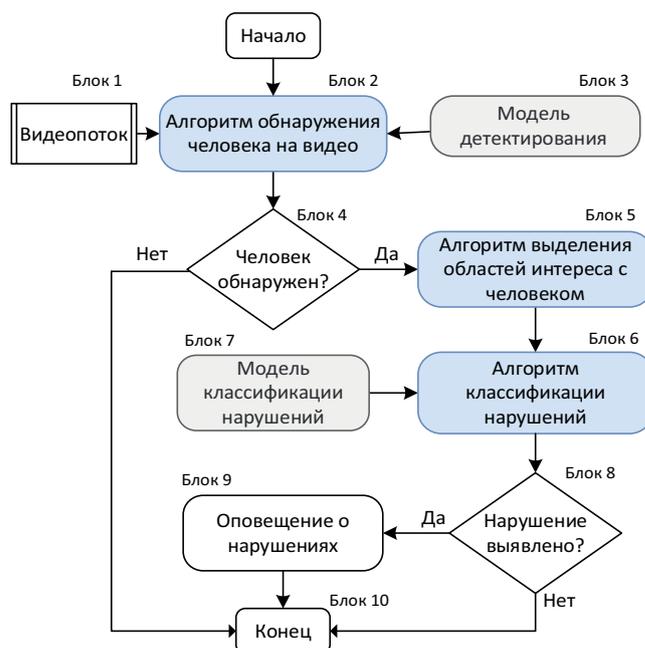


Рис. 1. Алгоритм обнаружения нарушений в ношении СИЗ

человека с помощью модели детектирования людей из рабочей бригады, выполняющих работы на железнодорожном пути. Ключевое отличие данной модели от стандартных моделей детектирования заключается в специфике исходных данных, на которых проводилось ее дополнительное обучение в рамках настоящего исследования. Следует подчеркнуть, что дообучение модели не исключает возможности ложных срабатываний при детектировании людей, не относящихся к рабочей бригаде. Будем считать, что в условиях проведения ремонтных работ на пути вероятность появления посторонних лиц на путях низкая. Если человек не обнаружен (блок 4), то алгоритм

завершит работу (блок 10). Если человек обнаружен, то часть изображения с изображением человека будет сохранена (блок 5). После этого начинается выполнение второго этапа — классификации нарушения (отсутствия экипировки работника согласно требованиям охраны труда) на полученном ранее изображении (блок 6). Если нарушение будет обнаружено (блок 8), то программа сохранит данные о нарушении и отправит уведомление (блок 9).

2. Исходные данные для создания моделей и алгоритмов интеллектуальной системы обнаружения нарушений в соблюдении требований безопасности при работах на объектах железнодорожной инфраструктуры

Для каждой модели алгоритма обнаружения нарушений в использовании СИЗ будут применяться различные наборы данных. В качестве исходного видеопотока рассматриваются записи процессов ремонта или технического обслуживания железнодорожной инфраструктуры, выполняемых ремонтной бригадой.

В данной работе при обсуждении модели детектирования рабочего при ремонте и обслуживании железнодорожной инфраструктуры основное внимание будет сосредоточено на алгоритме *YOLO* [17] как на более современном и детально проработанном алгоритме детектирования. *YOLO* (*You Only Look Once*) — это семейство моделей глубокого обучения для обнаружения объектов (*object detection*) в изображениях и видео. В отличие от традиционных методов, которые сначала находят потенциальные области объектов, а затем классифицируют их, *YOLO* выполняет обнаружение объектов за один проход нейросети. Данный алгоритм предоставляет уже обученную модель для детектирования людей, что значительно упрощает процесс разработки первого этапа алгоритма обнаружения нарушений в ношении СИЗ. Эта предобученная модель способна распознавать и локализовать людей на изображениях и видео в реальном времени. Для повышения точности на более специфичных данных, характерных для задачи детектирования людей во время работы на железнодорожном пути, предобученную модель *YOLO* нужно

дообучить. Для данной модели было собрано и размечено 4 311 изображений (рис. 2). В качестве инструмента разметки данных используется инструмент с открытым исходным кодом для разметки цифровых изображений и видео *Computer Vision Annotation Tool (CVAT)* [18]. Данные изображения использовались для дополнительного обучения Модели детектирования (блок 3 на рис. 1).



Рис. 2. Примеры размеченных изображений

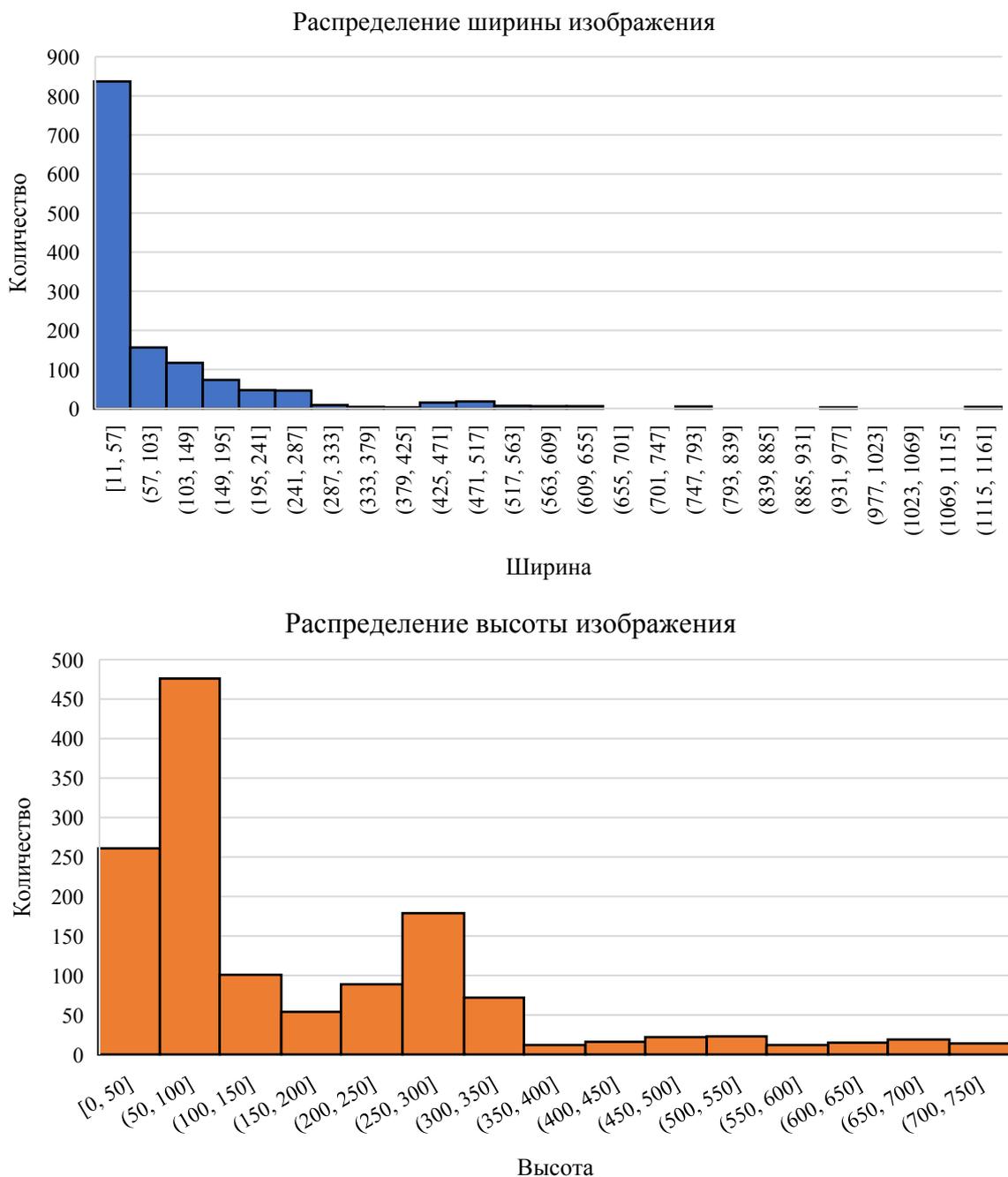


Рис. 3. Распределение ширины и высоты изображений

Для модели классификации нарушений в ношении СИЗ собран и размечен набор данных на различных участках путей, в разные времена суток и при различных погодных условиях, разделенный по категориям: *okey*, *bad* и *unknown*. Эти данные позволяют модели учитывать разнообразные факторы, такие как освещение, движение поездов, наличие препятствий и т.д. В категории *okey* имеется 540 изображений, в *bad* — 301, а в *unknown* — 101;

всего — 942. Данные изображения использовались для обучения Модели классификации нарушений (блок 7 на рис. 1).

При анализе полученных изображений необходимо оценить их характеристики в следующих измерениях: ширина и высота. Это необходимо, чтобы определить типичные данные, а также обнаружить аномалии или некорректные данные. На приведенных гистограммах показано распределение ширины и высоты

изображений (рис. 3) из собранного набора данных (блок 7 на рис. 1).

Для распределения ширины изображений отметим:

- основная часть изображений имеет ширину в диапазоне до 250 пикселей (91 %);
- максимальное количество изображений сконцентрировано в первой группе с шириной около 100 пикселей (72 %);
- после 250 пикселей количество изображений резко уменьшается, и только небольшое количество имеет ширину до 1200 пикселей (9 %).

Для распределения высоты изображений отметим:

- большинство изображений имеют высоту до 210 пикселей (66 %);
- пик распределения приходится на группу с высотой около 75 пикселей (42 %);
- начиная со значения 100 пикселей высота изображений варьируется более равномерно, но все равно наблюдается тенденция к уменьшению количества изображений с увеличением высоты.

Данные распределения показывают, что большинство изображений имеет небольшие размеры как по ширине, так и по высоте. Это может указывать на то, что изображения в данном наборе данных могут быть использованы для решения задач, не требующих высокого разрешения. Наблюдаемое резкое снижение количества изображений с увеличением размеров свидетельствует о предпочтении использования изображений меньшего формата.

3. Модели, реализуемые в интеллектуальной системе обнаружения нарушений в соблюдении требований безопасности при работах на объектах железнодорожной инфраструктуры

Процесс дообучения модели *YOLO* включает в себя использование дополнительных данных, специфичных для железнодорожной инфраструктуры. В рамках данной статьи наибольший акцент делается на модель классификации нарушений.

Для повышения безопасности на рабочих местах и соблюдения требований охраны труда

в промышленности крайне важно не только обнаружение нарушений, но и их классификация. Поэтому в рамках данного исследования разработана специализированная модель, архитектура которой подобрана для данной задачи.

Модель, разработанная для задачи классификации изображений, состоит из нескольких слоев свертки (*Conv*) и пулинга (*MaxPool*), а также полносвязных (*Linear*) слоев для окончательной классификации (рис. 4):

- 1-й сверточный слой с 32 фильтрами и размером ядра 3×3;
- 2-й пулинговый слой с выделением максимального значения пикселя размером 2×2;
- 3-й сверточный слой с 32 фильтрами и размером ядра 3×3;
- 4-й пулинговый слой с выделением максимального значения пикселя размером 2×2;
- 5-й сверточный слой с 64 фильтрами и размером ядра 3×3;
- 6-й пулинговый слой с выделением максимального значения пикселя размером 2×2;
- 7-й сверточный слой с 64 фильтрами и размером ядра 3×3;
- 8-й пулинговый слой с выделением максимального значения пикселя размером 2×2;
- 9-й полносвязный слой с 64 нейронами;
- 10-й полносвязный слой с 10 нейронами;
- 11-й полносвязный слой с 3 нейронами, представляющими выходные классы.

Каждый сверточный слой применяет фильтры к входным данным для извлечения признаков изображения на разных уровнях абстракции. После каждого сверточного слоя используется функция активации *LeakyReLU*:

$$LeakyReLU(x) = \max(0, x) + slope \cdot \min(0, x), \quad (1)$$

где *slope* управляет углом отрицательного наклона, который используется для отрицательных входных значений входной переменной *x*. В рамках статьи установлено значение 0,01.

Представленная архитектура нейронной сети предназначена для решения задачи классификации изображений и включает в себя комбинацию сверточных и полносвязных слоев, а также вспомогательные операции.

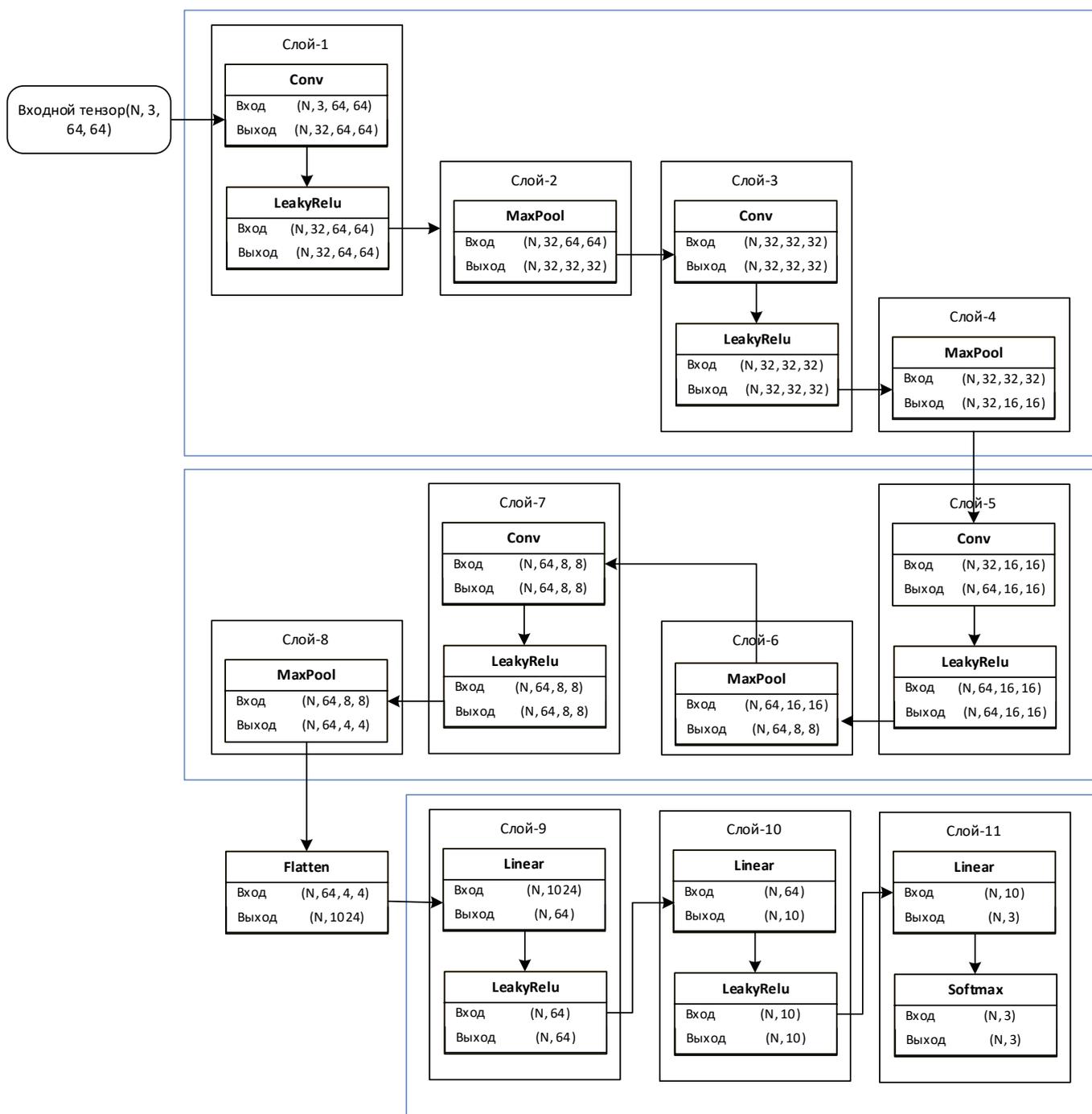


Рис. 4. Архитектура модели классификации нарушений

Сверточные слои применены в качестве фильтров к входным данным для выделения ключевых признаков изображения. Они выполняют первые этапы обработки данных в модели, извлекая низкоуровневые и высокоуровневые признаки.

Пулинговые слои применены для снижения размерности данных и уменьшения вычислительной нагрузки. Они выбирают

максимальные значения из областей входного изображения, что помогает сохранить наиболее значимые признаки.

Полносвязные слои представляют собой завершающий этап обработки данных, на котором происходит окончательная классификация. Они объединяют признаки, выделенные сверточными слоями, и преобразуют их в выходные классы.

При обучении сверточной нейронной сети [19, 20] для задачи классификации нарушений в ношении СИЗ требуется передавать изображения одинакового размера. На выходе алгоритма детектирования и выделения области интереса (блок 2 на рис. 1) размеры могут отличаться. Для выравнивания размеров необходимо воспользоваться алгоритмами интерполяции изображений.

Для решения этой задачи рассмотрены разные методы интерполяции:

- интерполяция по площади (*INTER_AREA*) используется для уменьшения размера изображения. Для каждого выходного пикселя вычисляется среднее значение всех пикселей, которые попадают в этот выходной пиксель;
- ближайший сосед (*INTER_NEAREST*) использует для определения значения целевого пикселя значение ближайшего к нему пикселя;
- билинейная интерполяция (*INTER_LINEAR*) использует линейную интерполяцию между четырьмя ближайшими пикселями:

$$\begin{aligned} value = & (1 - fx)(1 - fy)src(x, y) + \\ & + fx(1 - fy)src(x + 1, y) + \\ & + (1 - fx)fy src(x, y + 1) + \\ & + fx fy src(x + 1, y + 1), \end{aligned} \quad (2)$$

где fx — дробная часть координаты по оси x , определяющая положение новой точки между пикселями по горизонтали;

fy — дробная часть координаты по оси y , определяющая положение новой точки между пикселями по вертикали;

$src(x, y)$ — значение пикселя исходного изображения с целочисленными координатами (x, y) ;

$src(x + 1, y)$ — значение пикселя, расположенного справа от пикселя (x, y) ;

$src(x, y + 1)$ — значение пикселя, расположенного ниже пикселя (x, y) ;

$src(x + 1, y + 1)$ — значение пикселя, расположенного по диагонали вниз и вправо от пикселя (x, y) .

4. Исследование влияния методов интерполяции на качество классификации нарушений

Для обучения модели классификации нарушений в ношении СИЗ использовалась функция потерь — кросс-энтропия (*Loss_test*). В качестве алгоритма оптимизации использовался градиентный спуск с модификацией *Adam* [21]. В результате модель была обучена с разным количеством эпох (10, 100, 250, 500, 1000) и режимов интерполяции изображений (рис. 5). Для оценки модели на тестовом датасете использовались метрики качества для задачи классификации: точность (*Accuracy_test*), точность по классам (*Precision*), полнота (*Recall*), *F1*-мера (*F1-Score*).

Модель демонстрирует значительное улучшение метрик качества при увеличении числа эпох обучения. Особенно заметно это улучшение при сравнении результатов на 10-й и 1000-й эпохах. Значительное улучшение наблюдается при многократном увеличении числа эпох, что указывает на необходимость длительного обучения для достижения высокой производительности модели. За короткое время она не может эффективно извлечь и усвоить важные признаки из обучающего набора, что приводит к низкой точности предсказаний и высоким значениям функции потерь.

По результатам проведенных экспериментов для задачи классификации нарушений в ношении СИЗ при обучении нейронной сети наблюдается зависимость качества работы модели на тестовой выборке от типа интерполяции изображения. Для задачи, поставленной в статье наилучший тип интерполяции по точности — это *INTER_LINEAR*. На основании этого можно сделать вывод, что при обучении нейронной сети на новых данных в задачах распознавания объектов тип интерполяции может оказывать влияние на качество работы модели.

Заключение

В ходе исследований определены методы автоматизированного контроля за соблюдением требований охраны труда. Разработан алгоритм мониторинга наличия СИЗ рабочих, которые выполняют ремонт и техническое

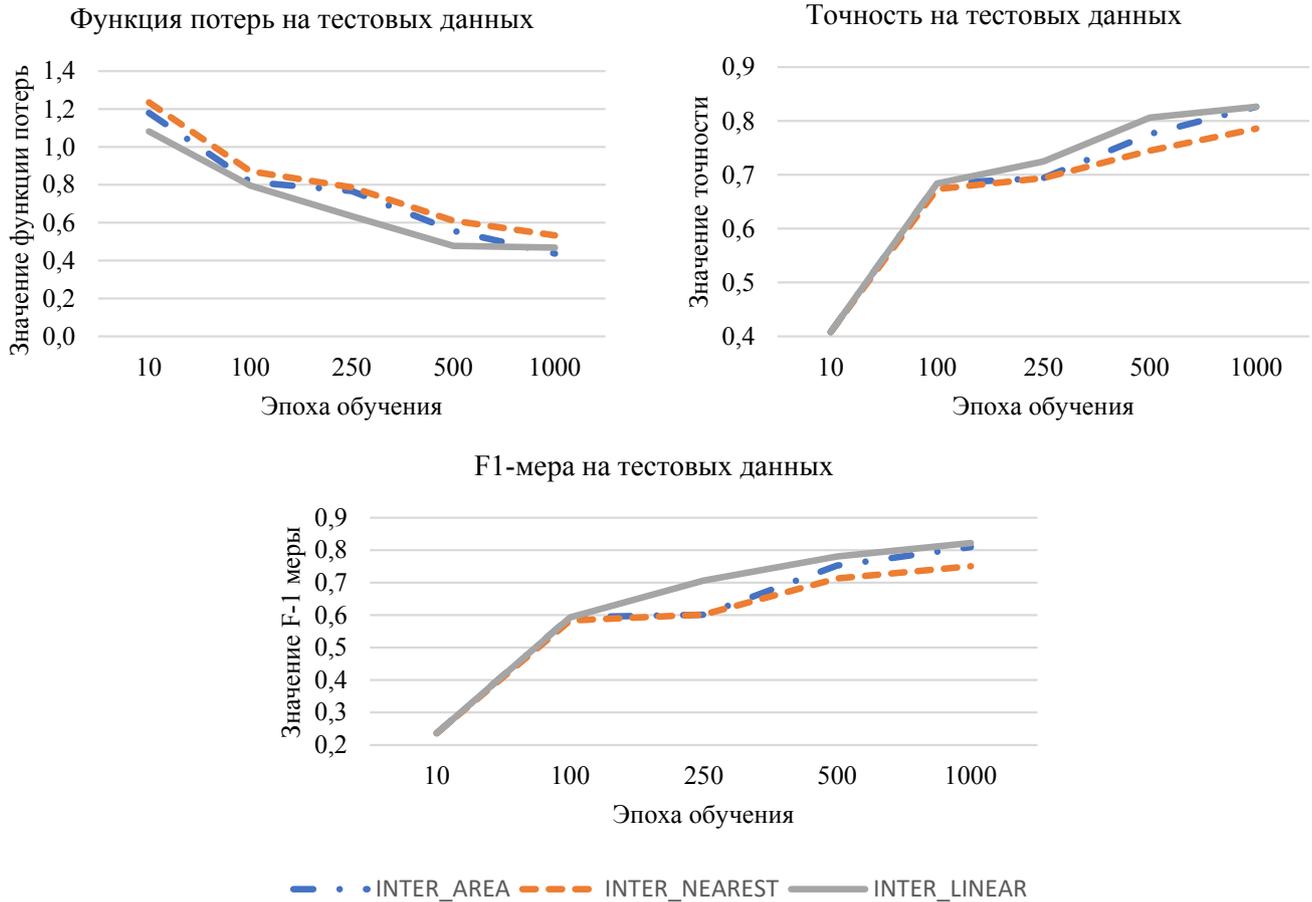


Рис. 5. Результаты обучения моделей с разными способами интерполяции и количеством эпох

обслуживание железнодорожной инфраструктуры. Применение различных моделей машинного обучения, включая сверточные нейронные сети для детектирования и классификации нарушений требований охраны труда, позволило достичь высокой точности в обнаружении этих нарушений и контроле ношения СИЗ.

Проведенное исследование показало, что на качество работы модели на тестовой выборке влияют количество эпох обучения и тип интерполяции. Различные типы интерполяции дали разные результаты. Наилучшие результаты были достигнуты при обучении на 1000 эпохах с использованием билинейной интерполяции.

Основные результаты исследования подтверждают не только эффективность разработанной системы, но и ее потенциал для дальнейшего улучшения условий труда и повышения безопасности при обслуживании и ремонте железнодорожной инфраструктуры. Полученные

результаты могут быть использованы для оптимизации систем управления охраной труда и обеспечения безопасности работников.

Представленное в статье исследование является наглядным примером решения прикладной задачи на основе моделей мета-уровня, абстрагированных исходно от прикладного содержания. Оно является элементом синтезированной ранее авторами семантической сети моделей предиктивной аналитики на железнодорожном транспорте и подтверждает практическую ценность полученных ранее теоретических результатов по построению иерархии моделей предиктивной аналитики. Полученные результаты иллюстрируют возможность расширения множества интеллектуальных транспортных систем с использованием созданных авторами типовых структур (фреймворк) и шаблонов проектирования, являющихся основой единой методологии создания таких систем, облегчающей их разработку. ▲

Список источников

1. Ивашевский М. Р. Системы видеонаблюдения на железнодорожном транспорте / М. Р. Ивашевский // Мир транспорта. — 2019. — Т. 17. — № 5(84). — С. 298–314. — DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-5-298-314. — EDN: NSTKCT.
2. Панченко К. П. Интернет вещей как система предиктивной диагностики железнодорожной инфраструктуры / К. П. Панченко, В. В. Дегтярева, Е. В. Маслова // Комплексное взаимодействие лингвистических и выпускающих кафедр в техническом вузе: Международная научно-практическая конференция посвященная 125-летию РУТ (МИИТ), Москва, 27 мая 2021 года. — М.: Российский университет транспорта, 2021. — С. 271–274. — EDN: VPEBGD.
3. Сидоренко В. Г. Прогнозирование выхода из строя тяговых электродвигателей электроподвижного состава железных дорог с использованием глубоких нейронных сетей / В. Г. Сидоренко, М. А. Кулагин // Электротехника. — 2021. — № 9. — С. 52–56. — EDN: NDPPGU.
4. Коваленко Н. И. Применение цифровизации при планировании контингента по техническому обслуживанию железнодорожной инфраструктуры / Н. И. Коваленко, В. А. Бучкин, Ю. А. Быков, Е. Н. Гринь // Мир транспорта. — 2021. — Т. 19. — № 2(93). — С. 116–121. — DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-2-16. — EDN: AQIPDB.
5. Popov P. A. Prospects of autonomous railway transport development / P. A. Popov, A. V. Ozerov, A. S. Marshova // BRICS Transport. — 2024. — Vol. 3. — № 3. — Pp. 1–14. — DOI: 10.46684/2024.3.4. — EDN: НРУХЕZ.
6. Иванов В. Ф. 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. — EDN: QWNIRH.
7. Полянский А. В. Инженерно-интеллектуальное обеспечение технологических процессов в железнодорожном строительстве / А. В. Полянский. — М.: Мир науки, 2023. — 245 с. — DOI: 10.15862/39MNNPM23. — EDN: WYHBRO.
8. Коваленко Н. И. Оценка рисков нарушения численности персонала в путевом хозяйстве / Н. И. Коваленко, А. Н. Коваленко // Путь и путевое хозяйство. — 2024. — № 2. — С. 25–29. — EDN: FQBKKL.
9. Гринчар Н. Г. Об использовании парков путевых машин / Н. Г. Гринчар // Путь и путевое хозяйство. — 2023. — № 6. — С. 7–10. — EDN: JBPJQ.
10. Быстров Е. Н. Обеспечение средствами индивидуальной защиты работников предприятий транспортной сферы / Е. Н. Быстров, А. В. Харламова // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2023. — Т. 20. — № 2. — С. 396–403. — DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-396-403. — EDN: OEOTNG.
11. Ларичев Д. В. Современный метод детектирования средств индивидуальной защиты для лица с использованием технического зрения и глубокого машинного обучения / Д. В. Ларичев, В. Н. Панкрушин, А. И. Угланов [и др.] // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Техническое зрение и распознавание образов»: сборник статей II Всероссийской научно-технической конференции, Анапа, 22 октября 2020 года / Военный инновационный технополис «ЭРА». Т. 2. — Анапа: Федеральное государственное автономное учреждение «Военный инновационный технополис «ЭРА»», 2020. — С. 183–189. — EDN: QNLITG.
12. Сенников А. В. Разработка алгоритма детектирования средств индивидуальной защиты на видеоданных / А. В. Сенников, А. Ф. Стефаниди // Новые информационные технологии и системы (НИТиС-2021): Сборник научных статей по материалам XVIII Международной научно-технической конференции, Пенза, 24–26 ноября 2021 года. — Пенза: Пензенский государственный университет, 2021. — С. 150–155. — EDN: KHUJHM.
13. Малофеев М. В. Инновационные цифровые технологии в области промышленной безопасности охраны труда и окружающей среды / М. В. Малофеев, П. И. Чермянин, М. Б. Кошелев [и др.] // Экспозиция Нефть Газ. — 2022. — № 5(90). — С. 82–85. — DOI: 10.24412/2076-6785-2022-5-82-85. — EDN: NDMMUI.
14. Maheronnaghsh S. Machine learning in Occupational Safety and Health — a systematic review / S. Maheronnaghsh, H. Zolfagharnasab, M. Gorgich, J. Duarte // International Journal of Occupational and Environmental Safety. — 2023. — Vol. 7. — № 1. — P. 14–32. — DOI: 10.24840/2184-0954_007-001_001586. — EDN: YAHOWE.
15. Сидоренко В. Г. Обобщение опыта решения задач предиктивной аналитики на железнодорожном транспорте / В. Г. Сидоренко, М. А. Кулагин // Наука и техника транспорта. — 2024. — № 4. — С. 55–62.
16. Scheer A. W. Business process engineering: reference models for industrial enterprises / A. W. Scheer. — Springer Science & Business Media, 2012. — DOI: 10.1007/978-3-642-79142-0.
17. Khanam R. YOLO 11: An overview of the key architectural enhancements / R. Khanam, M. Hussain // arXiv preprint arXiv:2410.17725. — 2024. — DOI: 10.48550/arXiv.2410.17725.
18. Pangal D. J. A Guide to Annotation of Neurosurgical Intraoperative Video for Machine Learning Analysis and Computer Vision / D. J. Pangal, G. Kugener, Sh. Shahrestani [et al.] // World Neurosurgery. — 2021. — Vol. 150. — Pp. 26–30. — DOI: 10.1016/j.wneu.2021.03.022. — EDN: LVOUCM.
19. Goodfellow I. Deep Learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. — MIT Press, 2016. — DOI: 10.1007/s10710-017-9314-z.
20. Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning / C. M. Bishop. — Springer, 2006.
21. Powers D. M. W. Evaluation: From Precision, Recall and F-Measure to ROC, Informedness, Markedness & Correlation / D. M. W. Powers // Journal of Machine Learning Technologies. — 2011. — Vol. 2(1). — P. 37–63. — DOI: 10.48550/arXiv.2010.16061.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 1, pp. 55–65
DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-55-65

Intelligent System Detecting Safety Requirements Violation in Railway Infrastructure Maintenance

Information about authors

Sidorenko V. G., Doctor in Engineering, Professor. E-mail: valenfalk@mail.ru

Kulagin M. A., PhD in Engineering, Associate Professor of Department.

E-mail: maksimkulagin06@yandex.ru

Rodina D. M., Senior Developer of “Innotech” IT company. E-mail: dk.957@ya.ru

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

Abstract: Safety improvement issues concerning workers engaged in the repair and maintenance of railway infrastructure are considered in this paper. The main purpose of the work is to improve labour protection requirements compliance through the development and implementation of an intelligent system for detecting violations of safety requirements during work on railway infrastructure. The object of the research is to develop detection violation algorithms for labor protection of railway workers. As part of the research presented, the data necessary for the system learning models was collected and marked up. A generalized algorithm for detecting violations in using personal protective equipment has been developed based on the work team detection model and the violation classification of using personal protective equipment. Functioning of the detection violation model in terms of labour protection requirements under different methods of image interpolation has been researched. The research showed that the number of training epochs and the type of interpolation affect the quality of the model tested. The research presented logically integrates into the semantic network of predictive analytics models in railway transport and confirms the practical value of the previously obtained theories on the construction of such model hierarchy.

Keywords: convolutional neural network; detection; occupational safety; safety; personal protective equipment; intelligent system.

References

- Ivashevskij M. R. Sistemy videonablyudeniya na zheleznodorozhnom transporte [Video surveillance systems in railway transport]. *Mir transporta* [World of Transport], 2019, vol. 17, I. 5(84), pp. 298–314, DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-5-298-314, EDN: NSTKCT. (In Russian)
- Panchenko K. P., Degtyareva V. V., Maslova E. V. Internet veshhej kak sistema prediktivnoj diagnostiki zheleznodorozhnoj infrastruktury [Internet of things as a predictive diagnostics system for railway infrastructure]. *Kompleksnoe vzaimodejstvie lingvisticheskix i vy`puskayushhix kafedr v texnicheskom vuze* [Complex interaction of linguistic and graduate departments in a technical university]. Moscow: Rossijskij universitet transporta Publ., 2021, pp. 271–274, EDN: VPEBGD. (In Russian)
- Sidorenko V. G., Kulagin M. A. Prognozirovanie vy`xoda iz stroya tyagovy`x e`lektrodvigatelej e`lektropodvizhnogo sostava zhelezny`x dorog s ispol`zovaniem glubokix nejronny`x setej [Predicting the failure of traction motors of electric rolling stock of railways using deep neural networks]. *E`lektrotexnika* [Electrical engineering], 2021, I. 9, pp. 52–56, EDN: NDPPGU. (In Russian)
- Kovalenko N. I., Buchkin V. A., By`kov Yu. A., Grin` E. N. Primenenie cifrovizacii pri planirovanii kontingenta po texnicheskomu obsluzhivaniyu zheleznodorozhnoj infrastruktury [Application of digitalization in planning the contingent for maintenance of railway infrastructure]. *Mir transporta* [World of Transport], 2021, vol. 19, I. 2(93), pp. 116–121, DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-2-16, EDN: AQIPDB. (In Russian)
- Popov P. A., Ozerov A. V., Marshova A. S. Prospects of autonomous railway transport development. *BRICS Transport*, 2024, vol. 3, I. 3, DOI: 10.46684/2024.3.4. EDN: HPYXZ.
- Ivanov V. F., Oxotnikov A. L., Gradusov A. N. Algoritm kompleksirovaniya sensory`x danny`x dlya zadach avtomaticheskogo upravleniya podvizhny`m sostavom [Algorithm for integrating sensory data for automatic rolling stock control tasks]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport], 2024, vol. 10, I. 4, pp. 360–371, DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-04-360-371, EDN: QWNIRH. (In Russian)
- Polyanskij A. V. *Inzhenerno-intellektual`noe obespechenie texnologicheskix processov v zheleznodorozhnom stroitel`stve* [Engineering and intellectual support of technological processes in railway construction]. Moscow: Mir nauki Publ., 2023, 245 p., DOI: 10.15862/39MNNPM23, EDN: WYHBR0. (In Russian)
- Kovalenko N. I., Kovalenko A. N. Ocenka riskov narusheniya chislennosti personala v putevom xozyajstve [Assessment of risks of violation of personnel numbers in the track facilities]. *Put` i putevoe xozyajstvo* [The road and the road facilities], 2024, I. 2, pp. 25–29, EDN: FQBKLL. (In Russian)
- Grinchar N. G. Ob ispol`zovanii parkov putevy`x mashin [On the use of track machine parks]. *Put` i putevoe xozyajstvo* [The road and the road facilities], 2023, I. 6, pp. 7–10, EDN: JJBPIQ. (In Russian)
- Bystrov E. N., Xarlamova A. V. Obespechenie sredstvami individual`noj zashchity` rabotnikov predpriyatij transportnoj sfery` [Provision of personal protective equipment to workers in the transport sector]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshheniya* [Izvestia of the St. Petersburg University of Railway Engineering], 2023, vol. 20, I. 2, pp. 396–403, DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-396-403. EDN: OEOTNG. (In Russian)
- Larichev D. V., Pankrushin V. N., Uglanov A. I. [i dr.]. Sovremenny`j metod detektirovaniya sredstv individual`noj zashchity` dlya licza s ispol`zovaniem texnicheskogo zreniya i glubokogo mashinnogo obucheniya [A modern method for detecting personal protective equipment for faces using machine vision and deep machine learning]. *Sostoyaniya i perspektivy` razvitiya sovremennoj nauki po napravleniyu` "Texnicheskoe zrenie i raspoznavanie obrazov"* [The state and prospects of development of modern science in the direction of "Technical vision and pattern recognition"]. Anapa: Federal`noe gosudarstvennoe avtonomnoe uchrezhdenie "Voenny`j innovacionny`j texnopolis "E`RA", 2020, pp. 183–189, EDN: QNLITG. (In Russian)
- Sennikov A. V., Stefanidi A. F. Razrabotka algoritma detektirovaniya sredstv individual`noj zashchity` na videodanny`x [Development of an algorithm for detecting personal protective equipment in video data]. *Novy`e informacionny`e texnologii i sistemy` (NITIS-2021)* [New information technologies and systems (NITIS-2021)]. Penza: Penzenskij gosudarstvenny`j universitet, 2021, pp. 150–155, EDN: KHUHJM. (In Russian)
- Malofeev M. V., Chermyanin P. I., Koshelev M. B. [i dr.]. Innovacionny`e cifrovy`e texnologii v oblasti promy`shlennoj bezopasnosti oxrany` truda i okruzhayushhej sredy` [Innovative digital technologies in the field of industrial safety, labor protection and the environment]. *E`kspozitsiya Neft` Gaz* [Oil Gas Exposition], 2022, I. 5(90), pp. 82–85, DOI: 10.24412/2076-6785-2022-5-82-85, EDN: NDMMUI. (In Russian)
- Maheronnaghsh S., Zolfagharnasab H., Gorgich M., Duarte J. Machine learning in Occupational Safety and Health — a systematic review. *International Journal of Occupational and Environmental Safety*, 2023, vol. 7, I. 1, pp. 14–32, DOI: 10.24840/2184-0954_007-001_001586, EDN: YAHOWE.
- Sidorenko V. G., Kulagin M. A. Obobshhenie opy`ta resheniya zadach prediktivnoj analitiki na zheleznodorozhnom transporte [Generalization of experience in solving problems of predictive analytics in railway transport]. *Nauka i texnika transporta* [Science and technology of transport], 2024, I. 4, pp. 55–62. (In Russian)
- Scheer A. W. Business process engineering: reference models for industrial enterprises. Springer Science & Business Media, 2012, DOI: 10.1007/978-3-642-79142-0.
- Khanam R., Hussain M. YOLO 11: An overview of the key architectural enhancements. arXiv preprint arXiv:2410.17725, 2024, DOI: 10.48550/arXiv.2410.17725.
- Pangal D. J., Kugener G., Shahrestani Sh. [et al.]. A Guide to Annotation of Neurosurgical Intraoperative Video for Machine Learning Analysis and Computer Vision. *World Neurosurgery*, 2021, vol. 150, pp. 26–30, DOI: 10.1016/j.wneu.2021.03.022, EDN: LVUUCM.
- Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. MIT Press, 2016, DOI: 10.1007/s10710-017-9314-z.
- Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. Springer, 2006.
- Powers D. M. W. Evaluation: From Precision, Recall and F-Measure to ROC, Informedness, Markedness & Correlation. *Journal of Machine Learning Technologies*, 2011, vol. 2(1), pp. 37–63, DOI: 10.48550/arXiv.2010.16061.

ПОСТРОЕНИЕ ОБНАРУЖИВАЮЩИХ ТЕСТОВ ДЛЯ НЕЧЕТКИХ АВТОМАТОВ

СПЕРАНСКИЙ Дмитрий Васильевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры;
e-mail: speranskiy.dv@gmail.com

ЛУНЕВ Сергей Александрович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: slunev@mail.ru

Российский университет транспорта (МИИТ), кафедра «Системы управления транспортной инфраструктурой», Москва

В статье рассматривается задача синтеза обнаруживающих тестов для дискретных устройств с памятью, представленных математической моделью нечеткого автомата. В ранее опубликованных работах были предложены методы для решения аналогичной задачи для двух типов нечетких автоматов (линейных и с конечной памятью). Эти методы базировались на использовании их особенности, заключающейся в линейности законов их функционирования. В работе рассматриваются произвольные нечеткие автоматы, задаваемые в виде нечетких графов и в табличной форме. Предполагается, что нечеткость функционирования автомата проявляется в необходимости выбора альтернативных траекторий движения при переходах между некоторыми состояниями автомата. Предложена концепция построения тестов для произвольных нечетких автоматов, основанная на преобразовании модели заданного автомата в виде нечеткого графа в четкий граф. Такое преобразование выполняется по предложенному в статье алгоритму. Показано, что любой обнаруживающий неисправность тест в полученном четком графе (автомате) обнаруживает однозначно соответствующую ей неисправность в заданном нечетком графе (автомате).

Ключевые слова: нечеткие автоматы; нечеткие графы; преобразования нечетких автоматов в четкие; методы синтеза тестов для четких автоматов; константные неисправности; концепция синтеза обнаруживающих тестов.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-66-74

▼ Введение

Проблема синтеза тестов для различных дискретных устройств относится к числу важных и актуальных. Ее решение связано с использованием математических моделей, учитывающих специфику устройств. Например, для комбинационных устройств в качестве моделей традиционно применяются булевы функции или их системы, для устройств с памятью — всевозможные типы конечных автоматов. Эти классические модели предполагают точное описание функционирования устройств и задание всей необходимой для этого информации. Поэтому такие классические модели ныне принято называть четкими.

Вместе с тем современная наука считает, что некоторые наши знания не соответствуют сложившимся представлениям о них и предполагают наличие некоторых «нечеткостей», являющихся реальностью человеческого существования. Следствием этого стала разработка новых понятий и методов, которые учитывают

«нечеткости» в практических приложениях. Первой работой в этом направлении явилась статья Л. Заде [1], ставшая основой широко используемой ныне в приложениях теории нечетких множеств и появившихся позже теорий других нечетких объектов. В отличие от классического понятия объекта (например, автомата), это понятие принято называть нечетким объектом (нечетким автоматом).

Известны различные разновидности нечетких автоматов в качестве модели дискретных устройств с памятью. Так, одна из них предложена в [2] для нечетких автоматов произвольного типа. Эта модель использует матричное представление функций переходов и выходов нечетких автоматов, за счет чего и достигается общность модели, но утрачивается компактность и простота вычислений.

Для некоторых классов «автоматных» задач можно предложить модели проще и компактнее, чем в [2]. Так, для решения задач тестирования нечетких линейных автоматов и

автоматов с конечной памятью такие модели были предложены в [3, 4]. Для этих автоматов линейность является основой предложенных методов, которая в общем случае отсутствует у произвольных нечетких автоматов и поэтому эти методы неприемлемы для них. Что касается иных моделей нечетких конечных автоматов, то имеется много публикаций (в том числе и обзорных статей) с их описанием. Здесь они не приводятся, поскольку это лежит вне рамок предлагаемой статьи.

В статье рассматривается задача тестирования нечетких автоматов произвольного типа, задаваемых по аналогии с четкими автоматами на языке графов и таблиц переходов и выходов.

Поиск публикаций по этой тематике показал, что они практически отсутствуют. В одной найденной работе [5] не приводятся полные и строгие описания процедур (методов) и их обоснования для решения задач контроля и диагностики для нечетких автоматов, которым посвящена статья. Имеется еще одна публикация того же автора (почти с тем же названием, но в другом издании), которая по тексту просто дублирует первую. Других публикаций по этой теме найти не удалось.

В статье описывается метод сведения задачи построения обнаруживающих тестов для нечетких автоматов к решению аналогичной задачи для четких автоматов. Основой предлагаемого метода является преобразование заданного нечеткого автомата G в такой соответствующий ему четкий автомат \tilde{G} , для которого обнаруживающий в нем неисправность тест позволяет обнаруживать ее и в заданном нечетком автомате. Идея такого преобразования была использована нами ранее для решения задачи поиска состояний сигналов в нечетких автоматах [6]. Использованная там модель автомата оказалась пригодной и для рассматриваемой здесь задачи, а сама идея преобразования нечеткого автомата в четкий — полезной и эффективной. Для четких автоматов различных классов ныне разработан ряд методов синтеза различных типов тестов, и потому они могут быть использованы и для нечетких автоматов. Упомянутые методы для четких автоматов описаны в большом числе статей, монографий, учебников и учебных

пособий. Этот обширный по объему материал лежит вне рамок предлагаемой статьи и здесь не отражен. Вместе с тем приведем некоторые источники [7–9], в которых упомянутые методы синтеза тестов для четких автоматов освещены достаточно подробно.

Встречающиеся далее понятия и термины из теории нечетких множеств трактуются так, как они определены в известной монографии [10]. Поскольку они ныне широко распространены и известны, то они далее не определяются и не поясняются.

1. Некоторые основные определения

Вначале кратко напомним два понятия из [10]. Пусть $A \subset E$, тогда запись

$$A = \{x_1 | \mu(x_1), x_2 | \mu(x_2), \dots, x_n | \mu(x_n)\}, \quad (1)$$

где $\mu(x_i)$ — значение характеристической функции, определяющей степень принадлежности элемента x_i подмножеству A , задает нечеткое подмножество A множества E . Принадлежность элемента x множеству A будет записываться с помощью характеристической функции $\mu_A(x)$, которая может принимать любое неотрицательное значение. Далее полагается, что это числа из отрезка $[0, 1]$. Условимся, что если $\mu_A(x) = 0$, то элемент $x \notin A$, если $\mu_A(x) = 1$, то $x \in A$. Тогда выражение $A = \{x_1, \dots, x_n\}$, где опущены записи $\mu(x_i) = 1$ в (1), означает, что подмножество A содержит все элементы $x_i, i = 1, \dots, n$.

Предполагается, что нечеткий автомат произвольного типа может задаваться в виде нечеткого графа. Напомним его определение из [10]. Пусть E_1, E_2 — два множества и пусть элемент $x \in E_1$, а $y \in E_2$. Множество упорядоченных пар (x, y) определяет прямое произведение $E_1 \times E_2$. Нечеткое подмножество G такое, что

$$\forall (x, y) \in E_1 \times E_2 \mu_G(x, y) \in M, \quad (2)$$

где $M = [0, 1]$ — множество принадлежностей $E_1 \times E_2$, называется нечетким графом.

В нечетком графе G пара (x, y) интерпретируется как дуга этого графа. Далее предполагается, если в нечетком графе неравенство $\mu(x, y) \neq 0$ в выражении (2) для дуги (x, y) графа G выполняется, то соответствующая дуга из

множества $E_1 \times E_2$ может принадлежать этому графу, а все дуги (x, y) , для которых $\mu(x, y) = 0$, ему не принадлежат. Это позволяет представить множество всех дуг графа в виде $V = \{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$ за счет отказа от указания для каждой дуги (x, y) конкретного ненулевого значения $\mu(x, y)$. Неапомним, что в [10] для нечеткого графа это требование было обязательным.

2. Модель нечеткого автомата

Используемая далее модель нечеткого автомата является нечетким графом (как в [6]) $G = (V, E)$, где V — множество вершин (состояний автомата), а E — множество дуг. В отличие от четкого графа его вершины могут быть двух типов. Вершины первого типа (будем именовать их каноническими) содержат только одно состояние нечеткого автомата (аналог состояния в четком автомате). Вершины второго типа содержат множество состояний нечеткого автомата с числом элементов не менее двух (далее они именуется как a -вершины (альтернативные)). Заметим, что a -вершины в общем случае могут представлять собой множество, содержащее как канонические вершины, так и a -вершины.

При функционировании нечеткого автомата происходят переходы из одного состояния автомата s в некоторое состояние \tilde{s} , которые будем обозначать $s \rightarrow \tilde{s}$. В предлагаемой модели нечеткость проявляется в процессе функционирования при подаче на автомат входной последовательности. Этот процесс носит стохастический (вероятностный) характер. Выбор очередной дуги графа (из множества альтернативных) при переходе зависит от степени их принадлежности и производится во всех переходах, в которых участвуют альтернативные состояния. Над (под) стрелкой (дугой) условимся писать входной сигнал x , при подаче которого происходит этот переход, и рядом значение характеристической функции $\mu(s, \tilde{s})$ этой дуги.

При подаче на нечеткий автомат A любой входной последовательности он движется по некоторой траектории, образованной последовательностью из состояний, которую назовем конкретной реализацией. Понятно, что число различных реализаций зависит от количества

возникающих ситуаций с выбором состояния из альтернативных при движении по траектории, а также от самой входной последовательности. Однако в каждой конкретной реализации после состоявшегося выбора очередной дуги (для продолжения траектории движения) автомат A функционирует как обычный четкий автомат.

Воплощение любого нечеткого автомата в электронное устройство подразумевает использование элементов памяти, например триггеров разных типов. В этом случае каждое состояние автомата должно быть представлено в виде комбинации значений на выходах используемых триггеров. Отсюда следует, что при синтезе нечеткого автомата необходимо будет решать задачу кодирования состояний, которые будем обозначать символами s_j . Методы ее решения известны и описаны в многих источниках, например, в [7, гл. 58, 59].

После осуществления преобразования нечеткого автомата в четкий, о чем речь пойдет ниже, описать его функционирование можно с использованием классической таблицы переходов — выходов в терминах символов s_j и входных сигналов x_i . Подчеркнем, что в ее ячейках отсутствуют значения степеней принадлежности соответствующих дуг. Это объясняется тем, что в алгоритме преобразования нечеткого графа в четкий предусмотрено использование всех канонических состояний автомата и связывающих их дуг (переходов), для которых значения степени принадлежности могут быть любыми не нулевыми. Такие конкретные значения просто означают, что упомянутая дуга потенциально может принадлежать множеству дуг графа. Только это для нас важно и потому конкретные значения можно не указывать. Нулевое значение степени принадлежности (прочерк в ячейке таблицы) соответствует запрещенной дуге.

Сказанное выше означает, что алгоритм предложенного преобразования нечеткого автомата в четкий предусматривает потенциальную возможность движения нечеткого автомата (по состояниям) по любым стохастически возникающим траекториям. Они возникают при любой возможной конкретной реализации движения автомата, которая описывается в общем случае частично заданной

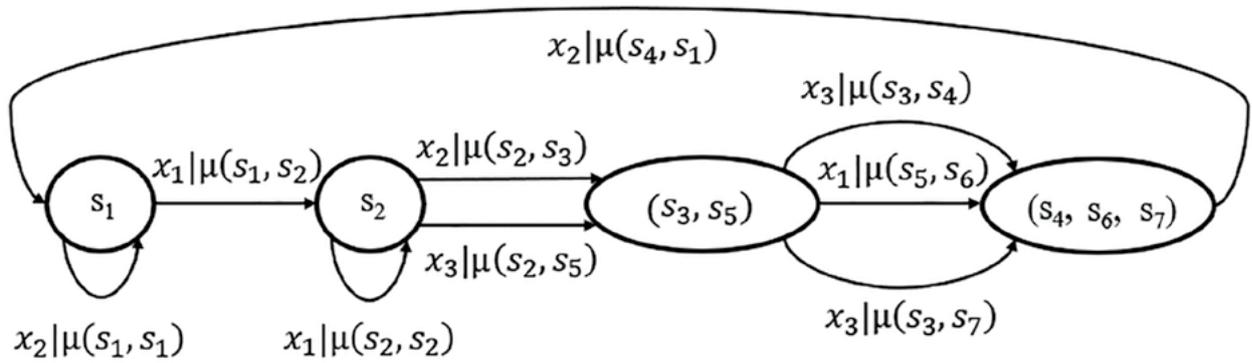


Рис. 1. Пример графа нечеткого автомата G

таблицей переходов-выходов. Последнее означает, что ее некоторые ячейки могут содержать прочерки.

Поясним это на примере. Известно, что на выходе RS -триггера, если они использованы при синтезе дискретного устройства, при подаче входов $R = S = 1$ появляется неизвестный сигнал (0 или 1). Если до подачи этих входов автомат функционировал как четкий, то при подаче таких сигналов он превращается в нечеткий. Чтобы избежать этого, можно запретить подачу такой комбинации на входы триггера.

В качестве примера графа автомата на рис. 1 изображен нечеткий граф G (он заимствован из [6]), изображенный по принятому нами правилу записи.

Как видно из рис. 1, автомат G имеет 4 состояния, из них два s_1, s_2 — канонических и два $(s_3, s_5), (s_4, s_6, s_7)$ — a -состояния, содержащие в качестве компонентов пять канонических состояний, представленных в скобках.

Очевидно, что в графе нечеткого автомата возможны только следующие виды переходов между состояниями:

- 1) $v \rightarrow v$, где v — канонические вершины (состояния автомата);
- 2) $v \rightarrow w$, где v — каноническая вершина, w — a -вершина;
- 3) $w \rightarrow v$, обратный переход для указанного в п. 2;
- 4) $w \rightarrow w$, где w — a -вершина.

3. Постановка задачи

В общей формулировке рассматривается следующая задача: пусть заданы нечеткий автомат и множество неисправных его

модификаций из числа допустимых. Требуется построить такую входную последовательность (тест), которая обнаруживает все неисправности заданного множества.

Неисправность — это модель, представляющая эффект физического дефекта. Будучи моделью, она не всегда точно соответствует дефекту, но модели, как правило, полезны и эффективны при обнаружении дефектов. Примером являются константные неисправности (одиночные и кратные), когда одна или более линий схемы принимают постоянные значения 0 или 1. Эта модель чрезвычайно полезна благодаря своей простоте и удовлетворительной адекватности. По этой причине она используется в качестве базовой модели для многих методов синтеза тестов. Принято полагать [9], что одиночная константная неисправность действует только на соединение между вентилями, но сами логические элементы функционируют правильно.

Опишем класс допустимых неисправностей заданного автомата. Известно, что в реальных дискретных устройствах довольно часто возникают константные неисправности (одиночные и кратные). Ради упрощения изложения условимся в качестве класса допустимых неисправностей нечеткого автомата рассматривать далее только одиночные константные неисправности. В принципе этот класс может быть достаточно просто расширен, например, до класса кратных константных неисправностей на основе использования методологии для одиночных неисправностей. Задать неисправность можно, указав ее место и тип в схеме, либо на языке таблицы входов-выходов

автомата, изменяя содержимое некоторых ее клеток.

Любой нечеткий автомат G с одиночной константной неисправностью можно реализовать в виде электронной схемы, содержащей элементы памяти (триггеры), «операционные» вентили и связи между ними. Понятно, что заданной неисправности в этом (автомате) графе G можно поставить в соответствие одиночную константную неисправность в четком (автомате) графе \tilde{G} , полученном после преобразования графа G .

При задании неисправностей таблицей в каждой ее ячейке, соответствующей переходу автомата $s \rightarrow \tilde{s}$ при подаче входного сигнала x , должно быть указано состояние \tilde{s} , если переход не запрещен, и выходной сигнал автомата. (В действительности выходные сигналы в используемой таблице будут отсутствовать, о чем было упомянуто). Появление неисправностей приводит либо к изменению выходов автомата, либо к изменению переходов между состояниями при последующем его функционировании.

Сделаем еще одно естественное предположение. В процессе подачи на автомат обнаруживающего теста в нем не могут возникать другие неисправности, а заданные неисправности сохраняются во время подачи всего теста.

Если нечеткий автомат задан в виде графа, то локацию неисправности и ее тип (обозначение изменившегося состояния и тип — константа 0 (1)) можно указать на соответствующей дуге графа.

4. Преобразование нечеткого графа автомата в четкий граф

Исходной информацией для решения задачи, кроме нечеткого графа G , является также задание состояний-преемников при переходах (или запрещение перехода) в автомате при различных входных сигналах. Такая информация представляется в виде таблицы переходов-выходов автомата \tilde{G} . Для нашего примера она помещена в таблице, которая заимствована из [6].

Прочерки в некоторых ячейках таблицы означают, что соответствующий переход запрещен. В таблице не приведены выходные

Переходы автомата \tilde{G}

x	s						
	s ₁	s ₂	s ₃	s ₄	s ₅	s ₆	s ₇
x ₁	s ₂	s ₂	s ₄	s ₄	s ₆	s ₆	—
x ₂	s ₁	s ₃	s ₃	s ₁	s ₃	—	—
x ₃	—	s ₅	s ₇	—	s ₅	—	s ₇

сигналы автомата \tilde{G} . Они нужны только при построении обнаруживающего теста. Для краткости в статье не приводятся примеры построения тестов для четких автоматов, поскольку соответствующие методы известны и нет необходимости их иллюстрировать.

Алгоритм преобразования нечеткого графа в четкий подробно описан в [6, раздел 2], там же приведен и конкретный пример с комментариями. Так, результат преобразования нечеткого автомата, изображенного на рис. 1, в четкий автомат представлен на рис. 2. Изображение графа четкого автомата заимствовано из [6, раздел 2].

5. Обоснование метода решения задачи

Использованный алгоритм преобразования нечеткого графа G в четкий граф \tilde{G} осуществляет замещение переходов, содержащих a -вершины, на переходы между каноническими вершинами. Процесс преобразования завершается, если на очередном его шаге множество вершин преобразуемого автомата содержит только канонические вершины.

Введем некоторые обозначения, которые потребуются нам при обосновании метода. Пусть z есть число всех возможных реализаций исправного нечеткого автомата A , возникающих из некоторого (одного и того же) фиксированного состояния при подаче заданной входной последовательности T , которую назовем тестом. Обозначим множество этих реализаций (set of realization of fault — free automata) как $SRFF(A) = \{A_1, A_2, \dots, A_z\}$. Это множество образуют четкие автоматы A_i ($i = 1, 2, \dots, z$), полученные из автомата A фиксацией всех возможных вариантов выбора альтернативных состояний, возникающих при подаче на него теста T (из фиксированного начального состояния s_i). Понятно, что автоматы множества $SRFF(A)$ в совокупности моделируют все возможные

варианты траекторий движения исправного автомата A при подаче теста T .

Обозначим как $SRF(A^f) = \{A_1^f, A_2^f, \dots, A_z^f\}$ аналог множества $SRFF(A)$, где каждый элемент $A_i^f (i=1, 2, \dots, z)$ — конкретная реализация автомата A при наличии в нем заданной неисправности f . Элементы этого множества — это четкие автоматы, полученные при наличии в автомате A неисправности f (обозначим его как A^f) при подаче теста T из фиксированного начального состояния s_i (того же, что и в автомате A) при фиксации всех возможных вариантов выбора альтернативных состояний. Очевидно, что автоматы множества $SRF(A^f)$ в совокупности моделируют все возможные варианты траекторий автомата A при наличии в нем неисправности f при подаче теста T .

Содержательный смысл двух введенных множеств позволяет утверждать, что каждому элементу множества $SRFF(A)$ взаимно однозначно соответствует некоторый элемент множества $SRF(A^f)$. Это фактически означает, что каждой конкретной реализации нечеткого автомата A (траектории его движения при оговоренных выше условиях) взаимно однозначно соответствует некоторая конкретная траектория движения четкого автомата, моделирующего нечеткий при наличии в нем заданной неисправности f . Понятно, что тогда известными для четких автоматов методами можно построить тест, который эту неисправность обнаруживает.

Структура использованных фрагментов замещения и изложенное выше позволяют сделать вывод: любой конкретной реализации траектории движения в графе G однозначно соответствует некоторая траектория движения в четком графе \tilde{G} . Иными словами, в полученном в результате преобразования графе \tilde{G} имеется возможность моделировать любую возникающую траекторию движения в заданном нечетком графе (автомате) G , в том числе при заданной одиночной константной неисправности.

Из изложенного вытекает справедливость следующего утверждения.

Теорема. Любой обнаруживающий заданную одиночную константную неисправность

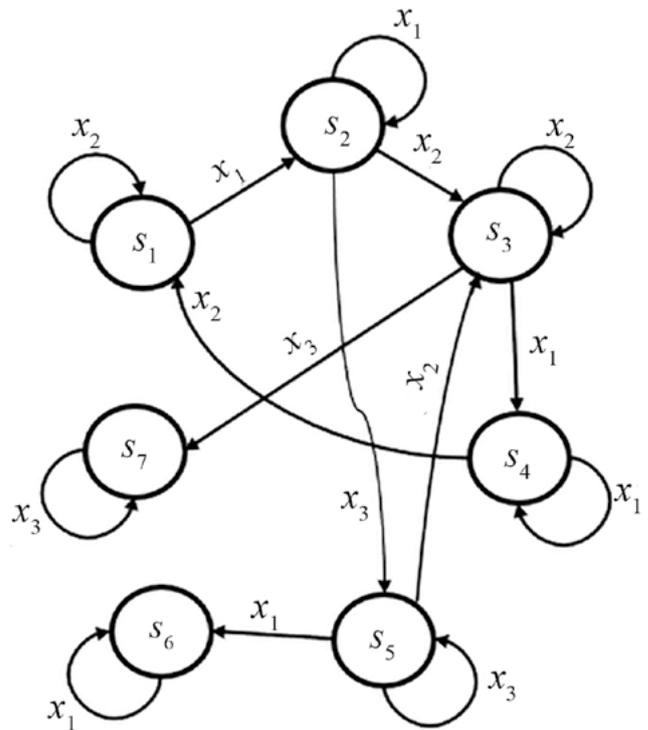


Рис. 2. Граф четкого автомата, полученного после преобразования нечеткого автомата на рис. 1

тест в четком автомате (графе \tilde{G}), представленном построенным по предложенному алгоритму преобразованию заданного нечеткого автомата (графа G), обнаруживает соответствующую ей неисправность в нечетком автомате (графе G).

Наглядность метода и простота восприятия логики предлагаемого решения очевидны, и потому теорема не требует дополнений к изложенному выше для обоснования ее справедливости.

Эта теорема является основой предлагаемого в статье метода решения рассматриваемой задачи, который содержит два этапа. Первый этап состоит в предварительном преобразовании заданного нечеткого графа в четкий. Второй этап заключается в выборе среди известных методов синтеза обнаруживающих тестов для константных неисправностей в четких автоматах наиболее приемлемого по сложности вычислений и быть может также по каким-нибудь другим параметрам. Наконец, с использованием выбранного метода строится тест в этом четком графе для той неисправности, которая ей соответствует в нечетком.

6. Организация процесса тестирования автомата и заключение по его результатам

Подчеркнем, что в статье речь идет не о синтезе какого-либо одного конкретного метода для нечетких автоматов, а о концепции (идее), на основе которой для нечетких автоматов возможно использование различных ранее разработанных и известных методов синтеза тестов для четких автоматов.

Известно несколько подходов к построению тестов для дискретных устройств с памятью [9]. Методы синтеза одного из них базируются на теории экспериментов с автоматами. Предлагаемая в статье концепция относится к данному подходу. Некоторые из этих методов описаны в ставшей классической монографии А. Гилла [14], другие представлены во многих более поздних публикациях, в частности в [9]. Наш выбор автоматного подхода связан с его важным достоинством — он обеспечивает высокую степень полноты обнаружения неисправностей и широкий класс возможных неисправностей (не только константных). К недостаткам подхода относится высокая сложность построения тестов и длина тестовой последовательности.

Напомним, что контроль и диагностирование устройства с памятью с использованием автоматной модели (будем называть его просто автоматом) требует предварительной установки его в известное начальное состояние.

Обычно это можно сделать подачей на его входы синхронизирующих последовательностей, которые существуют не всегда. При их отсутствии установить автомат в известное начальное состояние можно с помощью идентифицирующих (установочных или диагностических) последовательностей.

В [14] рассмотрены установочные и диагностические задачи для автоматов, которые предполагают известными таблицы переходов и выходов автомата, а также множество допустимых начальных состояний (оно может совпадать с множеством всех состояний автомата). Установочная (диагностическая) задача — это задача определения конечного (начального) состояния после проведения соответствующего эксперимента. Эксперименты

называются безусловными (условными), если прикладываемая входная последовательность полностью определена заранее (состоит из двух или более последовательностей, причем они определяются на основе реакций предыдущих последовательностей). Эксперименты могут быть простыми (кратными), если они проводятся с одним экземпляром автомата (одновременно с несколькими экземплярами идентичных автоматов). В [14] описаны методы построения идентифицирующих последовательностей и доказаны теоремы о возможности всегда получить решения установочных и диагностических задач с помощью простых или кратных (условных и безусловных) экспериментов.

Общий тест T для обнаружения заданной одиночной константной неисправности в нечетком автомате в рассматриваемой нами задаче состоит из z частичных тестов T_i , где z — число элементов множества $SRF(A^f) = \{A_1^f, A_2^f, \dots, A_z^f\}$. Однако тестирование нечеткого автомата A может иногда содержать меньше, чем z этапов. На i -ом этапе производится тестирование четкого i -го автомата (он может быть как A_i , так и A_i^f , каким именно, нам, естественно, неизвестно). Для неисправного четкого автомата заранее любым подходящим методом синтезируется частичный тест T для обнаружения заданной неисправности f . Проверяемый автомат заранее устанавливается в известное начальное состояние (в одно и то же как A_i , так и A_i^f), и на него подается тест T_i . Реакция проверяемого автомата сравнивается с реакцией неисправного автомата A_i^f на частичный тест T_i , которая тоже заранее вычисляется. Понятно, что при совпадении этих реакций проверяемый автомат содержит неисправность f , и процесс тестирования на этом завершается.

После выполнения описанного процесса для всех элементов множества

$$SRF(A^f) = \{A_1^f, A_2^f, \dots, A_z^f\}$$

и при отсутствии совпадения реакций на всех z частичных тестах T_i делается естественный вывод об отсутствии неисправности в заданном проверяемом нечетком автомате A .

Заключение

Предложенная в статье концепция синтеза обнаруживающих тестов для заданной неисправности в нечетком автомате произвольного класса базируется на преобразовании этого автомата в соответствующий ему четкий автомат. Предложенный алгоритм преобразования прост для понимания, что видно из его описания. Он очевиден благодаря наглядности и легко понимаемой логике построения. Именно эти качества объясняют простоту обоснования предлагаемого алгоритма.

Нечеткие автоматы оказываются востребованными при разработке достаточно простых моделей предметной области в случаях, когда требуется высокая гибкость в настройке системы управления, или требуется расширить область входных параметров. Так, в [15] представлено эффективное решение реальной задачи терморегулирования производственной установки с целью управления ее температурным режимом. В качестве базовой модели использовался нечеткий автомат с конечной памятью (НАКП), реализуемый в виде модифицированной нечеткой комбинационной схемы с использованием внешнего блока памяти (МНКС). Быстродействие МНКС оказывается выше, чем быстродействие НАКП. Быстродействие нечетких устройств оказывается на уровне быстродействия ПИД-регуляторов. При этом нечеткие устройства обладают большей простотой настройки, чем ПИД-регуляторы.

Оценивая в целом проблему синтеза тестов для четких (классических) и нечетких автоматов, можно констатировать, что последние являются для решения этой проблемы существенно более «трудным» объектом. Как видно из изложенного выше, для нечетких автоматов синтез тестов требует значительно больше вычислительных затрат на преодоление трудностей, вызываемых феноменом нечеткости. ▲

Список источников

- Zadeh L. A. Fuzzy sets / L. A. Zadeh // *Information and Control*. — 1965. — Vol. 8. — Iss. 3. — Pp. 338–353.
- Сперанский Д. В. Эксперименты с нечеткими автоматами / Д. В. Сперанский // *Автоматика и телемеханика*. — 2015. — № 2. — С. 107–124. — EDN: TOBFFF
- Сперанский Д. В. Тестирование нечетких линейных автоматов // *Известия Саратовского университета. Серия «Математика. Механика. Информатика»*. — 2019. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 233–241. — DOI: 10.18500/1816-9791-2019-192-233-240. — EDN: JPNAKG
- Сперанский Д. В. Синтез обнаруживающих тестов для нечетких автоматов с конечной памятью / Д. В. Сперанский // *Вестник Томского государственного университета*. — Управление, вычислительная техника и информатика. — 2024. — № 66. — С. 120–127. — DOI: 10.17223/19988605/66/12. — EDN: PLAEMB
- Курбанмагомедов К. Д. Анализ поведения абстрактного нечеткого автомата и основные процедуры решения установочной, контролирующей и диагностирующей задач / К. Д. Курбанмагомедов // *Известия Дагестанского государственного педагогического университета*. — Естественные и точные науки. — 2011. — № 1(14). — С. 55–58.
- Сперанский Д. В. Поиск состязаний сигналов в нечетких асинхронных автоматах / Д. В. Сперанский, С. А. Лунев // *Автоматика на транспорте*. — 2024. — № 2. — С. 178–189. — DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-02-178-18. — EDN: JANKXY
- Закревский А. Д. Логические основы проектирования дискретных устройств / А. Д. Закревский, Ю. В. Поттосин, Л. Д. Черемисинова. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 592 с.
- Пархоменко П. П. Основы технической диагностики / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомонян; под ред. П. П. Пархоменко. — М.: Энергоиздат, 1981. — 320 с.
- Скобцов Ю. А. Моделирование, тестирование и диагностика цифровых устройств / Ю. А. Скобцов, Д. В. Сперанский, В. Ю. Скобцов. — М.: Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ», 2012. — 439 с. — EDN: RYSHKX
- Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств / А. Кофман. — М.: Радио и связь, 1982. — 432 с.
- Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д. А. Поспелова. — М.: Наука, 1986. — 312 с.
- Норвич А. М. Построение функции принадлежности и теория вероятностей. Последние достижения: пер. с англ. / А. М. Норвич, И. Б. Турсон; под ред. Р. Р. Ягера. — М.: Радио и связь, 1986. — 408 с.
- Шопин А. Г. Построение функции принадлежности нечеткого множества и оценка его вероятностных характеристик / А. Г. Шопин // *Исследования в России: электронный ресурс*. — URL: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/040.pdf>.
- Gill A. Introduction to the theory of finite — state machine / A. Gill. — Mc Graw-Hill company, 1962. — 207 p.
- Марценюк М. А., Селетков И. П. Приведение конечного автомата к нечеткой комбинационной схеме с блоком памяти / М. А. Марценюк, И. П. Селетков // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. — № 6 (210). — 2014. — С. 67–80. — EDN: TEWVZN

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 1, pp. 66–74
DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-66-74

Construction of Detection Tests for Fuzzy Automata

Information about authors

Speranskiy D. V., Doctor in Engineering, Professor. E-mail: speranskiy.dv@gmail.com

Lunev S. A., Doctor in Engineering, Associate Professor. E-mail: slunev@mail.ru

Russian University of Transport (MIIT), Department of Transportation Infrastructure Management Systems, Moscow

Abstract: The paper deals with the problem of synthesizing detection tests for discrete devices with memory represented by a mathematical model of fuzzy automaton. In previously published works methods for solving a similar problem for two types of fuzzy automata (linear and with finite memory) were proposed. These methods were based on the use of their peculiarity that is their function law linearity. In contrast to “linear” automata, this paper considers arbitrary fuzzy automata defined in the form of fuzzy graphs and in tabular form. It is assumed that the fuzzy functioning of the automaton is manifested in the necessity of choosing alternative trajectories of motion at some automaton state transitions. The concept of test construction methods for arbitrary fuzzy automata based on the transformation of the model of a given automaton in the form of a fuzzy graph into a crisp graph is proposed. Such transformation is performed by the algorithm proposed in the paper. It is proved that any fault-detecting test in the resulting crisp graph (automaton) detects unambiguously its corresponding fault in the given fuzzy graph (automaton).

Keywords: fuzzy automata; fuzzy graphs; transformation of fuzzy automata into crisp ones; methods of synthesis of tests for crisp automata; constant faults; concept of synthesis of detection tests.

References

- Zadeh L. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965, vol. 8, pp. 338–353.
- Speranskiy D. V. Eksperimenty s nechetkimi avtomatami [Experiments with fuzzy automata]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 2015, I. 2, pp. 107–124. EDN: TOBFFF. (In Russian)
- Speranskiy D. V. Testirovanie nechetkikh lineinykh avtomatov [Testing of fuzzy linear automata]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Seriya «Matematika. Mekhanika. Informatika»* [Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics]. 2019, T. 19, I. 2, pp. 233–241, DOI 10.18500/1816-9791-2019-192-233-240. EDN: JPNKAG. (In Russian)
- Speranskiy D. V. Sintez obnaruzivajushih testov dlja nechetkikh avtomatov s konechnoj pamjatju [Synthesis of detection tests for fuzzy finite — memory automata]. Toms State University of Control and Computer Science, 2024, I. 66, pp. 120–127, DOI 10.17223/19988605/66/12. EDN: PLAEMB. (In Russian)
- Kurbanmagomedov K. D. Analiz povedenija abstraktnogo nechetkogo avtomata i osnovnie proceduri reshenija ustanovochnoj, kontroliruemoj i diagnostirujushej zadach [Analysis of the behavior of an abstract fuzzy automaton and basic procedures for solving installation, monitoring and diagnostic tasks]. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta* [Dagestan State pedagogical University Journal natural and exact Science], 2011, I. 1(14), pp. 55–58. (In Russian)
- Speranskiy D. V., Lunev S. A. Poisk sostjazanij signalov v nechetkikh asinhronnih avtomatah [Search for signaling races in fuzzy asynchronous automata]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation Research], 2024, I. 2, pp. 178–189. DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-02-178-18. EDN: JANKXY. (In Russian)
- Zakrevskiy A. D., Pottosin U. V., Cheremisinova L. D. *Logicheskie osnovy proektirovaniya diskretnyx ustroystv* [Logical bases of design of discrete devices]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2007, 592 p. (In Russian)
- Parhomenko P. P., Sogomonjan E. S. *Osnovi tehnicheckoj diagnostiki* [Fundamentals of technical diagnostics]. Moscow: Energoizdat Publ., 1981, 320 p. (In Russian)
- Skobcov U. A., Speranskiy D. V., Skobcov V. U. *Modelirovanie, testirovanie i diagnostika cifrovih ustroystv* [Modeling, testing and diagnostics of digital devices]. Moscow: Nacionalnij otkritij universitet «INTUIT». 2012, 439 p. EDN: RYSHKX. (In Russian)
- Kofman A. V. *Vvedenie v teoriju nechetkikh mnogestv* [Introduction to the theory of fuzzy sets]. Moscow: Radio and communications Publ., 1982, 432 p. (In Russian)
- Pospelov D. A. *Nechetkie mnogestva v modeljah upravlenija i iskusstvennogo intellekta* [Fuzzy sets in control and artificial intelligence models]. Moscow: The Science Publ., 1986, 312 p. (In Russian)
- Norvich A. M., Turson I. B. *Postroenie funktsii prinadlegnosti i teorija verojatnostey Poslednie dostizhenija. Pod redakciej R. R. Jagera* [The construction of the membership function and probability theory. Recent achievements. Edited by R. R. Jager]. Moscow: Radio and communications Publ., 1986, 408 p. (In Russian)
- Shopin A. G. Postrojenije funktsii prinadlegnosti nechetkogo mnogestva i otsenka ego verojatnostnih harakteristik [Construction of the membership function of a fuzzy set and evaluation of its probabilistic characteristics]. *Issledovaniya v Rossii* [Research in Russia], URL: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/040.pdf>. (In Russian)
- Gill A. Introduction to the theory of finite — state machine. Mc Graw-Hill company, 1962, 207 p.
- Marcenjuk M. A., Seletkov I. P. Privedenie konechnogo avtomata k nechetkoi kombimacionnoj sheme s blokom pamjati [Bringing a finite state machine to a fuzzy combinational scheme with a memory block]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU* [Computing, Telecommunications and Control of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University], 2014, I. 6 (210), pp. 67–80. EDN: TEWVZN. (In Russian)

КОНЕЧНЫЕ АВТОМАТЫ С САМОКОНТРОЛЕМ НА ОСНОВЕ ВЗВЕШЕННЫХ КОДОВ С СУММИРОВАНИЕМ И СВОЙСТВ САМОКВАЗИДВОЙСТВЕННЫХ 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};
e-mail: TrES-4b@yandex.ru

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа транспорта, Институт машиностроения, материалов и транспорта, Санкт-Петербург

²Российский университет транспорта, кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте», Москва

³Ташкентский государственный транспортный университет, кафедра «Автоматика и телемеханика», Ташкент

Описаны особенности организации контроля вычислений на выходах блоков конечных автоматов с использованием взвешенных кодов с суммированием и свойств самодвойственных и «близких» к ним самоквазидвойственных булевых функций. Предложена структура организации контроля вычислений по нескольким диагностическим признакам, основанная на использовании принципа логической коррекции сигналов от объекта диагностирования. Разработан алгоритм доопределения значений функций логической коррекции, используемый на этапе проектирования самопроверяемого дискретного устройства. Алгоритм подразумевает учет двух диагностических свойств: 1) каждый булев вектор на выходе блока коррекции сигналов в схеме встроенного контроля должен принадлежать множеству кодовых слов взвешенного кода с суммированием; 2) каждая функция, описывающая разряды булевых векторов, формируемых на выходах блока коррекции сигналов, должна быть самоквазидвойственной. Предложенный алгоритм позволяет синтезировать колоссальное количество вариаций схем встроенного контроля с различными показателями эффективности. Их использование на практике дает возможность выбора наилучшего способа организации схемы встроенного контроля по тому или иному критерию. Найдены некоторые оценки количества способов построения схем встроенного контроля для заданного числа входов и выходов объекта диагностирования. Предложенный метод универсален и может быть использован совместно с произвольными равномерными блоковыми кодами. Это, однако, требует учета свойств кодов для обеспечения формирования проверяющих тестов на элементы схемы встроенного контроля в процессе эксплуатации самопроверяемого устройства. Полученные в исследовании результаты могут быть использованы при синтезе дискретных устройств с обнаружением неисправностей.

Ключевые слова: самопроверяемое дискретное устройство; самопроверяемый конечный автомат; схема встроенного контроля; взвешенный код с суммированием; самодвойственная булева функция; самоквазидвойственная булева функция; логическая коррекция сигналов в самоквазидвойственных; контроль вычислений по двум диагностическим признакам.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-75-102

▼ Введение

Системы ответственного назначения не обходятся без использования дискретных блоков и узлов, а многие технологические операции реализуются за счет выполнения ряда логических условий или их проверок. Эффективность технологического процесса и его безопасность определяются, в конечном итоге, надежностью и безопасностью самой системы автоматического

управления. Неисправности в блоках и узлах приводят к ошибкам в вычисляемых функциях и, как следствие, к нарушениям в реализации заложенных в управляющие системы алгоритмов. При построении дискретных устройств учитываются особенности элементной базы и условия эксплуатации конечного изделия в целях обеспечения своевременного обнаружения развивающихся или возникающих дефектов,

сигнализации техническому персоналу о возникновении событий отказов и парировании неверных результатов вычислений. В этой связи широко применяются методы синтеза дискретных устройств с контролепригодными, самопроверяемыми и отказоустойчивыми структурами [1–6], а также методы тестового и рабочего диагностирования [7, 8].

Свойство самопроверяемости дискретного устройства позволяет контролировать его работоспособность в процессе выполнения им своих функций и при наличии отказов и ошибок в вычислениях вырабатывать специальный контрольный сигнал. В этих целях требуется на этапе синтеза дискретного устройства заложить в его структуру некоторые особые свойства, несущие диагностические признаки, по которым и обнаруживаются неисправности. Часто при разработке дискретных устройств в качестве таких диагностических признаков выступают принадлежность вычисляемых на рабочих или контрольных выходах при подаче на входы определенных наборов значений аргументов булевых векторов заранее выбранным равномерным блоковым кодам [9, 10] либо же принадлежность каждой вычисляемой функции заранее выбранному особому классу булевых функций [11]. Исходя из этих диагностических признаков в структуру разрабатываемого устройства по определенным правилам вносится избыточность (причем эта избыточность может относиться и к структурному, и к информационному, и к временному резервированию как на уровне аппаратных, так и на уровне программных средств). Именно это позволяет контролировать корректность вычислений в процессе функционирования дискретного устройства и, тем самым, косвенно фиксировать наличие неисправностей в его внутренней структуре.

Несмотря на то, что теория синтеза самопроверяемых дискретных устройств развивается уже более полувека, в ней остаются незатронутые аспекты и даже целые области «спрятанных» знаний. В настоящей статье читателю предлагается к изучению метод синтеза схем встроенного контроля (СВК) для комбинационных составляющих дискретных устройств, позволяющий применять любые равномерные двоичные блоковые коды при организации контроля

вычислений сразу же по двум диагностическим признакам — контролю формируемых на выходах устройств булевых векторов множеству кодовых слов заранее выбранного равномерного блокового кода и контролю каждой функции, описывающей разряды кодовых слов классу «близких» к самодвойственным — самоквазидвойственным — функций. Метод основан на использовании хорошо известного принципа логической коррекции сигналов (ЛКС) [12, 13] и позволяет строить колоссальное количество реализаций СВК с различными показателями эффективности, среди которых можно выбрать наилучшие по тому или иному критерию. Кроме того, предложенный автором метод не требует существенного усложнения контрольного оборудования за счет использования естественных свойств булевых функций, описывающих поведение устройств на линиях СВК.

1. Самодвойственные и самоквазидвойственные булевы функции и дискретные устройства

Работа дискретных устройств описывается с использованием аппарата булевой алгебры. Среди всего многообразия булевых функций в дальнейшем изложении нам потребуются самодвойственные булевы функции [14] и «близкие» к ним самоквазидвойственные¹ булевы функции [15].

Функция $f(x_1, x_2, \dots, x_t)$ называется самодвойственной, если

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

Функция $f(x_1, x_2, \dots, x_t)$ называется самоквазидвойственной, если

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

Самодвойственные булевы функции принимают противоположные значения на парах наборов значений аргументов вида $\langle x_t, x_{t-1} \dots x_2, x_1 \rangle$, $\langle \overline{x_t}, \overline{x_{t-1}} \dots \overline{x_2}, \overline{x_1} \rangle$. Данные наборы ортогональны

¹В работах автора книги [15] и в некоторых более ранних работах автора настоящей статьи для обозначения самоквазидвойственных булевых функций использовался не совсем удачный термин «самоантидвойственный».

по всем аргументам. Самоквазидвойственные функции в чем-то схожи с самодвойственными, но принимают одинаковые значения на наборах, ортогональных по всем аргументам. Будем далее говорить о таких наборах как об инверсных наборах значений аргументов. Фактически будем выделять пары инверсных наборов значений аргументов. Для их обозначения используем десятичные числа, соответствующие двоичным числам, записываемым в качестве наборов значений аргументов. Тогда можно выделить 2^{t-1} пар наборов вида: $(j, 2^t - 1 - j)$, $j \in \{0, 1, \dots, 2^{t-1} - 1\}$.

Используя свойства самодвойственных и самоквазидвойственных булевых функций, можно организовывать контроль вычислений на выходах дискретных устройств. Для этого необходимо фиксировать свойства рассматриваемых классов булевых функций, а именно — для самодвойственных функций фиксировать противоположные значения на каждой паре наборов значений аргументов $(j, 2^t - 1 - j)$, $j \in \{0, 1, \dots, 2^{t-1} - 1\}$, а для самоквазидвойственных — равенство значений функций при подстановке таких пар наборов значений аргументов.

На такую возможность относительно самодвойственных функций специалисты в области технической диагностики дискретных систем обратили внимание во второй половине прошлого столетия. В [16] предложены методы реализации булевых функций в виде схем, обладающих структурными свойствами для обнаружения любых одиночных константных неисправностей на линиях. Показано, что стандартная двухуровневая реализация схем в виде сетей И/ИЛИ или ИЛИ/И позволяет достигать этого свойства. Описаны и другие более общие структуры, наделенные этим свойством. Введены необходимые и достаточные условия, позволяющие обнаруживать неисправности при подаче на входы пар инверсных наборов значений аргументов.

Идеи работы [16] далее развивались в ряде публикаций, среди которых выделим статью [17]. В ней предложено синтезировать конечные автоматы, наделенные свойством самодвойственности булевых функций, реализуемых на выходах логических и выходных

преобразователей. Доказаны некоторые важные положения относительно вопроса синтеза самодвойственного конечного автомата (как полностью, так и частично определенного). Приведены примеры простейших конечных автоматов — триггеров.

Далее теория синтеза самодвойственных дискретных устройств развивалась в ряде работ научной школы профессоров Сапожниковых, где ими получены некоторые интересные результаты в области построения СВК с контролем вычислений по признаку самодвойственности булевых функций [18–21] и разработаны некоторые реализации самодвойственных триггеров [22, 23]. В части синтеза СВК данные работы фактически содержат методы организации контроля вычислений с предварительным сжатием сигналов от объекта диагностирования с использованием специальных преобразователей — кодеров равномерных блоковых кодов (причем ими рассматривались только приложения некоторых повсеместно используемых кодов — кодов с повторением, паритета, классических кодов Бергера и Хэминга). Таким образом, m сигналов от объекта диагностирования сжимается в k сигналов на выходе кодера выбранного кода, которые затем с использованием двухвходовых сумматоров по модулю два (элементов *XOR*) трансформируются в самодвойственные сигналы и контролируются в СВК (к слову, здесь как раз используется принцип ЛКС, упомянутый выше). Кроме того, профессорами Сапожниковыми был разработан единственный широко известный на сегодняшний день алгоритм синтеза защищенных от неисправностей структур с контролем вычислений по признаку самодвойственности вычисляемых функций, гарантирующий обнаружение любых одиночных неисправностей в них [24].

Следующий виток в развитии методов синтеза СВК с контролем вычислений при подаче на входы инверсных наборов значений аргументов связан с использованием не схем сжатия сигналов от объекта диагностирования, а полноценно всех свойств равномерных блоковых кодов совместно со свойствами самодвойственных булевых функций. В [25–28] предложены методы синтеза СВК

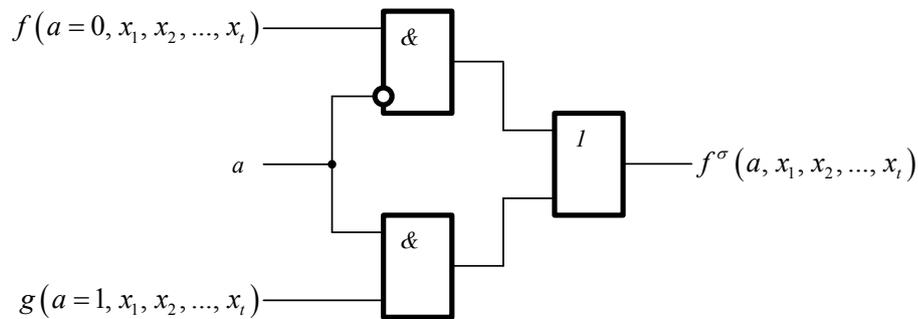


Рис. 1. Схема реализации самодвойственной и самоквазидвойственной функций

для устройств, выходы которых описываются самодвойственными булевыми функциями, подразумевающие использование для контроля вычислений и свойств равномерных блоковых кодов, и свойств самодвойственности формируемых в СВК функций. Ясно, что не все дискретные устройства обладают такими особенностями, но хорошо известно, например, из [29], что любую булеву функцию можно преобразовать в самодвойственную с использованием всего одной дополнительной переменной. Такое преобразование основано на разложении К. Э. Шеннона по одной переменной [30]:

$$\begin{aligned}
 f(x_1, \dots, x_j, \dots, x_t) &= \\
 &= \bar{x}_j f(x_1, \dots, 0, \dots, x_t) \vee x_j f(x_1, \dots, 1, \dots, x_t), \quad (3) \\
 j &\in \{1, 2, \dots, t\}.
 \end{aligned}$$

Аналогично получают и самоквазидвойственные реализации, на использование которых обратили внимание довольно давно (отнесем читателя к уже упомянутой монографии [15]), а вот на использование для контроля вычислений в дискретных устройствах – относительно недавно [31].

В соответствии с (3) можно получить самодвойственную или самоквазидвойственную булеву функцию так:

$$\begin{aligned}
 f^\sigma(a=0, x_1, x_2, \dots, x_t) &= \\
 &= \bar{a} f(a=0, x_1, x_2, \dots, x_t) \vee a g(a=1, x_1, x_2, \dots, x_t), \quad (4)
 \end{aligned}$$

где $f(a=0, x_1, x_2, \dots, x_t)$ – исходная функция, не зависящая от переменной a ;

$g(a=1, x_1, x_2, \dots, x_t) = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_t)$, если речь идет о самодвойственной реализации, и $g(a=1, x_1, x_2, \dots, x_t) = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_t)$, если речь идет о самоквазидвойственной реализации.

Структурно схема самодвойственного или самоквазидвойственного устройства будет реализовываться с применением окончного каскада, изображенного на рис. 1. На первый вход верхнего элемента логического умножения (AND) данного каскада будет подключаться схема реализации функции $f(a=0, x_1, x_2, \dots, x_t)$, а на второй вход нижнего элемента AND данного каскада – схема реализации функции $g(a=1, x_1, x_2, \dots, x_t)$.

Таким образом, методы получения самодвойственных и самоквазидвойственных структур хорошо проработаны, а примеры их использования для преобразования произвольных структур в самодвойственные можно найти в [29].

Перейдем к особенностям реализации самодвойственных и самоквазидвойственных конечных автоматов и СВК для их комбинационных составляющих.

2. Самодвойственные и самоквазидвойственные автоматы с контролем вычислений

Конечный автомат представляет собой абстрактную модель дискретного устройства. Неисправности в его блоках и структурных единицах приводят к нарушениям алгоритма функционирования, и в системах

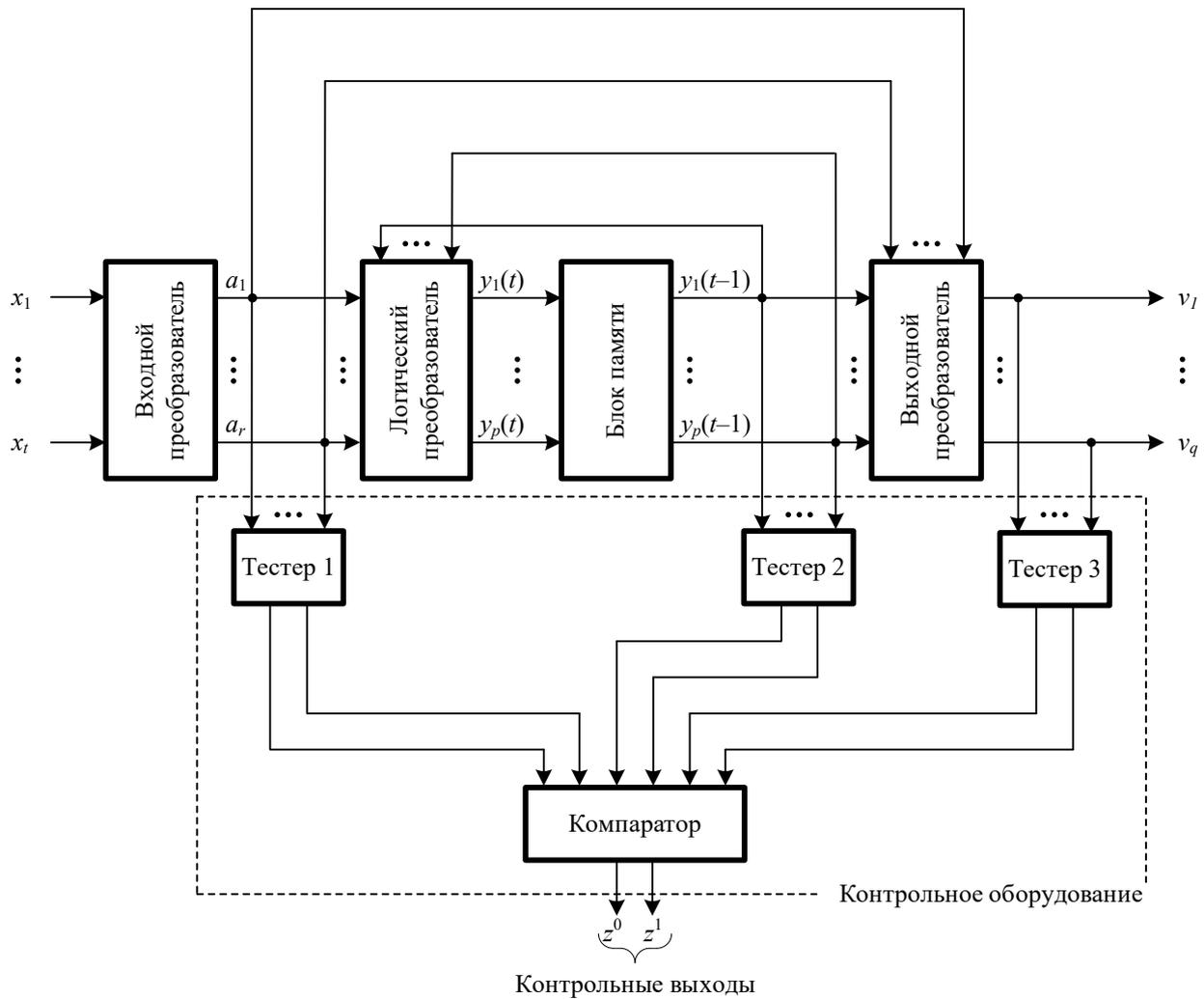


Рис. 2. Структура конечного автомата с контролем вычислений при кодировании входов, состояний и выходов

ответственного назначения они должны своевременно обнаруживаться, а неверно вычисленные результаты — блокироваться. Проблема обнаружения неисправностей в конечных автоматах хорошо известна и подробно исследована. Например, в [32] обсуждаются вопросы синтеза асинхронных конечных автоматов, свободных от критических состязаний, а также особенности синтеза автоматов, устойчивых к повреждениям внутренних компонентов, приводятся методы, позволяющие добиться свойства устойчивости автомата, основанные на разделении переходов и на временной коррекции блоков. В [33] приводятся методы синтеза конечных автоматов с обнаружением неисправностей, подразумевающие различные подходы — контроль вычислений на выходах входного, логического и выходного преобразователей. Все эти подходы основаны на

внесении избыточности в конечный автомат с последующим контролем вычислений на выходах его блоков с помощью тестеров. На рис. 2 приводится структура конечного автомата с контролем вычислений на выходах входного, логического и выходного преобразователей. Эта структура позволяет синтезировать полностью самопроверяемые конечные автоматы.

При синтезе конечного автомата по структуре рис. 2 в контролируемые блоки вносится избыточность. Другим способом синтеза полностью самопроверяемого конечного автомата является организации контроля вычислений с помощью внешних СВК. В этом случае в саму структуру конечного автомата избыточность не вносится, а требующиеся для обнаружения неисправностей элементы оказываются в выделенных СВК (рис. 3). Такой подход к организации самопроверяемого конечного

автомата позволяет наделять изначально спроектированное несамопроверяемое устройство данным свойством.

Хорошо известны и широко используются методы синтеза самопроверяемых конечных автоматов, основанные на использовании для обнаружения неисправностей и ошибок в вычислениях равномерных блоковых кодов с малой избыточностью. Наиболее часто в литературе можно встретить упоминание равномерных кодов, кодов с суммированием, кодов Хэмминга и их модификаций, используемых для решения задач синтеза конечных автоматов с обнаружением неисправностей и ошибок в вычислениях. Однако известны и другие способы построения самопроверяемых конечных автоматов. Одним из таких является контроль вычислений по признаку самодвойственности и / или самоквазидвойственности вычисляемых на выходах комбинационных составляющих конечного автомата функций [31]. Такой способ построения конечного автомата требует временной избыточности для реализации, поскольку подразумевает работу в импульсном режиме при представлении сигналов логического 0 и логической 1 в виде последовательностей прямоугольных импульсов — 0101...01 и 1010...10 соответственно.

Для построения самодвойственного и / или самоквазидвойственного конечного автомата достаточно реализовать конечный автомат в «обычном» виде, а затем комбинационные составляющие преобразовать в самодвойственные или же в самоквазидвойственные структуры. Элементы памяти при этом можно оставить стандартными, так как работать они будут в соответствии с принципами, заложенными в логический преобразователь на этапе его синтеза.

Известны следующие фундаментальные положения относительно самодвойственных конечных автоматов [17].

Утверждение 1. *Полностью определенный конечный автомат будет самодвойственным конечным автоматом, если будет самодвойственной его комбинационная составляющая.*

Утверждение 2. *Неполностью определенный конечный автомат будет самодвойственным конечным автоматом, если будет самодвойственной его комбинационная часть и будет выполнено*

следующее условие для любой пары $X\varphi \subset \Psi$, где Ψ — область определения автомата, X — входная последовательность, $\varphi = Y_1 Y_2 \dots Y_k$ — состояние автомата ($Y_i, i = \overline{1, k}$, — внутренние переменные): $X\varphi \subset \Psi$.

Кроме того, отмечено, что в самодвойственном конечном автомате, в отличие от комбинационной схемы, для получения инвертированной выходной последовательности необходимо выполнить два условия: подать инвертированную входную последовательность и проинвертировать перед этим исходное начальное состояние автомата.

Нетрудно показать справедливость аналогичных утверждений и относительно самоквазидвойственных конечных автоматов.

Утверждение 3. *Полностью определенный конечный автомат будет самоквазидвойственным конечным автоматом, если его комбинационная составляющая будет самоквазидвойственной схемой.*

Утверждение 4. *Неполностью определенный конечный автомат будет самоквазидвойственным автоматом, если его комбинационная часть будет самоквазидвойственной схемой и будет выполнено следующее условие для любой пары $X\varphi \subset \Psi$, где Ψ — область определения автомата, X — входная последовательность, $\varphi = Y_1 Y_2 \dots Y_k$ — состояние автомата ($Y_i, i = \overline{1, k}$, — внутренние переменные): $X\varphi \subset \Psi$.*

Дальнейшие исследования в теории синтеза самодвойственных и самоквазидвойственных конечных автоматов показали, что использованные ранее принципы контроля вычислений на выходах блоков конечных автоматов на основе равномерных блоковых кодов можно сочетать с контролем вычислений по признаку принадлежности булевых функций к особым и «близким» к ним классам булевых функций. Такое использование не требует существенного усложнения структуры конечного автомата (структуры наиболее часто оказываются менее сложными, чем структуры, подразумевающие дублирование автоматов). При этом значительно повышаются показатели контролепригодности в части наблюдаемости ошибок на контрольных выходах СВК. Улучшение показателей наблюдаемости ошибок достигается для различных видов неисправностей при различных конфигурациях элементов и связей между

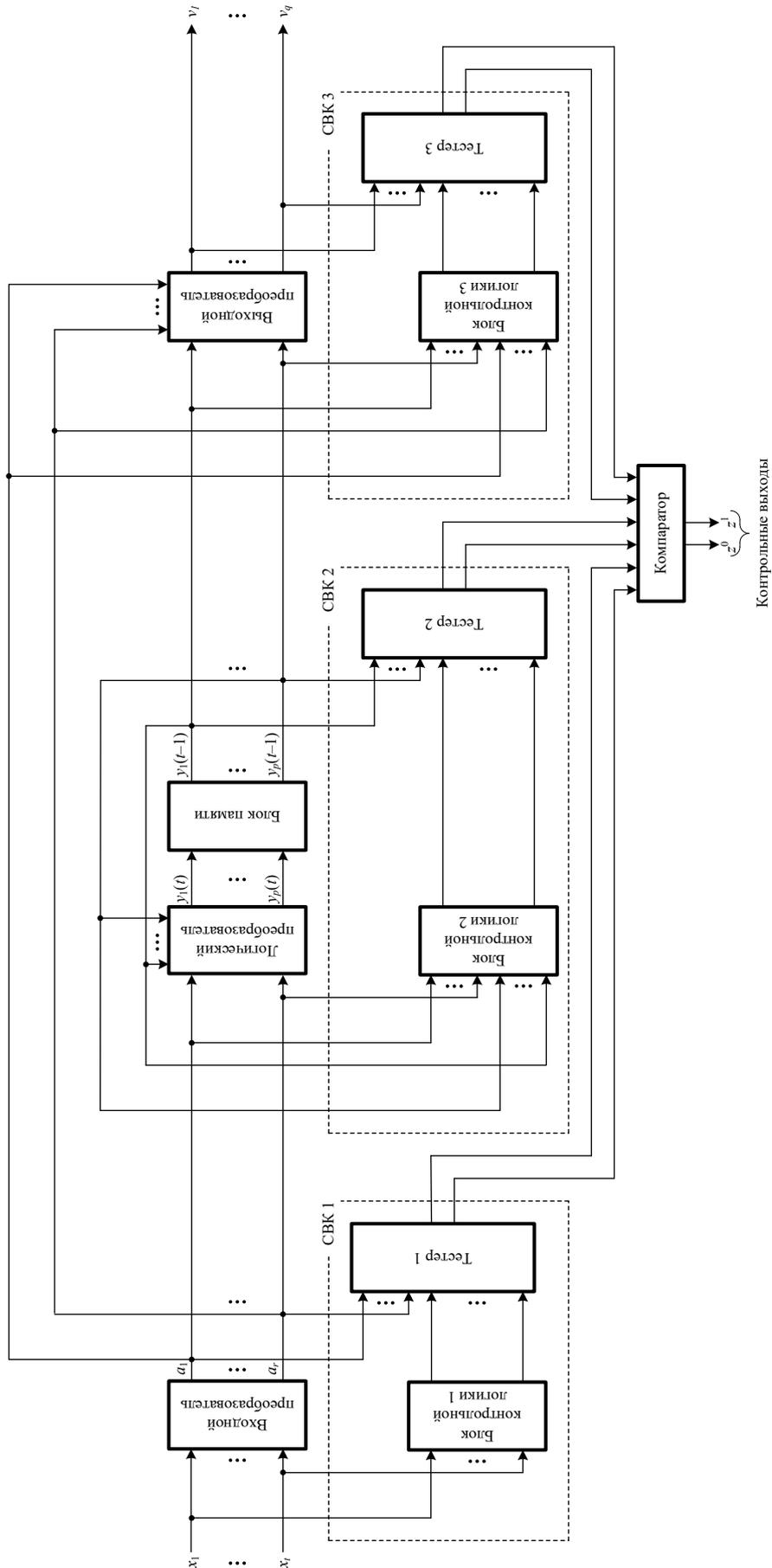


Рис. 3. Структура конечного автомата с внешними СВК

ними в структуре конечного автомата 25–40 % по сравнению с контролем вычислений только по одному диагностическому признаку.

Рассмотрим далее, как организуются типовые СВК для контроля вычислений в таких конечных автоматах. При этом в качестве равномерных блоковых кодов будем использовать обширный класс взвешенных кодов с суммированием, обладающий определенными особенностями для их использования при синтезе самопроверяемых дискретных устройств.

3. Взвешенные коды с суммированием

Опишем здесь принципы построения взвешенных кодов с суммированием и поясним, почему же все-таки именно этот класс кодов так интересен при синтезе полностью самопроверяемых конечных автоматов.

Одни из первых взвешенных кодов с суммированием описаны в классической работе Дж. М. Бергера в 1961 г. [34]. Для обеспечения обнаружения любых двукратных искажений при сохранении свойства фиксации и однонаправленных (монотонных) искажений в кодовых словах было предложено не просто подсчитывать количество нулевых разрядов в информационных векторах при построении кода, а оперировать весовыми коэффициентами, заранее приписанными разрядам информационного вектора. Для этого использовалась специальная последовательность натуральных чисел — натуральный ряд за исключением степеней двойки (последовательность A057716 в энциклопедии Н. Дж. А. Слоана [35]). В дальнейших исследованиях того же специалиста для обнаружения пакетов ошибок заданной длины применялись те же принципы построения кода, но для соответствующих разрядов выбиралась последовательность степеней двойки (A000079) [36]. В последующем различные способы взвешивания при построении кодов с суммированием с различными свойствами изучались в [37–41].

Выбор больших значений весовых коэффициентов и их суммирование приводят к построению кодов с высокой избыточностью, что при использовании в процессе синтеза конечных автоматов отражается на показателях сложности их реализации. Для снижения избыточности кода используется модулярная

арифметика: суммарный вес информационного вектора подсчитывается в кольце вычетов по заранее установленному модулю

$$M \in \{2, 3, \dots, W_{\max} + 1\}, W_{\max} = \sum_{i=1}^m w_i,$$

где $w_i \in \mathbb{N}$ — значение весового коэффициента i -го разряда информационного вектора с общим числом разрядов (длиной информационного вектора), равным m .

Обозначим взвешенные коды как $WS(m, k, M)$ -коды, где $k = \lceil \log_2 M \rceil$ — количество проверочных символов в контрольных векторах (длина контрольного вектора).

Использование модуля M позволяет ограничивать длину контрольного вектора и, тем самым, не приводить к существенному усложнению компонентов конечных автоматов [42]. Наибольший интерес при рассмотрении вопросов синтеза конечных автоматов представляют $WS(m, k, M)$ -коды с малым числом $k \leq 6$. Соответственно, при построении таких взвешенных кодов с суммированием требуется использовать модуль $M \leq 64$ [41].

Особыми свойствами обладают $WS(m, k, M)$ -коды, при построении которых выбирается модуль из множества

$$M \in \left\{ 2^1, 2^2, \dots, 2^{\lceil \log_2 (W_{\max} + 1) \rceil - 1}, 2^{\lceil \log_2 (W_{\max} + 1) \rceil} \right\},$$

$$W_{\max} = \sum_{i=1}^m w_i,$$

У таких кодов при определенных значениях $m \geq m_{\min}$ (m_{\min} — некоторое граничное значение числа информационных разрядов для каждого значения M , при котором формируются все сочетания значений весовых коэффициентов) при рассмотрении полного множества информационных векторов (его мощность равна 2^m) в качестве контрольных векторов формируются все возможные двоичные векторы с k разрядами (мощность множества контрольных векторов равна 2^k). Эта особенность данного подкласса $WS(m, k, M)$ -кодов учитывается при синтезе полностью самопроверяемой СВК на их основе: дело в том, что тестеры разделимых кодов наиболее часто синтезируется по двухкаскадной структуре, включающей в себя кодер и компаратор, для полной проверки которого и

потребуется формирование полного множества контрольных векторов с k разрядами [43, 44].

Еще одной особенностью взвешенных кодов с суммированием является то, что за счет взвешивания разрядов различными натуральными числами и подсчета суммарного веса в кольце вычетов по заданному модулю можно добиваться различных свойств обнаружения ошибок при фиксированном числе проверочных символов. Например, для широко используемых равномерных кодов или классических кодов с суммированием это невозможно. Для $WS(m, k, M)$ -кодов при определенном взвешивании разрядов и выборе модуля из множества

$$M \in \left\{ 2^1, 2^2, \dots, 2^{\lceil \log_2(W_{\max} + 1) \rceil - 1}, 2^{\lceil \log_2(W_{\max} + 1) \rceil} \right\},$$

$$W_{\max} = \sum_{i=1}^m w_i,$$

можно достичь теоретического минимума общего количества необнаруживаемых ошибок в информационных векторах кодовых слов при заданных значениях m и k .

Можно сказать, что класс $WS(m, k, M)$ -кодов, свойства которого до сих пор изучены не досконально (имеется лишь ограниченное количество работ в данном направлении, например, статья [41] и книга [45]), являются весьма перспективным классом равномерных разделимых кодов, использование которых будет эффективным по различным показателям при синтезе дискретных устройств с обнаружением неисправностей.

4. Структура организации контроля вычислений на выходах комбинационных составляющих конечных автоматов

Как известно [46, 47], комбинационные составляющие и элементы памяти тестируются с использованием разных принципов. Для комбинационных составляющих можно использовать самопроверяемые СВК, функционирующие параллельно с ними и проверяющие корректность вычислений на контролируемых выходах [2].

СВК на выходах комбинационных составляющих конечных автоматов по двум и более диагностическим признакам (принадлежность кодовых слов выбранному равномерному блоковому коду и принадлежность вычисляемых

функций самодвойственным и / или самоквазидвойственным) может быть синтезирована на основе традиционной структуры, подразумевающей дополнение информационных сигналов контрольными, либо на основе структуры, подразумевающей логическую коррекцию сигналов от объекта диагностирования.

Синтез СВК на основе традиционной структуры с контролем вычислений по нескольким диагностическим признакам реализуется только для изначально самодвойственных или самоквазидвойственных комбинационных устройств с применением таких равномерных блоковых кодов, проверочные символы которых описываются самодвойственными и / или самоквазидвойственными булевыми функциями [27, 28]. При синтезе СВК с применением структуры на основе ЛКС подобных ограничений не требуется, так как самодвойственные и / или самоквазидвойственные сигналы получают в самой СВК путем преобразований функций, вычисляемых объектом диагностирования в определенные контролепригодные функции [27]. Данная структура изображена на рис. 4.

Объектом диагностирования является комбинационное устройство $F(X)$, формирующее на каждом наборе значений аргументов $\langle x_i, x_{i-1} \dots x_2, x_1 \rangle = \langle X \rangle$ конкретные булевы векторы $\langle f_{m-k}(X), f_{m-k-1}(X) \dots f_2(X), f_1(X) \rangle$. Неисправности, возникающие в объекте диагностирования, приводят к возникновению ошибок на линиях его схемы, которые при подаче на входы определенных наборов значений аргументов транслируются на выходы в виде искажений истинных значений. Фиксируя данные искажения, можно косвенно судить об исправности или неисправности объекта диагностирования, соответственно, блокируя результаты вычислений им значений функций $f_1(X), f_2(X), \dots, f_{m-k-1}(X), f_{m-k}(X)$. Такую фиксацию обеспечивает использование специализированной СВК, включающей в себя несколько функциональных блоков.

Блок $G(X)$ на тех же наборах значений аргументов, что и объект диагностирования, вычисляет значения функций логической коррекции сигналов $g_1(X), g_2(X), \dots, g_{m-k-1}(X), g_{m-k}(X)$. Данные функции позволяют корректировать значения каждой функции $f_1(X), f_2(X), \dots, f_{m-k-1}(X), f_{m-k}(X)$ по правилу:

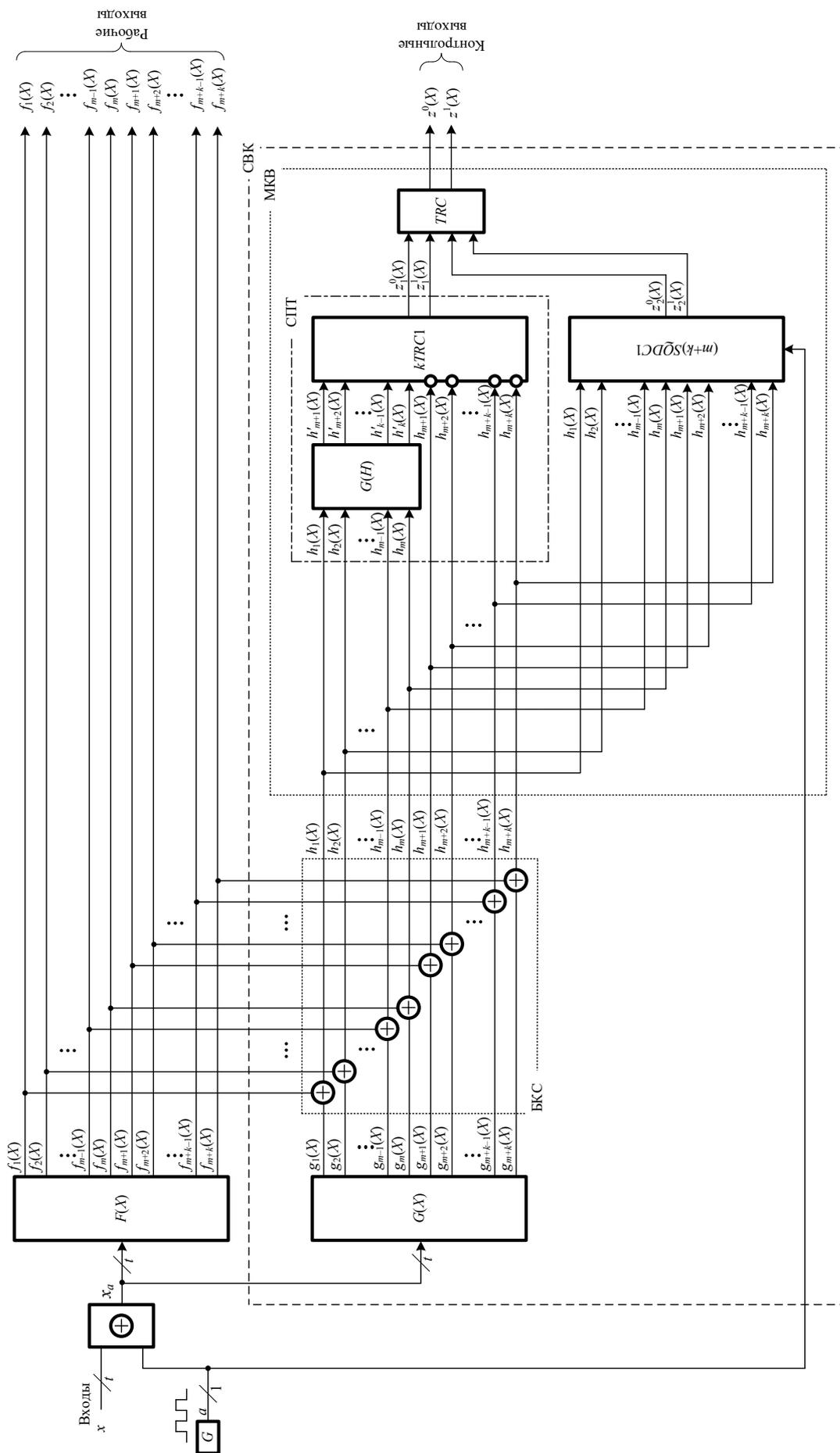


Рис. 4. Структура СВК с контролем вычислений по двум диагностическим признакам

$$h_i(X) = f_i(X) \oplus g_i(X), i = \overline{1, m+k}. \quad (5)$$

Для реализации правила (5) используется блок коррекции сигналов (БКС), образованный каскадом из параллельно расположенных $m+k$ двухвходовых элементов XOR. На первый вход каждого элемента XOR подается значение функции $f_i(X)$, а на второй вход — значение функции коррекции $g_i(X)$. Тем самым, на выходе БКС получаются значения уже совершенно иных функций $h_1(X), h_2(X), \dots, h_{m+k-1}(X), h_{m+k}(X)$. На этапе проектирования эти функции наделяются особыми диагностическими свойствами. В рассматриваемом в настоящей статье приложении важно наделить эти функции двумя свойствами: первое свойство — это принадлежность каждого кодового слова $\langle h_{m-k}(X) h_{m-k-1}(X) \dots h_2(X) h_1(X) \rangle$, формируемого на каждом наборе значений аргументов, выбранному $WS(m, k, M)$ -коду; второе свойство — принадлежность каждой функции $h_i(X)$ виду самоквазидвойственных булевых функций. Такими свойствами можно наделить функции $h_1(X), h_2(X), \dots, h_{m+k-1}(X), h_{m+k}(X)$ на этапе проектирования СВК, используя специальные алгоритмы (один из таковых приведен ниже).

Для контроля вычислений по двум диагностическим признакам использован модуль контроля вычислений (МКВ). Он содержит две подсхемы контроля.

Первая подсхема контроля является самопроверяемым тестером (СПТ) $WS(m, k, M)$ -кода и строится в виде двухкаскадной структуры «кодер + компаратор». Кодер $G(H)$ по значениям входов $h_1(X), h_2(X), \dots, h_{m-1}(X), h_m(X)$ формирует значения проверочных символов $h'_{m+1}(X), h'_{m+2}(X), \dots, h'_{m+k-1}(X), h'_{m+k}(X)$. Эти значения поступают на входы компаратора $kTRC1$, представляющего собой схему сжатия k парафазных сигналов в один. На другие входы компаратора поступают значения проверочных символов $h_{m+1}(X), h_{m+2}(X), \dots, h_{m+k-1}(X), h_{m+k}(X)$, вычисленные в БКС. Компаратор производит сравнение значений функций с одинаковыми нижними индексами. Так как он оперирует парафазными сигналами, сигналы либо от блока $G(H)$, либо от БКС предварительно инвертируются. В схеме рис. 4 инвертированы

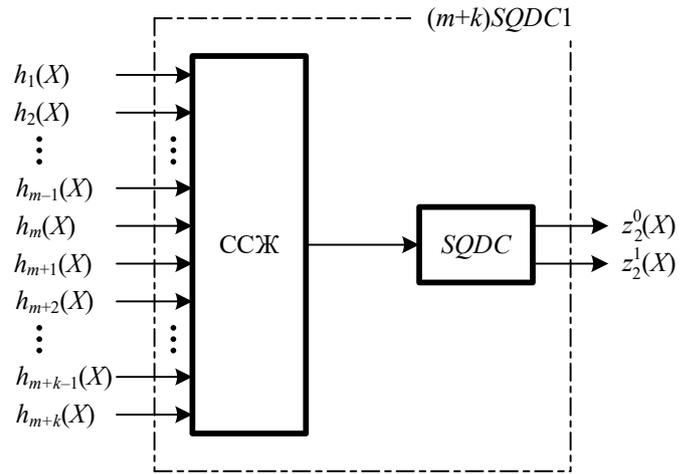


Рис. 5. Структура $(m+k)SQDC1$

сигналы от БКС. Компаратор реализуется на основе $(k-1)$ элементарного модуля сжатия парафазных сигналов TRC (two-rail checker) [48]. Данные модули самопроверяемы относительно модели одиночной константной неисправности и при наличии собственных неисправностей и ошибок в вычислениях формируют на выходах непарафазные сигналы. Выходы тестера $z_1^0(X), z_1^1(X)$ являются контрольными выходами подсхемы контроля вычислений по $WS(m, k, M)$ -коду.

Вторая подсхема контроля вычислений $(m+k)SQDC1$ позволяет контролировать принадлежность каждой функции $h_1(X), h_2(X), \dots, h_{m-1}(X), h_m(X)$ виду самоквазидвойственных функций. Наиболее простая реализация $(m+k)SQDC1$ представляет собой схему сжатия $(m+k)$ самоквазидвойственных сигналов в один и элементарный тестер самоквазидвойственного сигнала (рис. 5).

Схема сжатия (ССЖ) самоквазидвойственных сигналов аналогична схеме сжатия самодвойственных сигналов [49]. Она синтезируется на основе трехвходовых элементов XOR по структуре, представленной на рис. 6. Если на входы одного элемента XOR подается самоквазидвойственный сигнал, то на его выходе также присутствует самоквазидвойственный сигнал. Для

реализации схемы сжатия требуется $\left\lceil \frac{m+k}{2} \right\rceil$ трехвходовых элементов XOR. Особенностью

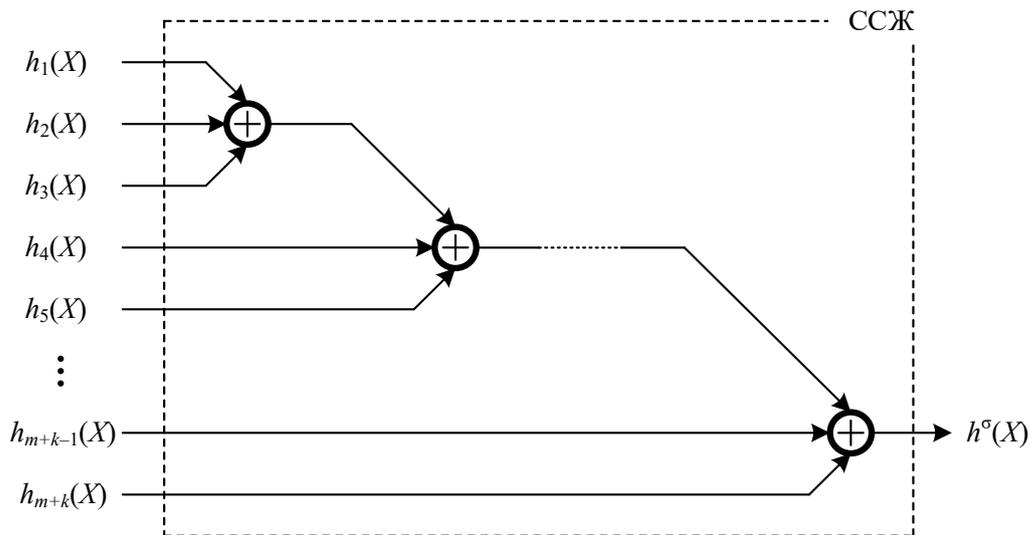


Рис. 6. Схема сжатия самоквазидвойственных сигналов

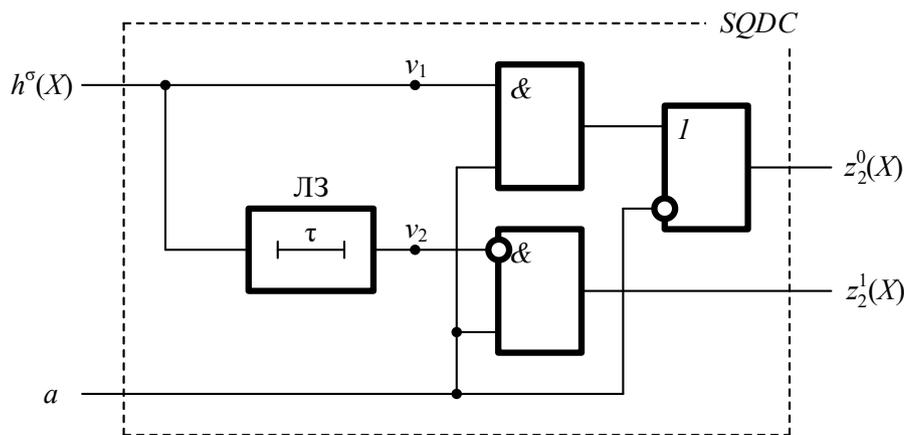


Рис. 7. Тестер самоквазидвойственных сигналов

обустройства схемы сжатия самоквазидвойственных сигналов является то, что при нечетном значении $(m+k)$ все сигналы $h_1(X), h_2(X), \dots, h_{m+k-1}(X), h_{m+k}(X)$ подаются на входы схемы сжатия, а при четном значении $(m+k)$ на один из входов одного из XOR требуется подача сигнала a от генератора G прямоугольных импульсов.

Использование схемы сжатия позволяет сократить до одного количество тестеров самоквазидвойственных сигналов *SQDC* (*self quasidual checker*). Структура простейшего *SQDC* изображена на рис. 7. Он работает аналогично тестеру самодвойственных сигналов [50]. На вход $h^\sigma(X)$ подается последовательность сигналов 0 и 1. Фактически тестер распознает пары подаваемых сигналов. Последовательный сигнал $h^\sigma(X)$ в *SQDC* преобразуется в параллельный

двухфазный сигнал, формируемый в точках v_1 и v_2 . Это преобразование осуществляется с использованием линии задержки (ЛЗ). Длительность τ задержки равна одному такту последовательности a , формируемой на выходе генератора G . Так как сигнал $h^\sigma(X)$ является самоквазидвойственным, то в любой момент времени в отсутствие неисправностей и ошибок в вычислениях $v_1 = v_2$. Поскольку сигнал v_2 инвертируется на первом входе второго элемента *AND* в схеме *SQDC*, в контрольном такте (при $a = 1$) на выходе тестера фиксируется парафазный сигнал $z_2^0(X) \neq z_2^1(X)$. При наличии ошибок в вычислениях, приводящих к искажению одного из сигналов в подаваемой паре $v_1 \neq v_2$, за счет наличия инверсии сигнала v_2 на первом входе второго элемента *AND* в схеме

SQDC в контрольном такте (при $a = 1$) устанавливаются одинаковые сигналы на выходах обоих элементов *AND* и, как следствие, формируется непарафазный сигнал $z_2^0(X) = z_2^1(X)$ на выходах. Здесь следует отметить, что работа генератора и тестера самоквазидвойственных сигналов должна быть синхронизирована [50].

Для получения одного-единственного сигнала контроля $\langle z^0(X) z^1(X) \rangle$ используется элементарный модуль *TRC*. На рис. 8 приведена одна из структур хорошо известных модулей сжатия парафазных сигналов [51]. Могут быть использованы и другие реализации модулей сжатия парафазных сигналов.

Таким образом, при незначительном усложнении контрольного оборудования в СВК за счет использования устройства $(m+k)SQDC1$ и одного дополнительного модуля *TRC* удастся использовать сразу же два диагностических свойства.

Однако только этого недостаточно для работы устройства с СВК. Контроль вычислений по признаку самоквазидвойственности булевых функций требует временной избыточности и функционирования всей структуры в импульсном режиме при инвертировании данных [17].

Для реализации импульсного режима работы структуры, представленной на рис. 4, устанавливается генератор *G*. Он формирует прямоугольные импульсы a со скважностью 2. Они используются для получения из входных переменных x_1, x_2, \dots, x_t последовательностей импульсов и для работы тестера самоквазидвойственных сигналов. Каждый сигнал с каждого входа преобразуется в последовательность импульсов: логический ноль преобразуется в последовательность 0101...01, а логическая единица — в последовательность 1010...10. Это делается за счет использования t двухвходовых элементов *XOR*, на первые входы которых подаются сигналы x_1, x_2, \dots, x_t , а на вторые — последовательность a . Таким образом, наборы значений аргументов начинают генерироваться на входах объекта диагностирования парами — рабочая и контрольная комбинации. Причем, вторая является ортогональной по всем аргументам для первой. Особенности работы схем в таком режиме описаны в [29].

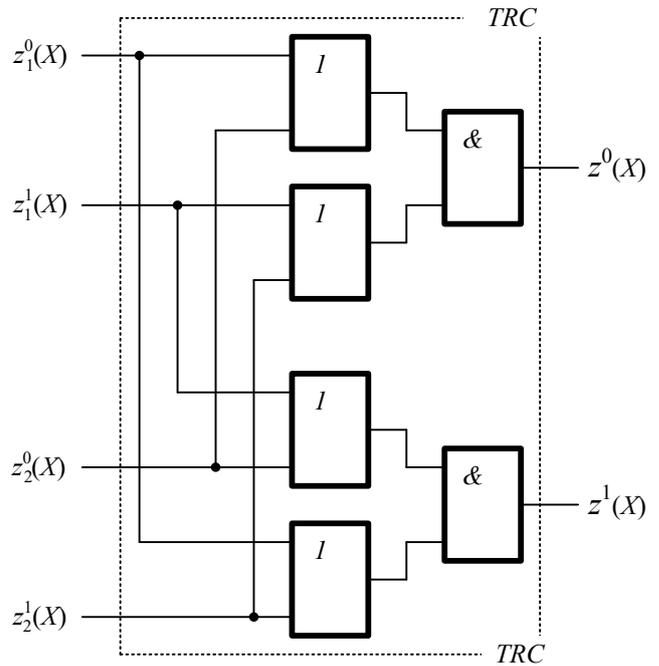


Рис. 8. Модуль сжатия парафазных сигналов

Структура, приведенная на рис. 4, и аналогичная ей ранее исследовались в некотором довольно малом количестве работ (единичные работы автора данной статьи). Например, фактически аналогичная представленной на рис. 4 структура применена в [25, 26] для контроля вычислений по признаку принадлежности кодовых слов равновесному коду «2 из 4» и по признаку самодвойственности каждой функции, описывающей разряды кодовых слов. В [52] данная структура применена при организации СВК с использованием кодов с суммированием весовых коэффициентов пар подряд следующих в информационном векторе разрядов вида $(f_1(X), f_2(X)), (f_2(X), f_3(X)), \dots, (f_{m-1}(X), f_m(X))$ (это так называемый код с суммированием взвешенных переходов [53, 54]). Он обладает тем свойством, что ортогональные по всем разрядам информационные векторы для него имеют одинаковые контрольные векторы, что говорит о самоквазидвойственности проверочных символов данных кодов. Такое свойство позволяет применять данный вид взвешенных кодов с суммированием для контроля вычислений по двум и более диагностическим признакам.

Приведем далее универсальный метод организации СВК по двум диагностическим признакам, позволяющий применить любой разделимый блочный код в этих целях.

Используем, однако, только $WS(m, k, M)$ -коды, поскольку они обладают важными свойствами, обеспечивающими простоту процедур полной проверки контрольного оборудования СВК в процессе эксплуатации готового устройства.

5. Метод организации схемы встроенного контроля по двум диагностическим признакам с использованием взвешенных кодов с суммированием

В качестве основы СВК, синтезируемой по структуре, изображенной на рис. 4, возьмем $WS(m, k, M)$ -коды со значением

$$M \in \left\{ 2^1, 2^2, \dots, 2^{\lceil \log_2(W_{\max} + 1) \rceil - 1}, 2^{\lceil \log_2(W_{\max} + 1) \rceil} \right\},$$

$$W_{\max} = \sum_{i=1}^m w_i,$$

Выбор значения модуля в виде степени двойки обусловлен тем, что при таком модуле для полного множества информационных векторов будет генерироваться и полное множество контрольных векторов с числом проверочных символов k . Для модулей, не являющихся степенями двойки, это свойство недостижимо. Как отмечалось выше, формирование хотя бы единожды каждого контрольного вектора с числом разрядов k требуется для полной проверки тестера делимого кода.

В зависимости от значений M и m можно построить большое количество $WS(m, k, M)$ -кодов с различными массивами весовых коэффициентов $[w_m, w_{m-1}, \dots, w_2, w_1]$, приписываемых разрядам информационных векторов.

Опишем далее метод, позволяющий использовать структуру, приведенную на рис. 4, для контроля вычислений по $WS(m, k, M)$ -кодам. Данный метод базируется на использовании следующего алгоритма.

Правила синтеза СВК по двум диагностическим признакам на основе $WS(m, k, M)$ -кодов:

1. Формируется таблица описания сигналов на линиях СВК, куда заносятся все значения аргументов x_1, x_2, \dots, x_r , значения функций $f_1(X), f_2(X), \dots, f_{m-k-1}(X), f_{m-k}(X)$, которые полностью определены, выделяются графы

для неопределенных на данном этапе значений функций логической коррекции сигналов $g_1(X), g_2(X), \dots, g_{m-k-1}(X), g_{m-k}(X)$ и функций $h_1(X), h_2(X), \dots, h_{m-k-1}(X), h_{m-k}(X)$, описывающих разряды кодовых слов $WS(m, k, M)$ -кодов.

2. С учетом условия

$$2^{t-1} \geq 2^k \Leftrightarrow k \leq t-1 \tag{6}$$

определяются параметры m, k, M для кода с суммированием.

Выполнение этого условия необходимо по причине того, что потребуется сформировать полное множество контрольных векторов с k проверочными символами.

3. Выбирается последовательность весовых коэффициентов $[w_m, w_{m-1}, \dots, w_2, w_1]$, приписываемых разрядам информационных векторов, и фиксируется конкретный $WS(m, k, M)$ -код.

4. Формируется таблица распределения информационных векторов на группы, соответствующие контрольным векторам, для данного $WS(m, k, M)$ -кода. В процессе доопределения значений функций $h_1(X), h_2(X), \dots, h_{m-k-1}(X), h_{m-k}(X)$ необходимо использовать хотя бы один информационный вектор с каждым из имеющихся контрольных векторов.

5. Наборы значений аргументов, представляющие собой двоичные числа от $\langle 00\dots 00 \rangle$ до $\langle 11\dots 11 \rangle$, соответствующие десятичным эквивалентам от 0 до $2^t - 1$, разбиваются на пары $(j, 2^t - 1 - j), j \in \{0, 1, \dots, 2^{t-1} - 1\}$. В иной трактовке рассматривается первая половина таблицы описания с номерами строк от 0 до $2^{t-1} - 1$.

6. На каждом наборе значений аргументов, соответствующих первому десятичному числу из пары $(j, 2^t - 1 - j), j \in \{0, 1, \dots, 2^{t-1} - 1\}$, осуществляется доопределение значений разрядов вектора $\langle h_{m-k}(X) h_{m-k-1}(X) \dots h_2(X) h_1(X) \rangle$ до произвольного кодового слова $WS(m, k, M)$ -кода. В процессе доопределения должны быть использованы хотя бы единожды кодовые слова с различными контрольными векторами.

7. На каждом наборе значений аргументов, соответствующих второму десятичному числу из пары $(j, 2^t - 1 - j), j \in \{0, 1, \dots, 2^{t-1} - 1\}$, осуществляется доопределение значений разрядов вектора $\langle h_{m-k}(X) h_{m-k-1}(X) \dots h_2(X) h_1(X) \rangle$ до

использованного ранее при доопределении значений этого вектора на наборе значений аргументов, соответствующих первому десятичному числу в рассматриваемой паре, кодового слова $WS(m, k, M)$ -кода. Именно в таком случае каждая функция $h_1(X), h_2(X), \dots, h_{m-k-1}(X), h_{m-k}(X)$ окажется самоквазидвойственной.

8. Определяются значения функций логической коррекции сигналов:

$$g_i(X) = f_i(X) \oplus h_i(X), i = \overline{1, m+k}. \quad (7)$$

9. Проверяется формирование полных тестов для элементов XOR в БКС. Как известно [55], полный тест для элемента XOR в канонической его реализации содержит все четыре комбинации $\{00, 01, 10, 11\}$.

10. Если тесты для каждого XOR формируются, то переходят к следующему пункту алгоритма; в противном случае возвращаются на шаг 6 и выполняют иное доопределение векторов $\langle h_{m-k}(X) h_{m-k-1}(X) \dots h_2(X) h_1(X) \rangle$, либо меняют последовательность при построении $WS(m, k, M)$ -кода, либо параметры кода.

11. Функции $g_1(X), g_2(X), \dots, g_{m-k-1}(X), g_{m-k}(X)$ оптимизируются по отдельности или совместно с использованием любого метода [56].

12. Устройство с СВК синтезируется в выбранном элементном базисе.

Ясно, что основной задачей синтеза будет являться получение описания работы блока $G(X)$. Далее процедура синтеза реализуется понятным образом и не требует дополнительного пояснения.

Приведем пример использования разработанного автором настоящей статьи алгоритма при синтезе СВК по двум диагностическим признакам. Требуется получить функции, задающие логику работы блока $G(X)$ в СВК, реализованной с использованием предложенного алгоритма и структуры, приведенной на рис. 4, для устройства, описываемого табл. 1.

Итак, объект диагностирования $F(X)$ имеет $t = 4$ и $n = 8$ выходов.

На первом этапе таблица описания устройства $F(X)$ расширяется. В нее добавляются столбцы $g_1(X), g_2(X), \dots, g_7(X), g_8(X)$ и $h_1(X), h_2(X), \dots, h_7(X), h_8(X)$.

Далее определяются параметры $WS(m, k, M)$ -кода.

Следуя за (6), установим ограничения на значение числа проверочных символов в кодовых словах взвешенного кода с суммированием: $k \leq 3$. В нашем случае требуется использовать $WS(m, k, M)$ -код со значениями модулей $M = 2, 4$ или 8. Хорошо известно, что помехозащищенный взвешенный код с суммированием с модулем $M = 2$ соответствует коду паритета, не обнаруживающему любые ошибки с четными кратностями [44]. Поэтому для организации СВК целесообразно рассматривать два семейства $WS(m, k, M)$ -кодов — с $M = 4$ и $M = 8$. Вообще, здесь и далее код паритета из рассмотрения исключается, хотя и его можно было бы применить при синтезе СВК по предложенному методу с некоторыми ограничениями, связанными с особенностями выделения контролируемых групп выходов объекта диагностирования или же предварительными преобразованиями его структуры в контролепригодную по данному коду [2].

Ограничимся в данном примере рассмотрением использования только кода с наибольшим значением модуля — $WS(5, 3, 8)$ -код. Здесь $M = 8$ и $k = 3$, а число информационных разрядов определено исходя из того, что $n = m + k \Leftrightarrow m = n - k$.

Существует большое количество способов построения $WS(5, 3, 8)$ -кодов — $(M - 1)^m = 7^5 = 16\,807$ [45]. Все эти способы определяются числом вариантов взвешивания разрядов информационного вектора. Зафиксируем одну, абсолютно случайную, из последовательностей весовых коэффициентов $[w_8, w_7, w_6, w_5, w_4] = [5, 6, 1, 2, 1]$ (здесь использованы нижние индексы для весовых коэффициентов, соответствующие нижним индексам функций, выделенных «под информационные разряды»).

Подчеркнем, что в рассматриваемом примере было использовано произвольное распределение весовых коэффициентов при построении $WS(m, k, M)$ -кода. Но на практике конкретные сочетания значений для весовых коэффициентов определяют и характеристики обнаружения ошибок строящимися кодами, и в существенной мере влияют на процедуры обеспечения формирования проверяющих

комбинаций в процессе эксплуатации готового устройства. Например, за счет изменения значений весовых коэффициентов при построении $WS(m, k, M)$ -кода при невозможности обеспечить самопроверяемость БКС можно осуществить подбор весовых коэффициентов, обеспечивающих решение этой задачи.

Для заполнения табл. 1 потребуется таблица распределения информационных векторов между контрольными векторами рассматриваемого $WS(5, 3, 8)$ -кода (табл. 2). Каждому контрольному вектору данного кода соответствует либо три, либо пять информационных векторов. Следует отметить, что данный $WS(5, 3, 8)$ -код не является кодом с обнаружением максимального количества ошибок в информационных векторах как раз из-за неравномерности распределения информационных векторов между контрольными векторами [44, 45]. Это не повлияет на процедуру синтеза СВК, но должно учитываться при покрытии кодом ошибок на выходах объекта диагностирования.

Далее, при доопределении значений разрядов вектора $\langle h_{m-k}(X) h_{m-k-1}(X) \dots h_2(X) h_1(X) \rangle$ на каждом наборе значений аргументов используем по одному кодовому слову с одним и тем же контрольным вектором. Возьмем, например, первые информационные векторы из табл. 2: $\langle 00000\ 000 \rangle$, $\langle 00001\ 001 \rangle$, $\langle 00010\ 010 \rangle$, $\langle 00011\ 011 \rangle$, $\langle 00111\ 100 \rangle$, $\langle 10000\ 101 \rangle$, $\langle 01000\ 110 \rangle$ и $\langle 01001\ 111 \rangle$. Заполним последовательно первые восемь строк табл. 1 каждым выбранным кодовым словом. Аналогичное заполнение выполним симметрично относительно середины табл. 2.

Далее с использованием (7) получим значения функций логической коррекции сигналов. Они также уже занесены в табл. 1.

Проверка формирования полных тестов для элементов преобразования в БКС (построчная проверка столбцов $f_i(X)$ и $g_i(X)$) показала, что для всех элементов XOR, кроме XOR_8 формируются полные тесты. Для XOR_8 не формируется тестовая комбинация $\langle 10 \rangle$. Поменяем используемое кодовое слово для доопределения значений вектора $\langle h_8(X) h_7(X) \dots h_2(X) h_1(X) \rangle$. Для этого выделим в графе $f_8(X)$ те строки, которые соответствуют необходимым тестовым комбинациям из множества $\{00, 01, 10\}$. Это строки с

номера 0, 1, 5. Далее среди оставшихся строк найдем те, в которых имеется единица, так как не хватает именно комбинации $\langle 10 \rangle$. Выберем такое кодовое слово для доопределения значений вектора $\langle h_8(X) h_7(X) \dots h_2(X) h_1(X) \rangle$, в котором для строки, соответствующей выбранному значению единицы в столбце $f_8(X)$ будет зафиксировано противоположное значение. Возьмем строку номер 12. В ней кодовое слово $\langle h_8(X) h_7(X) \dots h_2(X) h_1(X) \rangle$ доопределено до слова $\langle 00011\ 011 \rangle$, принадлежащего $WS(5, 3, 8)$ -коду. Обратимся к табл. 2. Выберем в ней кодовое слово, в котором $f_8(X)=1$ – кодовое слово $\langle 11000\ 011 \rangle$. Заполним строки с номерами 12 и 3 кодовым словом $\langle 11000\ 011 \rangle$.

Обновленный вариант доопределения значений векторов $\langle h_8(X) h_7(X) \dots h_2(X) h_1(X) \rangle$ и значений функций логической коррекции сигналов представлен в табл. 3. Строки с измененными значениями сигналов выделены.

Простая проверка показывает, что скорректированная таблица описания работы устройства с СВК отвечает требованиям полной проверки элементов преобразования в БКС.

Таким образом, функции, реализуемые на выходах блока $G(X)$, заданы на каждом наборе значений аргументов в табл. 3. Из таблицы легко получить логические выражения, описывающие данные функции, используя любой из известных методов [56].

Чем больше разница $(t - k)$, тем проще обеспечивать формирование полных тестов для элементов преобразования. Однако здесь следует обратить внимание на то, что хотя бы на двух наборах значений аргументов должны формироваться значения 0 (1) для функций, описывающих выходы объекта диагностирования. В противном случае не удастся ни при каких способах обеспечить полную самопроверяемость БКС [57]. Это справедливо и для традиционных методов синтеза СВК.

Трудоёмкость разработанного алгоритма определяется числом t входов объекта диагностирования. Она может быть асимптотически оценена величиной $2^{O(t)}$, т. е. задача доопределения значений $\langle h_{m-k}(X) h_{m-k-1}(X) \dots h_2(X) h_1(X) \rangle$ на каждом наборе значений аргументов решается за экспоненциальное время с линейной экспонентой. Наиболее эффективно задача решается

при числе выходов $t \leq 30$, и чем это число меньше, тем, соответственно, быстрее будет находиться каждое решение задачи получения функций, описывающих выходы блока $G(X)$ в СВК с учетом обозначенных выше ограничений.

6. О числе способов организации схем встроенного контроля

При синтезе СВК возникает задача выбора наилучшего способа ее реализации по заранее установленным показателям эффективности, например, по минимальным показателям структурной избыточности при обеспечении полной самопроверяемости структуры. Напомним, что при использовании традиционных подходов, основанных на дополнении информационных векторов контрольными векторами в СВК без какого-либо преобразования сигналов [2, 44, 45], имеется только один способ ее реализации для выбранного равномерного блочного кода с выбранной структурой тестера и способом реализации блока контрольной логики. При невозможности обеспечения полной самопроверяемости СВК или же при неудовлетворительных показателях ее структурной избыточности проектировщик высоконадежных и безопасных дискретных устройств вынужден прибегать к перебору иных кодов или стандартных методов (например, дублирования или контроля групп независимых выходов объекта диагностирования по паритету), либо же применять высоконадежную, использующую внутренние резервы компонентов, элементную базу. Покажем, что использование представленного в настоящей статье метода на практике дает серьезную вариативность выбора способа реализации СВК.

Число входов объекта диагностирования равно $t \in \mathbb{N}$. Число выходов определяется величиной $(m+k) \in \mathbb{N}$. Для контроля вычислений используется $WS(m, k, M)$ -код. Число проверочных символов данного кода определяется величиной $k = \lceil \log_2 M \rceil$, $M \in \mathbb{N}, M \geq 2$. При этом далее рассматриваются только те модули, которые являются степенями двойки:

$$M \in \left\{ 2^1, 2^2, \dots, 2^{\lceil \log_2 W_{\max} \rceil - 1}, 2^{\lceil \log_2 W_{\max} \rceil} \right\}, W_{\max} = 1 + \sum_{i=1}^m w_i.$$

Определим нижнюю и верхнюю оценки

количества способов организации СВК с применением $WS(m, k, M)$ -кода для случая равномерного распределения информационных векторов между всеми контрольными (для неравномерного распределения количество способов синтеза СВК будет еще выше).

Так как при построении СВК требуется доопределение значений функций $h_1(X), h_2(X), \dots, h_{m+k-1}(X), h_{m+k}(X)$ на каждом наборе значений аргументов и на наборах с десятичными эквивалентами $(j, 2^t - 1 - j), j \in \{0, 1, \dots, 2^{t-1} - 1\}$, используются одинаковые кодовые слова $WS(m, k, M)$ -кода, количество способов доопределения определяется количеством пар наборов значений аргументов. Оно равно 2^{t-1} . На каждой такой паре существует возможность доопределения вектора $\langle h_{m+k}(X) h_{m+k-1}(X) \dots h_2(X) h_1(X) \rangle$ до одного из 2^m кодовых слов $WS(m, k, M)$ -кода. Отсюда получаем, что можно использовать

$$N_1 = \left(2^m \right)^{2^{t-1}} \quad (8)$$

вариантов доопределения.

Учитывая то, что при построении $WS(m, k, M)$ -кода каждый разряд информационного вектора может быть взвешен натуральным числом из множества $w_i \in \{1, 2, \dots, M-1\}$, отмечаем, что существует $(M-1)^m$ способ построения $WS(m, k, M)$ -кода [45]. Отсюда следует верхняя оценка количества способов организации СВК с контролем вычислений по двум диагностическим признакам по предложенному в настоящей статье методу:

$$\sup N = (M-1)^m \left(2^m \right)^{2^{t-1}}. \quad (9)$$

Выражение (9) — действительно именно верхняя оценка. Это становится ясным потому, что нельзя, например, доопределить все векторы $\langle h_{m+k}(X) h_{m+k-1}(X) \dots h_2(X) h_1(X) \rangle$ до одного и того же кодового слова $WS(m, k, M)$ -кода, а формула (9) учитывает и эти варианты.

Если доопределять на каждой паре наборов значений аргументов векторы $\langle h_{m+k}(X) h_{m+k-1}(X) \dots h_2(X) h_1(X) \rangle$ до различных кодовых слов $WS(m, k, M)$ -кода, то можно получить выражение для нижней оценки. Здесь возможны три случая: 1) $t-1 = m$; 2) $t-1 < m$; 3) $t-1 > m$.

Первый случай $t-1 = m$ характеризует способ доопределения на каждом наборе значений аргументов 2^{t-1} до одного из кодовых слов, соответствующих 2^m неповторяющимся информационным векторам. Количество способов доопределения именно таким образом равно:

$$N_2 = 2^m (2^m - 1) \dots (2^m - (2^{t-1} - 1)) = (2^m)!. \quad (10)$$

Второй случай $t-1 < m$ указывает на то, что информационных векторов больше, чем наборов значений аргументов. Значит, количество способов доопределения в этом случае вычисляется по формуле:

$$N_2 = 2^m (2^m - 1) \dots (2^m - (2^{t-1} - 1)) = (2^m)^{\frac{2^{t-1}+1}{2}}. \quad (11)$$

В конечном выражении (11) присутствует убывающая факториальная степень

$$x^p = \frac{x!}{(x-p)!} \quad [58].$$

Наконец, третий случай $t-1 > m$ связан с тем, что наборов значений аргументов больше, чем различных кодовых слов $WS(m, k, M)$ -кода. Тогда для 2^m наборов значений аргументов используем неповторяющиеся кодовые слова $WS(m, k, M)$ -кода, а для оставшихся $(2^{t-1} - 2^m)$ — любые. Итого, имеем следующее выражение для оценки числа способов доопределения:

$$N_2 = (2^m)! (2^m)^{2^{t-1}-2^m}. \quad (12)$$

Учитывая количество способов построения $WS(m, k, M)$ -кодов, получаем такие нижние оценки для всех трех случаев:

$$\inf N = \begin{cases} (M-1)^m (2^m)!, & t-1 = m, \\ (M-1)^m (2^m)^{\frac{2^{t-1}+1}{2}}, & t-1 < m, \\ (M-1)^m (2^m)! (2^m)^{2^{t-1}-2^m}, & t-1 > m. \end{cases} \quad (13)$$

К примеру, для случая $M = 4$, $m = 4$ и $t = 4$ выражение (9) дает следующую оценку количества способов организации СВК:

$$\begin{aligned} \sup N &= (4-1)^4 (2^4)^{2^{4-1}} = 3^4 \cdot 16^8 = \\ &= 347\,892\,350\,976. \end{aligned}$$

Из выражения (13) получаем нижнюю оценку при тех же исходных данных:

$$\begin{aligned} \inf N &= (4-1)^4 (2^4)^{\frac{2^{4-1}+1}{2}} = 3^4 \cdot (16)^8 = \\ &= 81 \cdot 16 \cdot 15 \cdot \dots \cdot 9 = 42\,032\,390\,400. \end{aligned}$$

Разница между полученными числами составляет 305 859 960 576 (верхняя оценка дает в 8,277 раза большее число, чем нижняя).

Здесь полезным является получение выражения для оценки количества способов организации СВК по различным $WS(m, k, M)$ -кодам с произвольными значениями k для одного и того же дискретного устройства с числом выходов $n=m+k$. Из (6) и того факта, что целесообразно использовать взвешенные коды с числом проверочных символов $k \geq 2$, следует: $k \in \{2, 3, \dots, t-1\}$. Так как M является степенью двойки, то уместно записать $M = 2^k$. Кроме того, заметим, что $m = n - k$. Используя приведенные здесь факты, получим верхнюю и нижнюю оценки числа способов построения СВК с использованием $WS(m, k, M)$ -кодов по описанному в статье методу:

$$\sup N^* = \sum_{k=2}^{t-1} (2^k - 1)^{n-k} (2^{n-k})^{2^{t-1}}, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \inf N^* &= \\ &= \begin{cases} \sum_{k=2}^{t-1} (2^k - 1)^{n-k} (2^{n-k})!, & t-1 = n-k, \\ \sum_{k=2}^{t-1} (2^k - 1)^{n-k} (2^{n-k})^{\frac{2^{t-1}+1}{2}}, & t-1 < n-k, \\ \sum_{k=2}^{t-1} (2^k - 1)^{n-k} (2^{n-k})! (2^{n-k})^{2^{t-1}-2^{n-k}}, & t-1 > n-k. \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

Третье выражение в формуле (15) при $t-1 = n-k$ вырождается в первое. Если не использовать выражение для записи факториала, то все три формулы в (15) можно объединить в одну:

$$\begin{aligned} \inf N^* &= \sum_{k=2}^{t-1} (2^k - 1)^{n-k} 2^{n-k} (2^{n-k} - 1) \dots (2^{n-k} - 2^{t-1} + 1) \Psi, \\ \Psi &= \begin{cases} (2^{n-k})^{2^{t-1}-2^{n-k}}, & t-1 \geq n-k, \\ 1, & t-1 < n-k. \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

К примеру, для случая $n = 7$ и $t = 4$ формулы (14) и (16) дают следующие оценки:

$$\begin{aligned} \sup N^* &= \sum_{k=2}^{4-1} (2^k - 1)^{7-k} (2^{7-k})^{2^{4-1}} = \\ &= (2^2 - 1)^{7-2} (2^{7-2})^{2^3} + (2^3 - 1)^{7-3} (2^{7-3})^{2^3} = \\ &= 3^5 \cdot 32^8 + 7^4 \cdot 16^8 = 277\,493\,542\,027\,264, \\ \inf N^* &= (2^2 - 1)^{7-2} (2^{7-2})^{2^{4-1}+1} + (2^3 - 1)^{7-3} (2^{7-3})! = \\ &= 3^5 \cdot 32^9 + 7^4 \cdot 16! = 113\,367\,995\,485\,696. \end{aligned}$$

Разница между полученными числами составляет 164 125 546 541 568 (верхняя оценка числа способов построения СВК дает в 2,448 раза большее число, чем нижняя). Данная разница обусловлена превышающим в 2,593 раза число способов доопределения при $k = 2$, получаемых по формуле (14), в сравнении с числом, получаемым по формуле (15).

Число способов организации СВК по представленному в настоящей статье методу колоссально. При больших значениях t , m и M задача выбора наилучшего из всех вариантов становится трансвычислительной (причем достаточно быстро).

Показанные особенности говорят о том, что на практике, конечно, не следует перебирать все варианты синтеза СВК, а целесообразно ограничиться определенным количеством псевдослучайных вариантов, среди которых выбрать тот, который даст возможность формирования полных тестов для компонентов СВК и приемлемые показатели эффективности ее технической реализации.

Заключение

Предложенный в настоящей статье метод организации СВК, основанный на ЛКС и применении $WS(m, k, M)$ -кодов, позволяет синтезировать самопроверяемые дискретные устройства с улучшенными показателями контролепригодности в части наблюдаемости неисправностей на контрольных выходах по сравнению с традиционными методами. При этом следует отметить типизацию компонентов СВК и выделение стандартных модулей контроля вычислений по двум диагностическим

признакам, а также БКС. Основным вопросом, возникающим в ходе процедуры синтеза, является получение корректного описания логики функционирования блока $G(X)$. Разработанный в ходе исследования алгоритм синтеза СВК позволяет это выполнить колоссальным количеством способов и дать разработчику высоконадежных дискретных устройств возможность выбора наилучшего решения по различным показателям эффективности.

Можно рассматривать применение структуры, приведенной на рис. 4, как при контроле всех выходов на основе одного $WS(m, k, M)$ -кода, так и при выделении некоторого подмножества групп выходов с контролем вычислений на них отдельными подсхемами и с объединением их контрольных выходов на входах самопроверяемого компаратора (по аналогии с описанным, например, в [57]). Такой способ в ряде приложений может оказаться эффективным. Здесь также следует учесть и тот факт, что с ростом числа n у $WS(m, k, M)$ -кодов расчет и число необнаруживаемых ими ошибок в кодовых словах. Целесообразно учитывать и особенности структуры объекта диагностирования при выборе способа выделения групп выходов, однако эта задача куда более сложна, чем может показаться, и требует отдельного исследования и отдельных публикаций по данному вопросу. Более того, при выделении групп выходов для контроля вычислений может оказаться более просто решаемой задача обеспечения самопроверяемости блоков в СВК.

При синтезе СВК для дискретных устройств по предложенному методу также могут эффективно использоваться схемы предварительного сжатия сигналов от объектов диагностирования, не приводящие к потере диагностической информации и к компенсации ошибок на выходах. Например, если структура объекта диагностирования такова, что она не допускает одновременных искажений значений на всех выходах, то целесообразно использовать схему сжатия n сигналов в $n - 1$ сигнал без потери данных по методу из [59]. Это позволит упростить СВК. Могут быть использованы и иные схемы предварительного сжатия с учетом специфики структуры самого объекта диагностирования.

Использование структуры организации СВК по двум диагностическим признакам, предложенной в настоящей статье, эффективно при организации контроля вычислений в случае рассмотрения модели одиночных константных неисправностей (*stuck-at fault*), модели мостиковой неисправности (*bridging fault*) или модели транзистора (устойчивых обрывов транзисторов SOP (*stuck-open*) и устойчивых замыканий транзисторов SON (*stuck-on*)). Структура организации СВК может быть использована и на этапе проектирования дискретных устройств для выявления неисправностей вида «временная задержка» (*delay fault*), поскольку будет фиксировать искажения при формировании значений кодовых слов на параллельных выходах объекта диагностирования. Однако в каждом конкретном случае потребуется моделирование и анализ работы объекта диагностирования с СВК в условиях действия неисправностей из выбранной модели.

В качестве достоинства разработанного метода синтеза СВК можно выделить два ключевых аспекта. Первый — универсальность метода, заключающаяся в том, что абсолютно не важно, какой именно равномерный блочный код будет использован при реализации алгоритма доопределения значений разрядов векторов $\langle h_{m-k}(X) h_{m-k-1}(X) \dots h_2(X) h_1(X) \rangle$. При этом, однако, весьма интересным классом таких кодов, как показано в настоящей статье, является класс $WS(m, k, M)$ -кодов. Второй плюс использования разработанного метода состоит в том, что он всегда дает возможность построения самопроверяемой структуры СВК, если это в принципе возможно с учетом особенностей объекта диагностирования (существуют примеры устройств, для которых не всегда это удается обеспечить). Недостатки же метода заключаются в необходимости анализа способов доопределения векторов $\langle h_{m-k}(X) h_{m-k-1}(X) \dots h_2(X) h_1(X) \rangle$ на каждом наборе значений аргументов, что приводит к большому количеству операций перебора информационных векторов. Однако алгоритм доопределения достаточно прост и может использоваться в режиме псевдослучайной генерации кодовых слов $WS(m, k, M)$ -кодов на

первой половине таблицы описания работы объекта диагностирования с СВК. Сложности могут заключаться только в последующей после завершения процедуры доопределения значений разрядов векторов $\langle h_{m-k}(X) h_{m-k-1}(X) \dots h_2(X) h_1(X) \rangle$ проверке тестируемости элементов XOR в БКС. Отдельной сложностью может оказаться использование метода с устройствами, работа которых задается на неполном множестве наборов значений аргументов.

Дальнейшие исследования могут быть сосредоточены в нескольких направлениях. Во-первых, интересен поиск такого алгоритма доопределения значений разрядов вектора $\langle h_{m-k}(X) h_{m-k-1}(X) \dots h_2(X) h_1(X) \rangle$, для которого автоматически будут учитываться и условия тестируемости элементов XOR в БКС. Во-вторых, не существует к настоящему времени и алгоритма взвешивания разрядов в информационных векторах при построении $WS(m, k, M)$ -кодов на этапе их применения к конкретным объектам диагностирования, учитывающего возможности тестируемости элементов XOR в БКС. В-третьих, пока что не установлены особенности использования разработанного метода при контроле вычислений по двум и более группам выходов с учетом свойств структур объектов диагностирования. В-четвертых, интересным направлением является анализ использования метода на различных тестовых примерах комбинационной и последовательностной логики, а также практическая реализация для устройств, синтезированных на современной программируемой элементной базе, и многие другие задачи.

Метод синтеза СВК по двум диагностическим признакам, предложенный в настоящей статье, — это универсальный метод, позволяющий синтезировать дискретные устройства с обнаружением неисправностей с более высокой наблюдаемостью ошибок на контрольных выходах, чем при использовании традиционных подходов, что крайне актуально для использования в системах ответственного назначения, в особенности, в системах с редко меняющимися входными данными [60–62]. ▲

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пархоменко П. П. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомоян. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 320 с.
2. Согомоян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомоян, Е. В. Слабаков. — М.: Радио и связь, 1989. — 208 с.
3. Микони С. В. Общие диагностические базы знаний вычислительных систем / С. В. Микони. — СПб.: Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации, 1992. — 234 с.
4. Abramovici M. Digital System Testing and Testable Design / M. Abramovici, M. A. Breuer, A. D. Friedman. — New Jersey: IEEE Press, 1998. — 652 p.
5. Ланцов В. Н. Современные подходы к проектированию и тестированию интегральных микросхем / В. Н. Ланцов, С. Г. Мосин. — Владимир: Издательство Владимирского государственного университета, 2010. — 285 с.
6. Dubrova E. Fault-Tolerant Design / E. Dubrova. — N. Y.: Springer Science + Business Media, 2013. — XV+185 p. — DOI: 10.1007/978-1-4614-2113-9.
7. Дрозд А. В. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем / А. В. Дрозд, В. С. Харченко, С. Г. Антошук [и др.]; под ред. А. В. Дрозда, В. С. Харченко. — Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2012. — 614 с.
8. Ubar R. Structural Decision Diagrams in Digital Test: Theory and Applications / R. Ubar, J. Raik, M. Jenihhin, A. Jutman. — Springer Nature Switzerland AG, 2024. — XIII+595 p. — DOI: 10.1007/978-3-031-44734-1.
9. 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, S. Nandi // Proceedings of 2023 IEEE Guwahati Subsection Conference (GCON). — Guwahati. — 2023. — DOI: 10.1109/GCON58516.2023.10183449.
10. Chioktour V. Adaptive BIST for Concurrent On-Line Testing on Combinational Circuits / V. Chioktour, A. Kakarountas // Electronics. — 2022. — Vol. 19. — Issue 11. — Pp. 1–20. — DOI: 10.3390/electronics11193193.
11. Göessel M. New Methods of Concurrent Checking: Edition 1 / M. Göessel, V. Ocheretny, E. Sogomonyan, D. Marienfeld. — Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., 2008. — 184 p.
12. Сапожников Вл. В. Организация функционального контроля комбинационных схем методом логического дополнения / Вл. В. Сапожников, В. В. Сапожников, А. В. Дмитриев, А. В. Морозов, М. Гессель // Электронное моделирование. — 2002. — Т. 24. — № 6. — С. 52–66.
13. Гессель М. Логическое дополнение — новый метод контроля комбинационных схем / М. Гессель, А. В. Морозов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. — 2003. — № 1. — С. 167–176.
14. Яблонский С. В. Функции алгебры логики и классы Поста / С. В. Яблонский, Г. П. Гаврилов, В. Б. Кудрявцев. — М.: Наука, 1966. — 120 с.
15. Шалыто А. А. Логическое управление. Методы аппаратной и программной реализации / А. А. Шалыто. — СПб.: Наука, 2000. — 780 с.
16. Reynolds D. A. Fault Detection Capabilities of Alternating Logic / D. A. Reynolds, G. Meize // IEEE Transactions on Computers. — 1978. — Vol. C-27. — Issue 12. — Pp. 1093–1098. — DOI: 10.1109/TC.1978.1675011.
17. Аксёнова Г. П. Восстановление в дублированных устройствах методом инвертирования данных / Г. П. Аксёнова // Автоматика и телемеханика. — 1987. — № 10. — С. 144–153.
18. Saposhnikov V. V. Self-Dual Parity Checking — a New Method for on Line Testing / V. V. Saposhnikov, A. Dmitriev, M. Goessel, V. V. Saposhnikov // Proceedings of 14th IEEE VLSI Test Symposium. — USA, Princeton, 1996. — Pp. 162–168.
19. Гессель М. Само тестируемая структура для функционального обнаружения отказов в комбинационных схемах / М. Гессель, А. В. Дмитриев, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. — 1999. — № 11. — С. 162–174.
20. Гессель М. Обнаружение неисправностей в комбинационных схемах с помощью самодвойственного контроля / М. Гессель, А. В. Дмитриев, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. — 2000. — № 7. — С. 140–149.
21. Сапожников В. В. Самодвойственные дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, М. Гессель. — СПб.: Энергоатомиздат (Санкт-Петербургское отделение), 2001. — 331 с.
22. Сапожников В. В. О синтезе самодвойственных логических схем с памятью / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Р. Ш. Валиев // Электронное моделирование. — 2004. — Т. 26. — № 2. — С. 39–57.
23. Сапожников В. В. Синтез самодвойственных дискретных систем / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Р. Ш. Валиев. — СПб.: Элмор, 2006. — 220 с.
24. Гессель М. Построение самопроверяемых комбинационных схем на основе свойств самодвойственных функ-

- ций / М. Гессель, А. А. Морозов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. — 2000. — № 2. — С. 151–163.
25. Efanov D. Self-Dual Complement Method up to Constant-Weight Codes for Arrangement of Combinational Logical Circuits Concurrent Error-Detection Systems / D. Efanov, V. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov Vl., G. Osadchy, D. Pivovarov // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019). — Batumi, Georgia. — September 13–16, 2019. — Pp. 136–143. — DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884398.
26. Ефанов Д. В. Обнаружение неисправностей в комбинационных схемах на основе самодвойственного дополнения до равновесных кодов / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Пивоваров // Труды Института системного программирования РАН. — 2019. — Т. 31. — № 1. — С. 115–132. — DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(1)-8.
27. Ефанов Д. В. Исследование свойств самодвойственных комбинационных устройств с контролем вычислений на основе кодов Хэмминга / Д. В. Ефанов, Т. С. Погодина // Информатика и автоматизация. — 2023. — Т. 22. — № 2. — С. 349–392. — DOI: 10.15622/ia.22.2.5.
28. 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. — DOI: 10.17223/19988605/63/14.
29. 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.
30. Яблонский С. В. Введение в дискретную математику: учеб. пособие / С. В. Яблонский; под ред. В. А. Садовничева. — 4-е изд., стер. — М.: Высшая школа, 2003. — 384 с.
31. 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. — DOI: 10.17223/19988605/65/13.
32. Сапожников В. В. Методы синтеза надежных автоматов / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. — Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1980. — 96 с.
33. Сапожников В. В. Дискретные автоматы с обнаружением отказов / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. — Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1984. — 112 с.
34. Berger J. M. A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels / J. M. Berger // Information and Control. — 1961. — Vol. 4. — Issue 1. — Pp. 68–73. — DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
35. The On-Line Encyclopedia of Integer Sequences: Электронный ресурс. — Режим доступа: URL: <https://oeis.org>. — (дата обращения — 23.01.2025).
36. Berger J. M. A Note on Burst Detection Sum Codes / J. M. Berger // Information and Control. — 1961. — Vol. 4. — Issue 2–3. — Pp. 297–299. — DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80024-7.
37. Das D. Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multilevel Circuits / D. Das, N. A. Touba // Proceedings of 17th IEEE Test Symposium. — California, USA, 1999. — Pp. 370–376. — DOI: 10.1109/VTEST.1999.766691.
38. Дмитриев В. В. О двух способах взвешивания и их влиянии на свойства кодов с суммированием взвешенных переходов в системах функционального контроля логических схем / В. В. Дмитриев // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2015. — № 3. — С. 119–129.
39. Сапожников В. В. Взвешенные коды с суммированием для организации контроля логических устройств / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Электронное моделирование. — 2014. — Т. 36. — № 1. — С. 59–80.
40. Efanov D. V. Using Codes with Summation of Weighted Bits to Organize Checking of Combinational Logical Devices / D. V. Efanov, V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov // Automatic Control and Computer Sciences. — 2019. — Vol. 53. — Issue 1. — Pp. 1–11. — DOI: 10.3103/S0146411619010061.
41. Ефанов Д. В. Модульные коды с суммированием с последовательностью весовых коэффициентов, образующей натуральный ряд чисел за исключением степеней двойки / Д. В. Ефанов, Е. И. Елина // Автоматика на транспорте. — 2024. — Т. 10. — № 3. — С. 296–330. — DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-03-296-330.
42. Das D. Cost Concurrent Error Detection Based on Modulo Weight-Based Codes / D. Das, N. A. Touba, M. Seuring, M. Gossel // Proceedings of the IEEE 6th International On-Line Testing Workshop (IOLTW). — Spain, Palma de Mallorca. — July 3–5, 2000. — Pp. 171–176. — doi: 10.1109/OLT.2000.856633.

43. Сапожников В. В. Самопроверяемые дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. — СПб: Энергоатомиздат, 1992. — 224 с.
44. Сапожников В. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 1: Классические коды Бергера и их модификации / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. — М.: Наука, 2020. — 383 с.
45. Сапожников В. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 2: Взвешенные коды с суммированием / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. — М.: Наука, 2021. — 455 с.
46. Карибский В. В. Основы технической диагностики: в 2-х кн. Кн. I. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза / В. В. Карибский, А. А. Пархоменко, Е. С. Согомонян, В. Ф. Халчев; под ред. П. П. Пархоменко. — М.: Энергия, 1976. — 464 с.
47. Сапожников В. В. Основы технической диагностики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. — М.: Маршрут, 2004. — 318 с.
48. Lala P. K. Self-Checking and Fault-Tolerant Digital Design / P. K. Lala. — San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001. — 216 p.
49. Dmitriev A. New Self-Dual Circuits for Error Detection and Testing / A. Dmitriev, V. Saposhnikov, V. Saposhnikov, M. Goessel // VLSI Design. — 2000. — Vol. 11. — Issue 1. — Pp. 1-21. — DOI: 10.1155/2000/84720.
50. 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. — DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-1-5-19.
51. Carter W. C. Self-Checking Error Checker for Two-Rail Coded Data / W. C. Carter, K. A. Duke, P. R. Schneider // United States Patent Office. filed July 25, 1968. Ser. 747533, patented Jan. 26. — N. Y., 1971. — 10 p.
52. Efanov D. V. Method for Testing Combinational Circuits by Multiple Diagnostic Features Using Weight-Based Sum Codes Properties / D. V. Efanov, D. V. Pivovarov, Vissio N. Cortegoso, A. O. Kuptsov, D. E. Egorov // Automation. — 2025. — Vol. 6. — Issue 1. — Pp. 1–20. — DOI: 10.3390/automation6010006.
53. Saposhnikov V. New Code for Fault Detection in Logic Circuits / V. Saposhnikov, V. Saposhnikov // Proceedings of 4th International Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems. — St. Petersburg, Russia. — June 21–24. — 1999. — Pp. 693–696.
54. Мехов В. Б. Контроль комбинационных схем на основе модифицированных кодов с суммированием / В. Б. Мехов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 8. — С. 153–165.
55. Аксёнова Г. П. Необходимые и достаточные условия построения полностью проверяемых схем свертки по модулю 2 / Г. П. Аксёнова // Автоматика и телемеханика. — 1979. — № 9. — С. 126–135.
56. Закревский А. Д. Логические основы проектирования дискретных устройств / А. Д. Закревский, Ю. В. Поттосин, Л. Д. Черемисинова. — М.: Физматлит, 2007. — 592 с.
57. Ефанов Д. В. Синтез самопроверяемых цифровых устройств на основе логической коррекции сигналов с применением взвешенных кодов Боуза–Лина / Д. В. Ефанов, Е. И. Елина // Проблемы управления. — 2024. — № 4. — С. 26–43. — DOI: <http://doi.org/10.25728/ru.2024.4.3>.
58. Грэхем Р. Л. Конкретная математика. Математические основы информатики: пер. с англ. / Р. Л. Грэхем, Д. Э. Кнут, О. Паташник. — 2-е изд. — М.: Вильямс, 2017. — 784 с.
59. Сапожников В. В. Новые структуры систем функционального контроля логических схем / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, В. В. Дмитриев // Автоматика и телемеханика. — 2017. — № 2. — С. 127–143.
60. Drozd A. Checkability of the Digital Components in Safety-Critical Systems: Problems and Solutions / A. Drozd, V. Kharchenko, S. Antoshchuk, J. Sulima, M. Drozd // Proceedings of 9th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2011). — Sevastopol, Ukraine. — 2011. — Pp. 411–416. DOI: 10.1109/EWDTS.2011.6116606.
61. Drozd O. Hidden Fault Analysis of FPGA Projects for Critical Applications / O. Drozd, I. Perebeinos, O. Martynyuk, K. Zashcholkin, O. Ivanova, M. Drozd // Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). — 25–29 February, 2020. — Lviv-Slavsko, Ukraine. — P. 142. — DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235591.
62. Сапожников Вл. В. Синтез систем управления движением поездов на железнодорожных станциях с исключением опасных отказов / Вл. В. Сапожников. — М.: Наука, 2021. — 229 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 1, pp. 75–102
DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-75-102

Self-Checking Finite State Machines Based on Weight-Based Sum Codes and Properties of Self-Quasidual Boolean Functions

Information about authors

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

¹Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Higher School of Transport, Institute of Machinery, Materials and Transport, Saint Petersburg

²Russian University of Transport (MIIT), Department of Automation, Remote Control and Communication on Railway Transport, Moscow

³Tashkent State Transport University, Department of Automation and Remote Control, Tashkent

Abstract: The computation control specific features at the outputs of finite state machines blocks using weight-based sum codes and the properties of self-dual and 'close' to them self-quasidual Boolean functions are described. The calculation control is proposed to be structured using several diagnostic parameters based on the principle of Boolean correction of signals from the tested object. An algorithm for additional definition of Boolean correction functions used at the stage of designing a self-check discrete device has been developed. The algorithm is based on two diagnostic properties that is: 1) Each Boolean vector at the output of the signal correction block in the embedded control circuit must belong to the set of code words of the weight-based sum code; 2) Each function describing the order of Boolean vectors formed at the outputs of the signal correction block must be self-quasidual. The proposed algorithm allows synthesizing a vast number of embedded control circuits with different performance parameters. Their practical use makes it possible to choose the best variation of the embedded control circuit according to one or another criterion. Different versions of building embedded control circuits have been estimated for a given number of inputs and outputs of the tested object. The proposed method is universal and can be used in combination with random uniform block codes. This, however, will require taking into account the code properties to ensure the generation of inspection tests for the embedded control circuit elements during the self-checking device operation. The results obtained can be used in synthesizing fault detection discrete devices.

Keywords: self-checking discrete devices; self-checking finite state machine; embedded control circuit; weighted sum code; self-dual Boolean function; self-quasidual Boolean function; logical signal correction to self-quasidual ones; calculation control based on two diagnostic properties.

References

1. Parkhomenko P. P., Sogomonian E. S. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki (optimizatsiya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnyye sredstva)* [Fundamentals of technical diagnostics (optimization of diagnostic algorithms, hardware)]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1981, 320 p. (In Russian)
2. Sogomonian E. S., Slabakov E. V. *Samoproveryayemye ustroystva i otkazoustoychivyye sistemy* [Self-checking devices and fault-tolerant systems]. Moscow: Radio and communication Publ., 1989, 208 p. (In Russian)
3. Mikoni S. V. *Obshchiye diagnosticheskiye bazy znaniy vychislitel'nykh sistem* [General diagnostic knowledge bases of computing systems]. St. Petersburg: St. Petersburg Institute of Informatics and Automation, 1992, 234 p. (In Russian)
4. Abramovici M., Breuer M. A., Friedman A. D. *Digital System Testing and Testable Design*. New Jersey: IEEE Press, 1998, 652 p.

5. Lantsov V. N., Mosin S. G. *Sovremennyye podkhody k proyektirovaniyu i testirovaniyu integral'nykh mikroskhem* [Modern approaches to design and testing of integrated circuits]. Vladimir: Publishing House of Vladimir State University, 2010, 285 p. (In Russian)
6. Dubrova E. *Fault-Tolerant Design*. Springer Science+Business Media New York 2013, 2013, XV+185 p., DOI: 10.1007/978-1-4614-2113-9.
7. Drozd A. V., Kharchenko V. S., Antoshchuk S. G., Drozd Yu. V., Drozd M. A., Sulima Yu. Yu. *Rabocheye diagnostirovaniye bezopasnykh informatsionno-upravlyayushchikh sistem* [Working diagnostics of safe information and control systems]. Ed. by A. V. Drozd and V. S. Kharchenko. Kharkov: National Aerospace University named after N. E. Zhukovsky "KHAU", 2012, 614 p. (In Russian)
8. Ubar R., Raik J., Jenihhin M., Jutman A. *Structural Decision Diagrams in Digital Test: Theory and Applications*, Springer Nature Switzerland AG 2024, XIII+595 p., DOI: 10.1007/978-3-031-44734-1.
9. Sahana A. R., Chirag V., Suresh G., Thejaswini P., Nandi S. *Application of Error Detection and Correction Techniques to Self-Checking VLSI Systems: An Overview // Proceedings of 2023 IEEE Guwahati Subsection Conference (GCON), Guwahati, 2023*, DOI: 10.1109/GCON58516.2023.10183449.
10. Chioktour V., Kakarountas A. *Adaptive BIST for Concurrent On-Line Testing on Combinational Circuits*. *Electronics*, 2022, vol. 19, I. 11, pp. 1–20, DOI: 10.3390/electronics11193193.
11. Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. *New Methods of Concurrent Checking: Edition 1*. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., 2008, 184 p.
12. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Dmitriev A. V., Morozov A. V., Gessel M. *Organizatsiya funktsional'nogo kontrolya kombinatsionnykh skhem metodom logicheskogo dopolneniya* [Organization of functional control of combinational circuits by the method of logical complement]. *Elektronnoe modelirovaniye* [Electronic Modeling], 2002, vol. 24, I. 6, pp. 52–66. (In Russian)
13. Gessel M., Morozov A. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. *Logicheskoye dopolneniye — novyy metod kontrolya kombinatsionnykh skhem* [Logical complement — a new method of control of combinational circuits]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 2003, I. 1, pp. 167–176. (In Russian)
14. Yablonsky S. V., Gavrilov G. P., Kudryavtsev V. B. *Funktsii algebrы logiki i klassy Posta* [Functions of Boolean Algebra and Post Classes]. Moscow: Nauka Publ., 1966, 120 p. (In Russian)
15. Shalyto A. A. *Logicheskoye upravleniye. Metody apparatnoy i programmnoy realizatsii* [Logical control. Methods of hardware and software implementation]. St. Petersburg: Nauka Publ., 2000, 780 p. (In Russian)
16. Reynolds D. A., Meize G. *Fault Detection Capabilities of Alternating Logic*. *IEEE Transactions on Computers*, 1978, vol. C-27, I. 12, pp. 1093–1098, DOI: 10.1109/TC.1978.1675011.
17. Aksenova G. P. *Vosstanovleniye v dublirovannykh ustroystvakh metodom invertirovaniya dannykh* [Recovery in duplicated devices by data inversion method]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 1987, I. 10, pp. 144–153. (In Russian)
18. Sapozhnikov V. V., 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, USA, Princeton, 1996*, pp. 162–168.
19. Gessel M., Dmitriev A. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. *Samotestiruyemaya struktura dlya funktsional'nogo obnaruzheniya otkazov v kombinatsionnykh skhemakh* [Self-testing structure for functional detection of failures in combinational circuits]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 1999, I. 11, pp. 162–174. (In Russian)
20. Gessel M., Dmitriev A. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. *Obnaruzheniye neispravnostey v kombinatsionnykh skhemakh s pomoshch'yu samodvoystvennogo*

- kontrolya [Detection of faults in combinational circuits using self-dual control]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 2000, I. 7, pp. 140–149. (In Russian)
21. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Gessel M. *Samodvoystvennyye diskretnyye ustroystva* [Self-dual discrete devices]. SPb: Energoatomizdat (St. Petersburg branch), 2001, 331 p. (In Russian)
 22. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Valiev R. Sh. O sinteze samodvoystvennykh logicheskikh skhem s pamyat'yu [On the synthesis of self-dual logical circuits with memory]. *Elektronnoye modelirovaniye* [Electronic modeling], 2004, vol. 26, I. 2, pp. 39–57. (In Russian)
 23. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Valiev R. Sh. *Sintez samodvoystvennykh diskretnykh sistem* [Synthesis of self-dual discrete systems]. SPb: Elmore, 2006, 220 p. (In Russian)
 24. Gessel M., Morozov A. A., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. Postroyeniye samo-proveryayemykh kombinatsionnykh skhem na osnove svoystv samodvoystvennykh funktsiy [Construction of self-checking combinational circuits based on the properties of self-dual functions]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 2000, I. 2, pp. 151–163. (In Russian)
 25. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov V. I., Osadchy G., Pivovarov D. Self-Dual Complement Method up to Constant-Weight Codes for Arrangement of Combinational Logical Circuits Concurrent Error-Detection Systems. Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTs'2019), Batumi, Georgia, September 13–16, 2019, pp. 136–143, DOI: 10.1109/EWDTs.2019.8884398.
 26. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Pivovarov D. V. Obnaruzheniye neispravnostey v kombinatsionnykh skhemakh na osnove samodvoystvennogo dopolneniya do ravnovesnykh kodov [Fault Detection in Combinational Circuits Based on Self-Dual Complement to Constant-Weight Codes]. *Trudy Instituta sistemnogo programirovaniya RAN* [Proceedings of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences], 2019, vol. 31, I. 1, pp. 115–132, DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(1)-8. (In Russian)
 27. Efanov D. V., Pogodina T. S. Issledovaniye svoystv samodvoystvennykh kombinatsionnykh ustroystv s kontrolem vychisleniy 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, I. 2, pp. 349–392, DOI: 10.15622/ia.22.2.5. (In Russian)
 28. Efanov D. V., Pogodina T. S. Samodvoystvennyye tsifrovyye ustroystva s kontrolem vychisleniy po kodam Syaou [Self-dual digital devices with computation control using Xiao codes]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Bulletin of Tomsk State University. Management, computing engineering and informatics], 2023, I. 63, pp. 118–136, DOI: 10.17223/19988605/63/14. (In Russian)
 29. Gessel M., Moshanin V. I., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. Obnaruzheniye neispravnostey v samoproveryayemykh kombinatsionnykh skhemakh s ispol'zovaniyem svoystv samodvoystvennykh funktsiy [Detection of faults in self-checking combinational circuits using the properties of self-dual functions]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 1997, I. 12, pp. 193–200. (In Russian)
 30. Yablonskii S. V. *Vvedeniye v diskretnuyu matematiku* [Introduction to Discrete Mathematics]. Ed. by V. A. Sadovnichev, 4th ed., reprinted. Moscow: Higher School Publ., 2003, 384 p. (In Russian)
 31. Efanov D. V. Osobennosti realizatsii samoproveryayemykh struktur na osnove metoda invertirovaniya dannykh i lineynykh kodov [Features of the implementation of self-checking structures based on the method of data inversion and linear codes]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Bulletin of Tomsk State University. Management, Computing and Information Science], 2023, I. 65, pp. 126–138, DOI: 10.17223/19988605/65/13. (In Russian)
 32. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. *Metody sinteza nadezhnykh avtomatov* [Methods of synthesis of reliable automata]. Leningrad: Energy Publ., 1980, 96 p. (In Russian)
 33. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. *Diskretnyye avtomaty s obnaruzheniyem otkazov* [Discrete Automata with Failure Detection]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1984, 112 p. (In Russian)
 34. Berger J. M. A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels. *Information and Control*, 1961, vol. 4, I. 1, pp. 68–73, DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
 35. The On-Line Encyclopedia of Integer Sequences. Electronic resource, access mode: URL: <https://oeis.org>, date of access 23.01.2025.
 36. Berger J. M. A Note on Burst Detection Sum Codes. *Information and Control*, 1961, vol. 4, I. 2–3, pp. 297–299, DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80024-7.
 37. Das D., Toubia N. A. Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multilevel Circuits. Proceedings of 17th IEEE Test Symposium, California, USA, 1999, pp. 370–376, DOI: 10.1109/VTEST.1999.766691.
 38. Dmitriyev V. V. O dvukh sposobakh vzveshivaniya i ikh vliyaniy na svoystva kodov s summirovaniyem vzveshennykh perekhodov v sistemakh funktsional'nogo kontrolya logicheskikh skhem [On two methods of weighting and their influence on the properties of codes with summation of weighted transitions in systems of functional control of logical circuits]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Railway Engineering], 2015, I. 3, pp. 119–129. (In Russian)
 39. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V. Vzveshennyye kody s summirovaniyem dlya organizatsii kontrolya logicheskikh ustroystv [Weighted codes with summation for organizing control of logical devices]. *Elektronnoye modelirovaniye* [Electronic Modeling], 2014, vol. 36, I. 1, pp. 59–80. (In Russian)
 40. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. Using Codes with Summation of Weighted Bits to Organize Checking of Combinational Logical Devices. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2019, vol. 53, I. 1, pp. 1–11, DOI: 10.3103/S0146411619010061.
 41. Efanov D. V., Elina E. I. Modul'nyye kody s summirovaniyem s posledovatel'nost'yu vesovykh koeffitsiyentov, obrazuyushchey natural'nyy ryad chisel za isklucheniye stepeny dvoynki [Modular codes with summation with a sequence of weight coefficients forming a natural series of numbers with the exception of powers of two]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport], 2024, vol. 10, I. 3, pp. 296–330, DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-03-296-330. (In Russian)
 42. Das D., Toubia N. A., Seuring M., Gossel M. Low Cost Concurrent Error Detection Based on Modulo Weight-Based Codes. Proceedings of the IEEE 6th International On-Line Testing Workshop (IOLTW), Spain, Palma de Mallorca, July 3–5, 2000, pp. 171–176, DOI: 10.1109/OLT.2000.856633.
 43. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. *Samoproveryayemye diskretnyye ustroystva* [Self-checking discrete devices]. St. Petersburg: Energoatomizdat Publ., 1992, 224 p. (In Russian)
 44. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V. *Kody s summirovaniyem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. Tom 1: Klassicheskiye kody Bergera i ikh modifikatsii* [Summation codes for technical diagnostics systems. Volume 1: Classic Berger codes and their modifications]. Moscow: Nauka Publ., 2020, 383 p. (In Russian)
 45. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V. *Kody s summirovaniyem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. Tom 2: Vzveshennyye kody s summirovaniyem* [Summation codes for technical diagnostics systems. Volume 2: Weighted summation codes]. Moscow: Nauka Publ., 2021, 455 p. (In Russian)
 46. Karibsky V. V., Parkhomenko A. A., Sogomonian E. S., Khalchev V. F. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki. V 2-kh knigakh. Kn. I. Modeli ob'ektov, metody i algoritmy diagnoza* [Fundamentals of technical diagnostics. In 2 books. Book I. Models of objects, methods and algorithms for diagnosis]. Moscow: Energia Publ., 1976, 464 p. (In Russian)

47. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki* [Fundamentals of technical diagnostics]. M.: Marshrut, Publ., 2004, 318 p. (In Russian)
48. Lala P. K. *Self-Checking and Fault-Tolerant Digital Design*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001, 216 p.
49. Dmitriev A., Saposhnikov V., Saposhnikov V., Goessel M. New Self-Dual Circuits for Error Detection and Testing. *VLSI Design*, 2000, vol. 11, I. 1, pp. 1–21, DOI: 10.1155/2000/84720.
50. Efanov D. V., Pivovarov D. V. Testery samodvoystvennykh i "blizkikh" k nim signalov [Testers of self-dual and "close" to them signals]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye* [News of higher educational institutions. Instrument making], 2024, vol. 67, I. 1, pp. 5–19, DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-1-5-19. (In Russian)
51. Carter W. C., Duke K. A., Schneider P. R. Self-Checking Error Checker for Two-Rail Coded Data. United States Patent Office, filed July 25, 1968. Ser. 747533, patented Jan. 26, N. Y., 1971, 10 p.
52. Efanov D. V., Pivovarov D. V., Cortegoso Vissio N., Kuptsov A. O., Egorov D. E. Method for Testing Combinational Circuits by Multiple Diagnostic Features Using Weight-Based Sum Codes Properties. *Automation*, 2025, vol. 6, I. 1, pp. 1–20, DOI: 10.3390/automation6010006.
53. Saposhnikov V., Saposhnikov V. I. New Code for Fault Detection in Logic Circuits. Proceedings of 4th International Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems, St. Petersburg, Russia, June 21–24, 1999, pp. 693–696.
54. Mekhov V. B., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. V. Kontrol' kombinatsionnykh skhem na osnove modifitsirovannykh kodov s summirovaniyem [Control of combinational circuits based on modified summation codes]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 2008, No. 8, pp. 153–165. (In Russian)
55. Aksenova G. P. [Necessary and sufficient conditions for constructing fully verifiable modulo 2 convolution circuits]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 1979, I. 9, pp. 126–135. (In Russian)
56. Zakrevsky A. D., Pottosin Yu. V., Cheremisina L. D. *Logicheskiye osnovy proyektirovaniya diskretnykh ustroystv* [Logical Foundations of Designing Discrete Devices]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2007, 592 p. (In Russian)
57. Efanov D. V., Elina E. I. Sintez samoproveryayemykh tsifrovyykh ustroystv na osnove logicheskoy korrektsii signalov s primeneniym vzveshennykh kodov Bouza–Lina [Synthesis of Self-Checking Digital Devices Based on Logical Signal Correction Using Weighted Bose–Lin Codes]. *Problemy upravleniya* [Problems of Control], 2024, I. 4, pp. 26–43, DOI: 10.25728/ru.2024.4.3. (In Russian)
58. Graham R. L., Knuth D. E., Patashnik O. *Konkretnaya matematika. Matematicheskiye osnovy informatiki* [Concrete Mathematics. Mathematical Foundations of Computer Science], 2nd ed. Moscow: Williams Publ., 2017, 784 p. (In Russian)
59. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V., Dmitriev V. V. Novyye struktury sistem funktsional'nogo kontrolya logicheskikh skhem [New structures of functional control systems of logical circuits]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics], 2017, I. 2, P. 127–143. (In Russian)
60. Drozd A., Kharchenko V., Antoshchuk S., Sulima J., Drozd M. Checkability of the Digital Components in Safety-Critical Systems: Problems and Solutions. Proceedings of 9th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2011), Sevastopol, Ukraine, 2011, pp. 411–416, DOI: 10.1109/EWDTS.2011.6116606.
61. Drozd O., Perebeinos I., Martynyuk O., Zashcholkin K., Ivanova O., Drozd M. Hidden Fault Analysis of FPGA Projects for Critical Applications. Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 25–29 February, 2020, Lviv-Slavsko, Ukraine, p. 142, DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235591.
62. Sapozhnikov V. I. V. Sintez sistem upravleniya dvizheniyem poyezdov na zheleznodorozhnykh stantsiyakh s isklyucheniyem opasnykh otkazov [Synthesis of train control systems at railway stations with the elimination of dangerous failures]. Moscow: Nauka Publ., 2021, 229 p. (In Russian)