

ISSN 2412-9186

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH



Vol. 12 2026 No 2



Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

АВТОМАТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH

Том 12 Июнь 2026 № 2



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

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

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

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

Подписано в печать 16.06.2026. Формат: 60×84/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 9.3. Тираж: 200 экз. Заказ 2084/1
Отпечатано в типографии ООО «Типографский комплекс «Девиз»
190020, Санкт-Петербург, вн. тер. г. МО Екатерингофский,
наб. Обводного канала, д. 138, к. 1, литера В, пом. 4-Н-6-часть, ком. 311-часть.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL

Alexander Nikitin	Dr. Sci., Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Editor-in-chief of "Transport automation research", St. Petersburg, Russia
Konstantin Bochkov	Dr. Sci., Professor, Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus
Marek Mezitis	PhD, Associate Professor, Riga Technical University, Riga, Latvia
Raimund Ubar	Dr. Sci., Member of Estonian Academy of Sciences, Tallinn Technical University, Tallinn, Estonia
Vladimir Hahanov	Dr. Sci., Professor, Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine
Funian Hu	PhD, Professor, School of Electrical Engineering of Jiangsu Normal University, Xuzhou City, China
Khristo Khristov	Dr. Sci., Professor, Technical University, Sofia, Bulgaria

EDITORIAL BOARD

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

Научно-технический журнал «Автоматика на транспорте»	СОДЕРЖАНИЕ
<p>Учредитель</p> <p>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»</p>	<p>ЖИВУЧЕСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ</p> <p><i>Юсупов Р. Р., Хохрин А. С., Щербина Е. Г., Щербина А. Е., Павлов Е. В.</i> Теоретические и практические аспекты измерения А-параметров эквивалентного четырехполюсника путевого фильтра тональной рельсовой цепи..... 89</p> <p><i>Соловьёв А. Д.</i> Защищенные подходы к вводам питания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики при ударах молнии 114</p>
<p>Издатель</p> <p>ООО «Медиа-Сервис» по договору № ЭА87426 от 12.01.2026</p>	<p>ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ</p>
<p>Главный редактор</p> <p>А. Б. Никитин, д-р техн. наук, профессор ПГУПС</p>	<p><i>Баранов Л. А., Кулагин М. А., Янченко Г. О.</i> Выбор алгоритмов искусственного интеллекта в задачах технического зрения для обнаружения и локализации объектов на железной дороге..... 128</p>
<p>Редакция журнала</p> <p>Научный редактор — И. В. Кушпиль, канд. техн. наук Перевод — И. Л. Лютомская Литературный редактор и корректор — Л. А. Солодовникова Верстка — М. В. Цыбульская</p>	<p><i>Трофимов Ю. А., Дульский Е. Ю., Иванов П. Ю., Ковшин А. С., Колосов Д. Д.</i> Подход к построению интеллектуальной системы обнаружения аномальных объектов в железнодорожной зоне по видеопотоку в реальном времени..... 138</p> <p><i>Гусева И. А.</i> Алгоритмическое обеспечение проактивного управления движением беспилотных автотранспортных средств в интеллектуальных транспортных системах в условиях возможного аквапланирования..... 149</p>
<p>Адрес учредителя и редакции</p> <p>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</p>	
<p>Адрес издателя</p> <p>111024, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово, ул. Авиамоторная, д. 50, стр. 2, помещ. 29/2</p>	
<p>Свидетельство о регистрации средства массовой информации</p> <p>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</p>	
<p>Индекс подписки: Агентство «УРАЛ-ПРЕСС», 33316</p>	
<p>© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2026</p>	

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>Iusupov R. R., Khokhrin A. S., Shcherbina E. G., Shcherbina A. E., Pavlov E. V.</i> Theoretical and Practical Aspects of Measuring the A-Parameters of the Equivalent Two-Port Network of the Track Filter 89
PUBLISHER Media Service LLC № ЭА87426, 12.01.2026	<i>Solov'yov A. D.</i> Protected Approaches to Power Supply Inputs of Railway Automation and Remote control Devices under Lightning Strikes..... 114
EDITOR-IN-CHIEF Nikitin A. B., Dr. Sci. in Engineering, Professor	INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS <i>Baranov L. A., Kulagin M. A., Yanchenko G. O.</i> Selection of Artificial Intelligence Algorithms in Computer Vision Tasks for Detection and Localization of Objects on Railways..... 128
JOURNAL STAFF Science editor: Igor V. Kushpil, PhD English translation: Irina L. Lyutomskaya Editing and proofreading: Larisa A. Solodovnikova Layout: Margarita V. Tsybul'skaya	<i>Trofimov Yu. A., Dul'skiy E. Yu., Ivanov P. Yu., Kovshin A. S., Kolosov D. D.</i> Approach to Building an Intelligent System for Detecting Anomalous Objects in the Railway Zone Using Real-Time Video Stream..... 138
FOUNDER'S AND EDITORIAL OFFICE ADDRESS 190031, Russia, St. Petersburg, Moskovskiy ave., 9, "Automation and Remote Control on Railways" department +7 (812) 457-85-79 ait.automatika@yandex.ru www.atjournal.ru	<i>Guseva I. A.</i> Algorithmic Support for Proactive Motion Control of Unmanned Vehicles Motor Vehicles in Intelligent Transport Systems in Conditions of Possible Aquaplaning 149
PUBLISHER'S ADDRESS 111024, Moscow, inner ter. city municipal district Lefortovo, Aviamotornaya st., 50, building 2, room 29/2	
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 OKRUG LLC" 33316 © PGUPS, 2026	

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗМЕРЕНИЯ А-ПАРАМЕТРОВ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА ПУТЕВОГО ФИЛЬТРА ТОНАЛЬНОЙ РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ

ЮСУПОВ Руслан Рифович¹, кандидат техн. наук, доцент, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»; e-mail: r.iusupov@samgups.ru

ХОХРИН Алексей Сергеевич¹, кандидат техн. наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»; e-mail: a.hohrin@samgups.ru

ЩЕРБИНА Евгений Геннадьевич², кандидат техн. наук, доцент, технический директор; e-mail: evgeny.shcherbina@1520signal.ru

ЩЕРБИНА Алексей Евгеньевич², кандидат техн. наук, начальник отдела рельсовых цепей; e-mail: alexey.shcherbina@1520signal.ru

ПАВЛОВ Евгений Владимирович³, кандидат техн. наук, первый заместитель генерального директора; e-mail: ev.pavlov@elteza.ru

¹ ФГБОУ ВО «Приволжский государственный университет путей сообщения», Самара

² ООО «1520 Сигнал», Москва

³ АО «Объединенные электротехнические заводы» (АО «ЭЛТЕЗА»), Москва

При разработке и последующей актуализации цифровых двойников тональных рельсовых цепей возникает необходимость измерения А-параметров (коэффициентов A , B , C , D) эквивалентных четырехполюсников аппаратуры, входящей в состав конкретной рельсовой цепи. Измерение А-параметров четырехполюсника путевого фильтра ФПМ, применяемого в тональных рельсовых цепях, осложняется нелинейностью входящего в состав ФПМ трансформатора, приводящей к зависимости этих параметров от напряжения на входе ФПМ. Рассмотрены применяемые в настоящее время методы измерения А-параметров линейных четырехполюсников. Представлены аспекты практической реализации предложенной ранее авторами методики измерения А-параметров четырехполюсника ФПМ, учитывающей нелинейность трансформатора ФПМ посредством измерений в конкретной рабочей точке ФПМ, под которой понимается заданное значение напряжения на его входе. Выполнена реализация методики для фильтра ФПМ 8, 9, 11, настроенного на частоту несущей 480 Гц при значении входного напряжения ФПМ 3,3 В. Рассчитана матрица коэффициентов четырехполюсника ФПМ. Выполнены проверки правильности измерений. Относительная погрешность модуля и аргумента входного сопротивления трансформатора, модулей и фаз входного тока и напряжения трансформатора, входного тока и напряжения ФПМ не превысила по абсолютной величине 1%. Использование методов измерения А-параметров линейных четырехполюсников в режимах холостого хода и короткого замыкания вследствие нелинейности трансформатора ФПМ может привести к некорректности получаемых значений параметров четырехполюсника ФПМ. Рассмотренная в статье на конкретном практическом примере методика измерения А-параметров четырехполюсника ФПМ позволяет определять значения параметров четырехполюсника ФПМ с точностью, приемлемой для использования в расчетах регулировочных характеристик рельсовых цепей.

Ключевые слова: цифровой двойник, тональная рельсовая цепь, фильтр путевого, метод трех известных нагрузок, методика измерения, рабочая точка, точность математической модели

DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-02-89-113

▼ Введение

Цифровая трансформация хозяйства железнодорожной автоматики и телемеханики ставит задачу массового внедрения цифровых двойников эксплуатируемых и перспективных устройств [1]. В современных микропроцессорных системах управления движением поездов вопросы цифровизации неразрывно связаны

с проблемой обеспечения безопасности движения поездов [2]. Важнейшую роль в обеспечении безопасности движения поездов на железных дорогах России играют электрические рельсовые цепи (РЦ). Необходимость контроля их состояния и обеспечения эффективной работы ставит задачи массового внедрения и практического применения их цифровых

двойников. Актуальной также становится задача теоретической и практической подготовки соответствующих специалистов, способных решать данные вопросы.

В практике решения задач анализа и синтеза РЦ широко используются их математические модели в виде соединенных между собой четырехполюсников (ЧП), замещающих элементы РЦ [3, 4]. Каждый ЧП характеризуется системой параметров, описывающих взаимосвязь входных и выходных величин (токов и напряжений) элемента РЦ. Разработка и поддержание в актуальном состоянии цифровых двойников РЦ сопряжены с рядом трудностей, обусловленных зависимостью параметров ЧП от множества факторов. Так, значения A -параметров (коэффициентов A , B , C , D) ЧП путевого фильтра ФПМ, являющегося элементом современных тональных РЦ (ТРЦ), зависят от частоты f_n несущей сигнала ТРЦ, типа ФПМ, настройки и схемы включения ФПМ (сочетания установленных перемычек для настройки в резонанс и используемых выходных контактов), технологического разброса и изменения в процессе эксплуатации значений параметров компонентов ФПМ.

С учетом вышесказанного при разработке и актуализации цифровых двойников ТРЦ возникает необходимость измерения значений A -параметров ЧП конкретных экземпляров ФПМ, применяемых в определенных условиях эксплуатации.

Целью настоящей статьи является анализ теоретических и практических аспектов проблемы измерения A -параметров эквивалентного ЧП путевого фильтра ФПМ и точности математической модели в широком диапазоне рабочих напряжений, а также детальное рассмотрение предложенного авторами ранее варианта ее решения для возможности практической реализации при автоматизации аппаратно-программными средствами. В статье последовательно выполняются следующие задачи:

1. Анализ известных методов измерения A -параметров эквивалентных ЧП в аспекте их применимости к измерению A -параметров ЧП ФПМ.

2. Подробное обоснование практических особенностей предложенной авторами ранее методики измерения A -параметров ЧП ФПМ.

3. Рассмотрение на конкретном примере аспектов практической реализации данной методики, знание и учет которых позволят избежать ошибок и получить корректные результаты измерений.

Методы измерения A -параметров эквивалентных четырехполюсников

Наиболее общим методом определения A -параметров ЧП является метод трех известных нагрузок [5–7]. В зависимости от условий работы четырехполюсника и пределов изменения напряжений и токов нагрузки могут выбираться в пределах по модулю от 0 до ∞ и по аргументу от $+\pi/2$ до $-\pi/2$.

В настоящее время в практике измерения коэффициентов A , B , C , D линейных ЧП применяются следующие методы [6, 8–10]:

- холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ);
- ХХ, КЗ и известной нагрузки;
- непосредственной оценки.

Первые два из перечисленных методов являются вариациями метода трех известных нагрузок для частных случаев граничных значений нагрузок (холостой ход — сопротивление нагрузки равно ∞ , короткое замыкание — сопротивление нагрузки равно 0). В третьем методе также используются режимы ХХ и КЗ четырехполюсника.

Перечисленные выше методы находят применение в том числе и в учебном процессе.

Измерения на граничных значениях нагрузок (0 и ∞) упрощают последующие расчеты, но использование режимов ХХ и КЗ на практике целесообразно только при условии линейности характеристик ЧП. Кроме того, режим КЗ может привести к нагреву обмоток трансформатора и неконтролируемому изменению его параметров, что потребует применения оборудования для охлаждения обмоток и поддержания постоянной температуры в помещении, где проводятся измерения. Режим КЗ также может оказаться неприемлемым для трансформатора по причине выхода токов за предельно допустимые значения.

Реализация режима КЗ требует, кроме того, наличия генератора сигналов достаточной мощности. Практика измерений и расчетов, проведенных авторами, показывает,

что потребная мощность генератора может составлять более 100 Вт. Однако дистанции сигнализации, централизации и блокировки, согласно Регламенту технической и технологической оснащённости¹, а также многие учебно-исследовательские лаборатории вузов, как правило, оснащены генераторами сигналов типа ГЗ-123, ГЗ-121, ГЗ-118 или аналогичными, выходная мощность которых не превышает 10 Вт. Поэтому применение данных методов будет ограничено возможностями (характеристиками) имеющихся в наличии приборов и оборудования.

В работе [11] предлагается методика определения A -параметров ЧП ФПМ, состоящая из нескольких этапов. Сначала ЧП ФПМ разбивается на два каскадно включенных ЧП: конденсатора с резонансной емкостью $C_{рез}$ (в оригинальном тексте использовано обозначение C_{ϕ}) и реального трансформатора. Затем определяются коэффициенты $A_{тр}$, $B_{тр}$, $C_{тр}$, $D_{тр}$ ЧП трансформатора для заданного режима подключения через его входные сопротивления в режимах ХХ и КЗ. Матрица коэффициентов ЧП фильтра определяется выражением

$$\begin{bmatrix} A_{\phi} & B_{\phi} \\ C_{\phi} & D_{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{j\omega C_{рез}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{тр} & B_{тр} \\ C_{тр} & D_{тр} \end{bmatrix}.$$

В развитие данной методики в работе [12] предлагается для измерения входного сопротивления трансформатора в режиме ХХ использовать метод трех вольтметров, а в режиме КЗ — измеритель иммитанса.

Сложность измерения A -параметров ЧП трансформатора ФПМ создает тот факт, что трансформатор является нелинейным элементом. Об этом говорит предварительно снятая зависимость модуля входного сопротивления $Z_{1тр}$ трансформатора от входного напряжения $U_{1тр}$ (рис. 1) в режиме ХХ.

Причина этого — нелинейность индуктивности намагничивания вследствие изменения магнитной проницаемости материала сердечника при изменении напряжений на его обмотках (особенно характерно для трансформаторов, выполненных на сердечниках с минимальным воздушным зазором или без него). Как следствие, нелинейность трансформатора приводит к зависимости A -параметров ЧП ФПМ от напряжения на входе ФПМ. Очевидно, что параметры трансформатора актуальны в диапазоне рабочих напряжений, который в данном случае составляет 5–80 В (выходное напряжение генератора может устанавливаться от 1,3 до 8 В, добротность последовательного колебательного контура в ФПМ — от 4 до 10, откуда и получается указанный диапазон полезного напряжения на входе трансформатора).

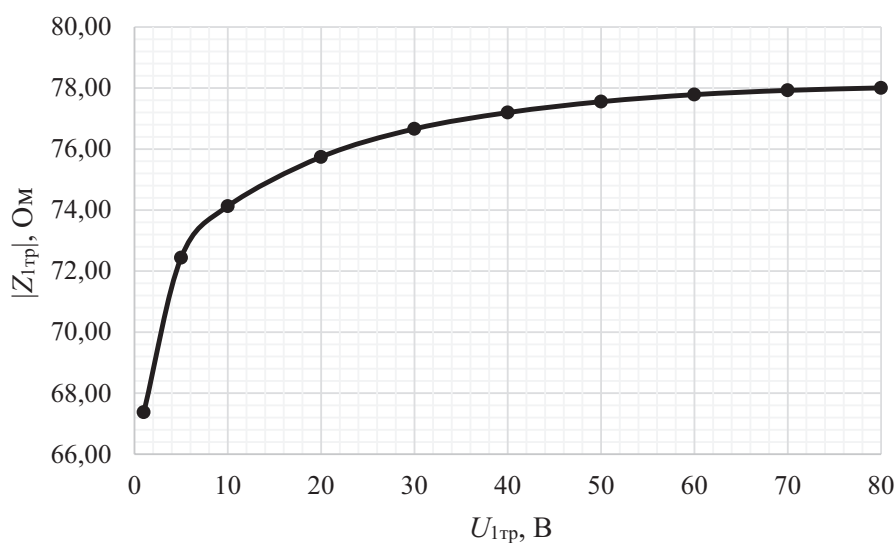


Рис. 1. Входное сопротивление трансформатора в режиме ХХ

¹ Регламент технической и технологической оснащённости дистанций сигнализации, централизации и блокировки — структурных подразделений Центральной дирекции инфраструктуры: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 20 июля 2015 г. № 1778р. М., 2015. 31 с.

При использовании измерителя иммитанса измерение входного сопротивления трансформатора в режиме КЗ будет осуществляться при напряжении, существенно отличающемся от напряжения на входе трансформатора, действующего в условиях реальной эксплуатации. Так, у измерителя иммитанса Е7-20, которым оснащаются дистанции сигнализации, централизации и блокировки в соответствии с Регламентом технической и технологической оснащённости дистанций сигнализации, централизации и блокировки, напряжение измерительного сигнала составляет от 40 мВ до 1 В, в то время как в реальных условиях напряжение на входе трансформатора может быть значительно выше. Например, при проверке ФПМ в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1 в паспорте ФПМ¹ (это одна из возможных схем включения ФПМ в рельсовую цепь), при настройке фильтра в резонанс напряжение на контактах 11-43 ФПМ (выводы входной обмотки трансформатора) должно быть не менее 35 В. Как следствие, полученные с помощью измерителя иммитанса значения A -параметров ЧП ФПМ будут некорректными для сигнала такой величины. Тем более что, как видно по графику на рис. 1, нелинейность характеристики при напряжении ниже 5 В выше, чем при более высоком напряжении.

Выбору и разработке (и тем более применению, реализации в аппаратно-программном комплексе) метода измерений параметров должна предшествовать идентификация пассивного элемента электрической цепи по признаку линейности. Игнорирование этого правила может привести к ложным результатам и опасным в системе обеспечения безопасности движения поездов последствиям.

Методика измерения A -параметров эквивалентного четырехполюсника ФПМ

Как было отмечено выше, нелинейность расположенного в ФПМ трансформатора приводит к зависимости A -параметров ЧП ФПМ от напряжения на входе ФПМ. По-

этому использование трех вышеперечисленных методов на практике не позволяет получить правильные и соответствующие конкретным условиям эксплуатации значения A -параметров ЧП ФПМ.

Для решения данной задачи измерение A -параметров необходимо производить при определенном (заранее заданном, например, в соответствии с регулировочной таблицей ТРЦ) значении напряжения на входе ФПМ (назовем это значение условно **рабочей точкой (РТ) ФПМ**).

В [13] авторами была предложена методика измерения A -параметров эквивалентного ЧП ФПМ, отличительными особенностями которой являются, во-первых, адаптация применительно к ФПМ метода определения параметров эквивалентного ЧП дроссель-трансформатора, представленного в [5], а во-вторых, совокупность качественных и количественных проверок, позволяющих сделать обоснованный вывод о правильности измеренных значений A -параметров ЧП ФПМ и, соответственно, адекватности полученных математических моделей. В предложенной методике, учитывая нелинейность трансформатора ФПМ, измерение A -параметров ЧП ФПМ осуществляется в конкретной РТ ФПМ, что делает возможным применение линейной модели в данной точке. Режимы ХХ и КЗ не используются. Реализация этой методики в части расчетов по данным измерений была выполнена в виде программы «Расчет A -параметров четырехполюсника фильтра путевого ФПМ» [14].

Методика состоит из нескольких этапов. Сначала ЧП ФПМ $N_{\text{ФПМ}}$ так же, как и в [11], разбивается на два каскадно соединенных ЧП: N_c — ЧП конденсаторов и $N_{\text{тр}}$ — ЧП трансформатора (рис. 2).

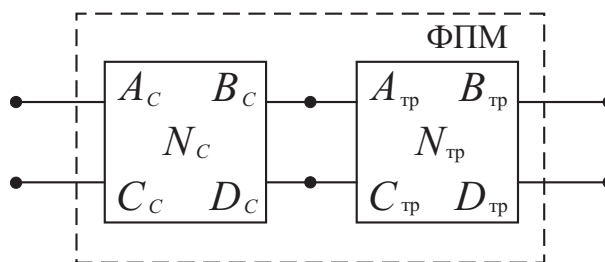


Рис. 2. Представление ЧП ФПМ как двух каскадно соединенных ЧП

¹ Фильтр путевого ФПМ: паспорт 36163-00-00ПС / ЛОЭТЗ — филиал ОАО «ЭЛТЕЗА». М. 7 с.

Далее последовательно выполняются представленные ниже этапы.

Этап 1. Определение РТ трансформатора ФПМ. Исходя из реальных нагрузок трансформатора ФПМ определяются номинальные значения нагрузочных сопротивлений $R_{н1}—R_{н5}$. Их рекомендуется подбирать так, чтобы $R_{н1}$ было приблизительно равно модулю минимального значения сопротивления нагрузки на выходе ФПМ при его включении в конкретную рельсовую цепь, $R_{н3}$ — модулю максимального значения, а $R_{н2} \approx (R_{н1} + R_{н3})/2$. Значения $R_{н4}$ и $R_{н5}$ выбираются произвольно промежуточными между $R_{н1}$ и $R_{н2}$, $R_{н2}$ и $R_{н3}$ соответственно.

Далее в заданной РТ ФПМ измеряется значение напряжения на входе трансформатора ФПМ при подключении к его выходу нагрузочного сопротивления $R_{н2}$. Обозначим это значение напряжения как $U_{РТ,тр}$.

Этап 2. Измерение А-параметров ЧП трансформатора. Измерение осуществляется методом трех известных нагрузок. Суть метода состоит в том, что к выходу ЧП трансформатора поочередно подключают три нагрузочных сопротивления $R_{н1}$, $R_{н2}$, $R_{н3}$. Затем измерениями определяют, в какие значения входных сопротивлений $Z_{1,тр.изм.1}$, $Z_{1,тр.изм.2}$, $Z_{1,тр.изм.3}$ эти сопротивления трансформируются. При этом важно для каждого нагрузочного сопротивления перед измерениями выставлять на входе трансформатора значение напряжения, равное $U_{РТ,тр}$.

Для измерения комплексных входных сопротивлений можно воспользоваться методом косвенной оценки: сначала методом непосредственной оценки измеряются модули входных тока и напряжения трансформатора, их разность фаз, затем модуль комплексного сопротивления определяется как отношение модуля напряжения к модулю тока, а аргумент комплексного сопротивления определяется как разность фаз напряжения и тока. Измерения модулей и фаз входного тока и напряжения можно осуществить измерительным комплексом, состоящим из четырехканального цифрового осциллографа с входной чувствительностью не хуже 1 мВ/дел, дифференциального предусилителя и токовых пробников. При отсутствии такого комплекса можно использовать метод трех вольтметров, описанный в издании [6] на с. 110 и в [12]. Однако в этом

случае погрешность измерения аргументов сопротивлений будет зависеть от соотношения измеряемых напряжений. Так, в [6] (рис. 100 на с. 111) и в [12] также приведен график зависимости погрешности измерения аргумента входного сопротивления от его вычисляемого значения. Кроме того, метод трех вольтметров более трудоемок. Для измерений в одной РТ на одной частоте или на небольшом наборе РТ и частот это не критично. Однако на практике может возникнуть необходимость выполнить измерения в большом количестве РТ и частот, например, на пяти частотах (420, 480, 580, 720 и 780 Гц) сигнального тока самой рельсовой цепи и на четырех частотах (25, 50, 75 и 175 Гц) сигнальных токов автоматической локомотивной сигнализации, а также при шести значениях коэффициента трансформации. В этом случае измерения становятся громоздкими и целесообразно использовать более эффективное по трудозатратам одновременное измерение модулей и фаз токов и напряжений с помощью измерительного комплекса, упоминавшегося выше.

Далее А-параметры ЧП трансформатора определяются в соответствии с выражениями, приведенными в [5].

Этап 3. Определение А-параметров ЧП конденсаторов. Осуществляется путем измерения их емкости $C_{кон}$ измерителем иммитанса и расчета в соответствии с выражением

$$N_C = \begin{bmatrix} A_C & B_C \\ C_C & D_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2\pi f_n C_{кон}} \cdot e^{-j90^\circ} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $C_{кон}$ — емкость параллельно соединенных конденсаторов ФПМ в рассматриваемом варианте включения.

Этап 4. Определение А-параметров ЧП ФПМ. Осуществляется перемножением матриц А-параметров ЧП конденсаторов и ЧП трансформатора:

$$N_{ФПМ} = N_C N_{тр}. \quad (2)$$

Этап 5. Проверка адекватности математических моделей эквивалентных ЧП трансформатора ФПМ и ФПМ в целом. Осуществляется ряд качественных и количественных проверок адекватности математических

моделей как отдельного трансформатора, так и ФПМ в целом.

Первичные качественные проверки на отсутствие грубых ошибок при сборке схем и выполнении непосредственно измерений осуществляются путем расчета (через измеренные A -параметры ЧП трансформатора ФПМ) и качественного анализа значений следующих величин:

- 1) модулей и аргументов входных сопротивлений трансформатора со стороны входа ($Z_{1Хтр}$ и $Z_{1Ктр}$) и со стороны выхода ($Z_{2Хтр}$ и $Z_{2Ктр}$) в режимах ХХ и КЗ соответственно;
- 2) характеристических параметров трансформатора.

Для оценки степени адекватности полученных математических моделей в форме эквивалентных ЧП трансформатора ФПМ и всего ФПМ проводятся следующие *количественные проверки* с использованием результатов измерений, выполненных при подключении на выходе ФПМ нагрузок $R_{н4}$ и $R_{н5}$ (в рабочем режиме):

- первая проверка: по модулю и аргументу входного сопротивления трансформатора;
- вторая проверка: по модулю и фазе входного тока трансформатора;
- третья проверка: по модулю и фазе входного напряжения трансформатора;
- четвертая проверка: по модулю и фазе входного тока ФПМ;
- пятая проверка: по модулю и фазе входного напряжения ФПМ.

В данных проверках определяются значения перечисленных величин путем их измерений и расчетным путем через найденные A -параметры эквивалентного ЧП. Расхождение рассчитанных значений с измеренными будем оценивать величиной относительной погрешности, выраженной в процентах. Измеренные значения A -параметров по аналогии с [5] можно считать приемлемыми при расчете регулировочных характеристик ТРЦ и для использования представленной методики в учебном процессе в исследованиях теоретического и экспериментального характера, если значения относительной погрешности по результатам количественных проверок не будут превышать 1 %.

При проверках по модулю используется классическая формула относительной погреш-

ности. Так, при проверке по модулю входного сопротивления трансформатора относительная погрешность вычисляется по формуле

$$\delta_{|Z|} = \frac{|Z_p| - |Z_{и}|}{|Z_{и}|} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где $Z_{и}$, Z_p — измеренное и расчетное значения модуля входного сопротивления.

При проверках по модулям входных токов и напряжений относительные погрешности рассчитываются аналогично.

Затруднение возникает при использовании классической формулы относительной погрешности в проверках по аргументу входного сопротивления и по фазам входных токов и напряжений. Эти величины могут принимать положительные и отрицательные значения, близкие к нулю или равные нулю, а также иметь близкие по модулю значения, но отличаться знаком. В этом случае классическая формула относительной погрешности может давать аномально большие значения погрешности или бесконечно большое значение в случае деления на ноль. Рассмотрим несколько примеров.

Пример 1. Пусть расчетное и измеренное значения фазы равны $\varphi_p = 2^\circ$ и $\varphi_{и} = -2^\circ$. Тогда в соответствии с формулами абсолютной и относительной погрешности получаем:

$$\Delta_\varphi = \varphi_p - \varphi_{и} = 2^\circ - (-2^\circ) = 4^\circ;$$

$$\delta_\varphi = \frac{\varphi_p - \varphi_{и}}{\varphi_{и}} \cdot 100 \% = \frac{2 - (-2)}{-2} \cdot 100 \% = -200 \%.$$

Пример 2. $\varphi_p = -2^\circ$ и $\varphi_{и} = 1^\circ$. Получаем:

$$\Delta_\varphi = \varphi_p - \varphi_{и} = -2^\circ - 1^\circ = -3^\circ;$$

$$\delta_\varphi = \frac{(-2) - 1}{1} \cdot 100 \% = -300 \%.$$

Пример 3. $\varphi_p = 2^\circ$ и $\varphi_{и} = 0^\circ$. Получаем:

$$\Delta_\varphi = \varphi_p - \varphi_{и} = 2^\circ - 0^\circ = 2^\circ;$$

$$\delta_\varphi = \frac{2 - 0}{0} \cdot 100 \% = \infty.$$

Пример 4. $\varphi_p = 120^\circ$ и $\varphi_{и} = -60^\circ$. Получаем:

$$\Delta_\varphi = \varphi_p - \varphi_{и} = 120^\circ - (-60^\circ) = 180^\circ;$$

$$\delta_\varphi = \frac{120 - (-60)}{-60} \cdot 100 \% = -300 \%$$

Пример 5. $\varphi_p = 90^\circ$ и $\varphi_n = -90^\circ$. Получаем:

$$\Delta_\varphi = \varphi_p - \varphi_n = 90^\circ - (-90^\circ) = 180^\circ;$$

$$\delta_\varphi = \frac{90 - (-90)}{-90} \cdot 100 \% = -200 \%$$

В данных примерах относительная погрешность измерения фазы имеет одинаково большие аномальные значения при абсолютной погрешности как в единицы, так и в сотни градусов. В то же время известно, что малое, до $\sim 10^\circ$, изменение фазы несущественно изменяет комплексную величину. Тогда как изменение на десятки градусов равносильно принципиальному изменению ее характера, вплоть до физической нереализуемости, когда речь идет о комплексном сопротивлении.

Рассмотрим еще два примера.

Пример 6. Пусть абсолютная погрешность аргумента комплексного сопротивления рав-

на 1° ($Z_n = |Z|e^{j60^\circ}$, $Z_p = |Z|e^{j61^\circ}$). Тогда относительная погрешность, согласно формуле (3), составит около 1,7%.

Пример 7. Пусть абсолютная погрешность аргумента комплексного сопротивления также равна 1° , но $Z_n = |Z|e^{j1^\circ}$, а $Z_p = |Z|e^{j2^\circ}$. В этом случае относительная погрешность аргумента составит уже 100%.

Данные примеры показывают, что при одной и той же абсолютной погрешности аргумента значения относительной погрешности могут кардинально различаться, не давая, так же как и в предыдущих примерах, адекватного представления о степени несоответствия измеренного и расчетного значений аргумента.

На рис. 3 и 4 представлены графики зависимостей $\delta_\varphi(\varphi_p)|_{\varphi_n = \text{const}}$ при фиксированных значениях φ_n , равных $-2^\circ, 1^\circ, 0^\circ, -60^\circ, 60^\circ$, построенные в области малых значений φ_p (от -10° до 10°) и в области больших значений φ_p (от -180° до 180°) соответственно. Данные зависимости рассчитаны для классической формулы относительной погрешности, то есть

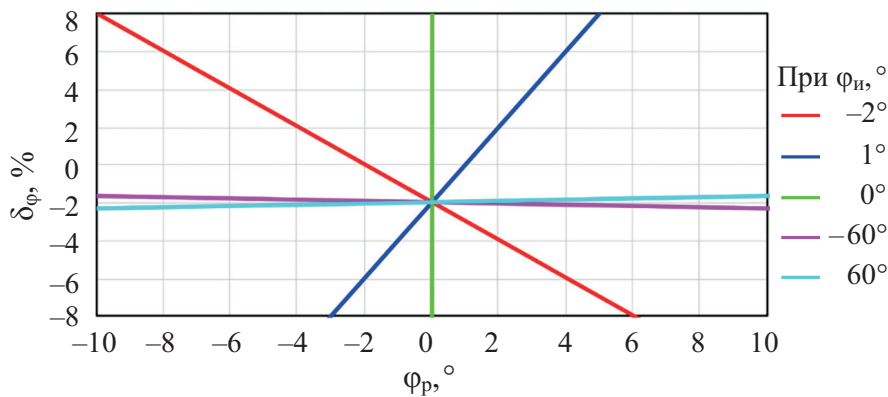


Рис. 3. Графики зависимости δ_φ от φ_p при нормировании к φ_n (в области малых φ_p)

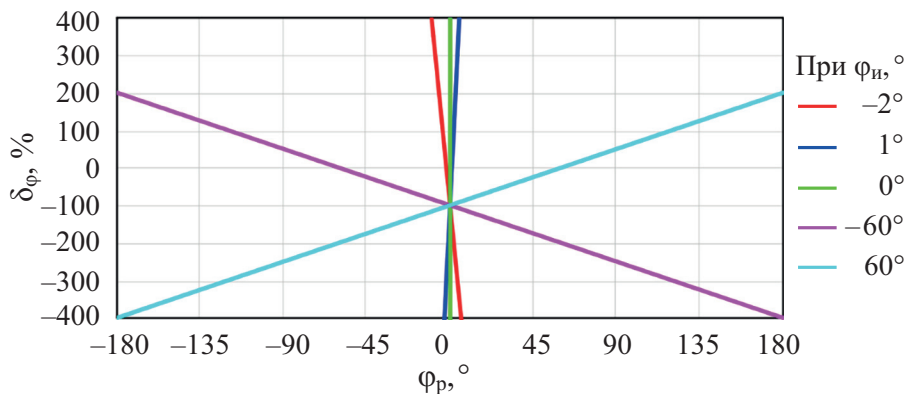


Рис. 4. Графики зависимости δ_φ от φ_p при нормировании к φ_n (в области больших φ_p)

когда абсолютная погрешность нормируется к измеренному значению фазы. Как видно из этих графиков, значение и характер изменения δ_φ (наклон графиков) существенно зависят от значения φ_n , и особенно ярко это выражено при малых значениях φ_n .

Для более адекватного отражения различия двух углов и придания смысловой нагрузки величине относительной погрешности предлагается абсолютную погрешность нормировать не к измеренному значению, а к значению 180° — максимально и минимально возможному значению разности фаз периодической функции. В этом случае восстанавливается прямая однозначная связь между величинами абсолютной и относительной погрешности и устраняется неопределенность вида «деление на ноль». Тогда формула расчета относительной погрешности по фазе/аргументу примет вид:

$$\delta_\varphi = \frac{\varphi_p - \varphi_n}{180^\circ} \cdot 100 \% \quad (4)$$

Для рассмотренных примеров 1–7 относительная погрешность, рассчитанная по формуле (4), составит соответственно: 0,022; –0,017; 0,011; 100; 100; 0,0056; 0,0056 %. Эти значения представляются как более адекватно отражающие различия двух углов.

На рис. 5 и 6 представлены графики зависимостей $\delta_\varphi(\varphi_p)|_{\varphi_n = \text{const}}$ при тех же фиксированных значениях φ_n , построенные в области малых значений φ_p (от -10° до 10°) и в области больших значений φ_p (от -180° до 180°) соответственно. Данные зависимости рассчитаны в соответствии с формулой (4). Как видно из этих графиков, все линии имеют одинаковый наклон. Кроме того, при малых значениях φ_n линии располагаются вплотную друг к другу, чем обеспечивается малое изменение значения относительной погрешности при малом изменении значения φ_n , что логично.

С учетом изложенного в данной работе при проведении проверок будет применяться формула (4).

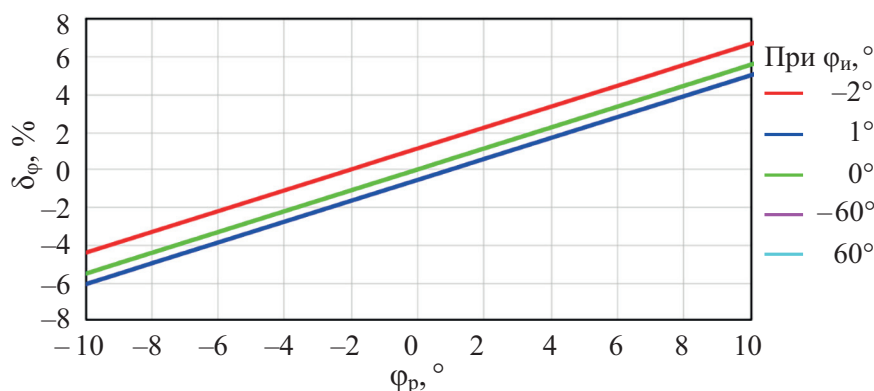


Рис. 5. Графики зависимости δ_φ от φ_p при нормировании к 180° (в области малых φ_p)

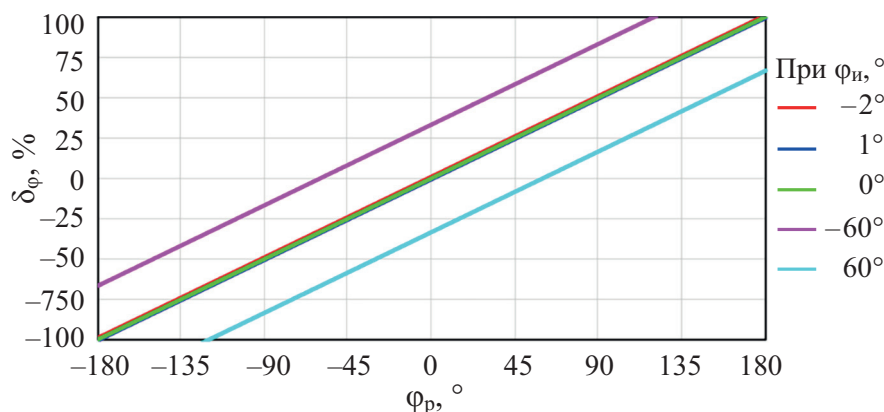


Рис. 6. Графики зависимости δ_φ от φ_p при нормировании к 180° (в области больших φ_p)

Практическая реализация методики измерения A -параметров эквивалентного четырехполюсника ФПМ

Ниже представлен пример практической реализации описанной выше методики и рассмотрены аспекты, знание и учет которых позволят избежать ошибок и получить результаты, приемлемые для использования в расчетах регулировочных характеристик тональных рельсовых цепей.

Реализация данной методики была выполнена путем измерения A -параметров ЧП ФПМ 8, 9, 11, настроенного на частоту несущей $f_n = 480$ Гц сигнала ТРЦ (вход ФПМ — контакты 11-71, выход ФПМ — контакты 12-61, установлены перемычки между контактами 42-23-22-21), и проверки адекватности полученных математических моделей трансформатора и ФПМ в целом. Рабочая точка ФПМ задавалась значением входного напряжения ФПМ (контакты 11-71), равным 3,3 В.

Для проведения измерений использовались следующие приборы и оборудование:

- программируемый лабораторный источник питания постоянного и переменного тока АК ИП-1203/3 с максимальной выходной мощностью 3000 Вт;
- измерительный комплекс, включающий многоканальный контроллер сбора данных ZETLAB ZET 038, высокочастотные высоковольтные дифференциальные пробники Testec-SI 9002, токовые пробники Tektronix TCR312A с усилителями ТСРА300;
- измеритель иммитанса E7-20;
- пять сопротивлений нагрузки ФПМ с номинальными значениями ($R_{н1} = 100$ Ом, $R_{н2} = 330$ Ом, $R_{н3} = 680$ Ом, $R_{н4} = 250$ Ом, $R_{н5} = 500$ Ом) с номинальной рассеиваемой мощностью 100 Вт. Первые три сопротивления используются при измерении A -параметров ЧП трансформатора ФПМ, последние два — при проверке правильности измерений и расчетов.

При сборке схем измерений и выполнении самих измерений следует учесть ряд важных аспектов:

1. Для уменьшения влияния переходных сопротивлений между монтажными проводами, контактами ФПМ и сопротивлениями $R_{нi}$, а также сопротивлений самих монтажных про-

водов необходимо обеспечить надежный контакт монтажных проводов (например, пайкой), а сами монтажные провода должны иметь минимальную длину и сечение не менее 1,5 мм².

2. Перед измерениями необходимо убедиться (например, с помощью осциллографа или, что лучше, анализатора спектра) в синусоидальности полезного сигнала (и напряжений, и токов) и в отсутствии сопоставимых с его уровнем помех в каждом измерительном тракте.

3. Измерительная система должна быть оттарирована для компенсации большей части систематической погрешности по каждому измерительному каналу — от входа измеряемой физической величины до выхода измеренного значения. В рассматриваемом случае тарирование выполнено с помощью прецизионного мультикалибратора FLUKE 5520A по семи измеряемым физическим величинам (два напряжения, два тока, три разности фаз). Поправка внесена в результаты измерений напряжений и токов, погрешность измерения разности фаз игнорировалась за ничтожной малостью, менее 0,3°.

4. В процессе измерений следует периодически контролировать частоту сигнала и при необходимости корректировать, не допуская отклонения более 1 Гц.

5. Все измерения выполняются в одной РТ ФПМ (и соответствующей ей РТ трансформатора ФПМ). Данное значение входного напряжения трансформатора необходимо обеспечивать неизменным, контролируя перед каждым измерением.

6. При использовании вольтметра перед измерениями необходимо проверить влияние полярности подключения измерительных выводов на его показания, измерив напряжение РТ ФПМ при прямом и при обратном подключении выводов вольтметра, чтобы убедиться в симметричности измерительного тракта.

Реализация этапа 1

1. Для определения РТ трансформатора, соответствующей заданной РТ ФПМ при нагрузке $R_{н2}$, были установлены перемычки на контактах 21-22-23-42 ФПМ, нагрузка $R_{н2}$ подключалась к выходным контактам 12-61 ФПМ. В общем же случае схема включения ФПМ (сочетание установленных перемычек для настройки в резонанс и используемых выходных

контактов) определяется его включением в схеме конкретной исследуемой ТРЦ.

2. На выходе лабораторного источника питания было задано гармоническое колебание с частотой 480 Гц.

3. В фиксированной РТ ФПМ (в рассматриваемом примере — при напряжении 3,3 В на контактах 11-71 ФПМ) была определена соответствующая ей РТ трансформатора ФПМ путем измерения напряжения $U_{РТ.тр}$ на входе трансформатора (контакты 11-42 ФПМ): $U_{РТ.тр} = 15,00$ В.

Реализация этапа 2

На данном этапе, помимо измерения $Z_{1тр.и.1}$, $Z_{1тр.и.2}$ и $Z_{1тр.и.3}$, необходимых для реализации ме-

тода трех известных нагрузок, для выполнения проверок правильности измеренных значений А-параметров ЧП трансформатора также были выполнены аналогичные измерения при подключении нагрузок $R_{и4}$, $R_{и5}$ и определены значения $Z_{1тр.и.4}$, $Z_{1тр.и.5}$.

Для проведения измерений была собрана схема, представленная на рис. 7.

К выходу трансформатора (контакты 12-61 ФПМ) поочередно подключались сопротивления $R_{и1} — R_{и5}$. При этом на входе трансформатора (контакты 11-42 ФПМ) каждый раз выставлялось напряжение $U_{РТ.тр} = 15,00$ В. При каждом подключенном сопротивлении $R_{иi}$ измерительным комплексом были измерены

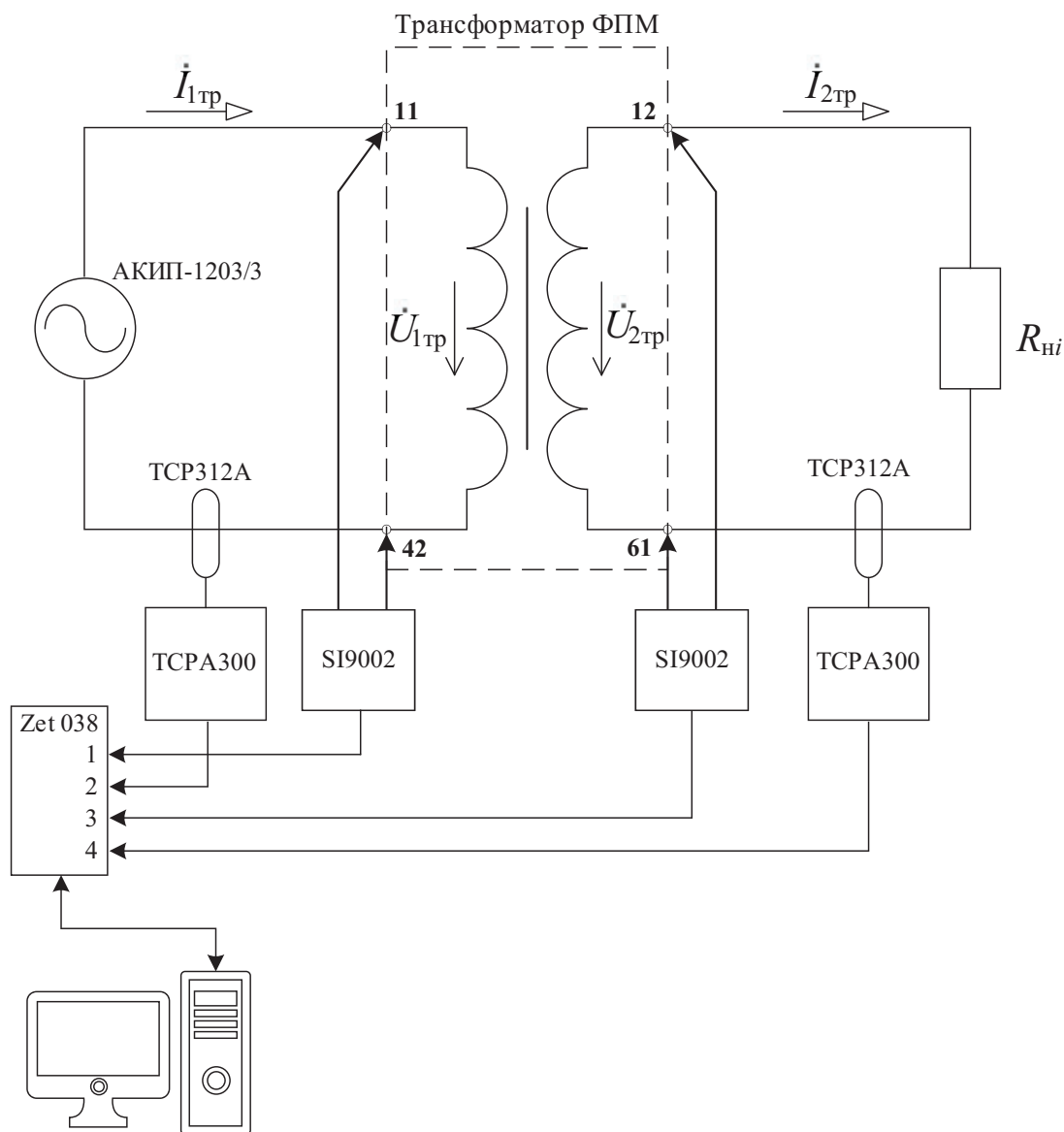


Рис. 7. Схема для измерения входного сопротивления ЧП трансформатора ФПМ (для рассматриваемого примера)

модули и фазы входного напряжения (контакты 11-42) и выходных (контакты 12-61) тока и напряжения относительно входного тока.

Далее по полученным данным измерений были рассчитаны модули $|Z_{1тр.и.і}|$ и определены аргументы $\varphi_{Z_{1тр.р.і}}$ входного сопротивления ЧП трансформатора. Результаты представлены в табл. 1. Здесь и далее приводимые результаты расчетов получены по результатам измерений, представленных с точностью до 15 значащих цифр, и округлены в таблицах до четырех значащих цифр.

ТАБЛИЦА 1. Модули и аргументы входного сопротивления трансформатора при соответствующих нагрузках

При нагрузке $R_{нi}$, Ом	$ Z_{1тр.и.і} $, Ом	$\varphi_{Z_{1тр.р.і}}$, °
$R_{н1} = 100$	63,37	59,34
$R_{н4} = 250$	71,44	74,83
$R_{н2} = 330$	72,30	77,63
$R_{н5} = 500$	73,05	80,72
$R_{н3} = 680$	73,36	82,37

Затем был выполнен расчет A -параметров ЧП трансформатора и получены следующие их значения (для рассматриваемого примера):

$$A_{тр} = 1,150 \cdot e^{-j0,44^\circ}; \quad B_{тр} = 2,649 \cdot e^{j47,68^\circ};$$

$$C_{тр} = 0,01556 \cdot e^{-j87,41^\circ}; \quad D_{тр} = 0,8976 \cdot e^{-j1,03^\circ}.$$

Реализация этапа 3

Емкость $C_{кон}$ параллельно соединенных конденсаторов $C6$, $C7$ и $C8$ (перемычки между контактами 23-22-21 ФПМ) была измерена измерителем иммитанса E7-20 и в рассматриваемом примере составила $C_{кон} = 4,472$ мкФ.

Матрица коэффициентов ЧП конденсаторов ФПМ, в соответствии с измеренным значением $C_{кон}$ и выражением (1), приняла вид

$$N_C = \begin{bmatrix} 1 & 74,14 \cdot e^{-j90^\circ} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Реализация этапа 4

По выражению (2) был выполнен расчет A -параметров ЧП ФПМ, в соответствии с которым матрица $N_{ФПМ}$ приняла вид

$$N_{ФПМ} = \begin{bmatrix} A_{ФПМ} & B_{ФПМ} \\ C_{ФПМ} & D_{ФПМ} \end{bmatrix} = N_C N_{тр} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0,06095 \cdot e^{-j92,92^\circ} & 64,58 \cdot e^{-j89,48^\circ} \\ 0,01556 \cdot e^{-j87,41^\circ} & 0,8976 \cdot e^{-j1,03^\circ} \end{bmatrix}.$$

Важным аспектом практической реализации рассматриваемой методики является корректное выполнение качественных и количественных проверок, направленных на удостоверение правильности и точности выполненных измерений и полученных результатов.

Реализация этапа 5

На данном этапе в рамках проведения первичных качественных проверок расчетами получены следующие значения входных сопротивлений трансформатора:

$$Z_{1Хтр} = \frac{A_{тр}}{C_{тр}} = 73,87 \cdot e^{j86,98^\circ} \text{ Ом};$$

$$Z_{2Хтр} = \frac{D_{тр}}{C_{тр}} = 57,67 \cdot e^{j86,38^\circ} \text{ Ом};$$

$$Z_{1Ктр} = \frac{B_{тр}}{D_{тр}} = 2,952 \cdot e^{j48,71^\circ} \text{ Ом};$$

$$Z_{2Ктр} = \frac{B_{тр}}{A_{тр}} = 2,304 \cdot e^{j48,11^\circ} \text{ Ом}.$$

Как видно, аргументы этих сопротивлений положительны, то есть сопротивления, как и должно быть для трансформатора, имеют индуктивный характер. При холостом ходе аргументы сопротивлений близки к 90° . При переходе от режима ХХ к режиму КЗ значения модулей и аргументов входных сопротивлений уменьшаются. Такой характер значений и их изменений полностью согласуется с теорией рабочего процесса трансформатора.

Значения характеристических параметров трансформатора, рассчитанные через его измеренные A -параметры, составили:

- характеристическое сопротивление со стороны входа

$$Z_{1Стр} = \sqrt{\frac{A_{тр} B_{тр}}{C_{тр} D_{тр}}} = 14,77 \cdot e^{j67,84^\circ} \text{ Ом};$$

- характеристическое сопротивление со стороны выхода

$$Z_{2C_{\text{тр}}} = \sqrt{\frac{D_{\text{тр}} B_{\text{тр}}}{C_{\text{тр}} A_{\text{тр}}}} = 11,53 \cdot e^{j67,25^\circ} \text{ Ом};$$

- характеристическая постоянная передачи

$$g_{C_{\text{тр}}} = \ln\left(\sqrt{A_{\text{тр}} D_{\text{тр}}} + \sqrt{B_{\text{тр}} C_{\text{тр}}}\right) = 0,1903 - j0,06783;$$

- собственное затухание (ослабление)

$$a_{\text{тр}} = \text{Re}(g_{C_{\text{тр}}}) = 0,1903 \text{ Нп} \cdot 8,686 = 1,655 \text{ дБ};$$

- собственная фазовая постоянная

$$b_{\text{тр}} = \text{Im}(g_{C_{\text{тр}}}) = -0,06783 \text{ рад} = -3,886^\circ.$$

Активно-индуктивный характер полученных значений характеристических сопротивлений свойственен цепи, содержащей катушки индуктивности с потерями, и паразитная емкость (межвитковая, межобмоточная, межслойная) на рассматриваемой, относительно невысокой частоте 480 Гц еще не проявляется ввиду пренебрежимо малой величины. Положительный знак собственного затухания характерен для пассивных цепей, а величина 1–3 дБ — для цепей с небольшими потерями, используемых для передачи сигналов. Собственная же фазовая постоянная, отрицательная по значению и определяющая отставание выходного сигнала (и напряжения, и тока) от входного при согласованном включении ЧП, присуща активно-индуктивным цепям.

Проведенные качественные проверки позволяют сделать вывод об отсутствии грубых ошибок в выполненных измерениях и перейти к дальнейшим **количественным проверкам** адекватности математических моделей эквивалентных ЧП трансформатора ФПМ и ФПМ в целом.

Для **первой проверки** (по модулю и аргументу входного сопротивления трансформатора) сначала расчетным путем через измеренные значения A -параметров ЧП трансформатора были определены значения его входного сопротивления при подключенных на его выходе нагрузках $R_{н4}$ и $R_{н5}$ в соответствии с выражением

$$Z_{1\text{тр},p,i} = \frac{A_{\text{тр}} R_{нi} + B_{\text{тр}}}{C_{\text{тр}} R_{нi} + D_{\text{тр}}} \quad (i = 4, 5). \quad (5)$$

В рассматриваемом примере расчетами по выражению (5) получены следующие значения сопротивлений:

$$Z_{1\text{тр},p,4} = 71,44 \cdot e^{j74,58^\circ} \text{ Ом};$$

$$Z_{1\text{тр},p,5} = 73,09 \cdot e^{j80,65^\circ} \text{ Ом}.$$

Затем была определена относительная погрешность (в процентах) модуля и аргумента входного сопротивления трансформатора по выражениям

$$\delta_{|Z_{1\text{тр},i}|} = \frac{|Z_{1\text{тр},p,i}| - |Z_{1\text{тр},и,i}|}{|Z_{1\text{тр},и,i}|} \cdot 100 \% \quad (i = 4, 5); \quad (6)$$

$$\delta_{\varphi_{Z_{1\text{тр},i}}} = \frac{\varphi_{Z_{1\text{тр},p,i}} - \varphi_{Z_{1\text{тр},и,i}}}{180} \cdot 100 \% \quad (i = 4, 5). \quad (7)$$

При этом использованы неокругленные значения модулей и аргументов величин $Z_{1\text{тр},и,i}$, округленные значения которых представлены в табл. 1.

В рассматриваемом примере результаты расчетов по выражениям (6), (7) оказались следующими:

$$\delta_{|Z_{1\text{тр},4}|} = 0,001232 \% ; \quad \delta_{\varphi_{Z_{1\text{тр},4}}} = 0,002426 \% ;$$

$$\delta_{|Z_{1\text{тр},5}|} = 0,0001429 \% ; \quad \delta_{\varphi_{Z_{1\text{тр},5}}} = 0,0003145 \% .$$

Как видно, относительная погрешность рассчитанных и измеренных значений модуля и аргумента входного сопротивления трансформатора не превышает по абсолютной величине 1 %.

Для **второй проверки** (по модулю и фазе входного тока трансформатора) сначала через измеренные значения коэффициентов $C_{\text{тр}}$ и $D_{\text{тр}}$ ЧП трансформатора были определены расчетные значения его входного тока при подключенных на его выходе нагрузках $R_{н4}$ и $R_{н5}$ в соответствии с выражением

$$I_{1\text{тр},p,i} = C_{\text{тр}} U_{R_{нi}} + D_{\text{тр}} I_{R_{нi}} \quad (i = 4, 5). \quad (8)$$

Далее была рассчитана относительная погрешность (в процентах) модуля и фазы входного тока трансформатора аналогично выражениям (6) и (7).

В рассматриваемом примере выполненные согласно (8) и аналогично (6) и (7) расчеты показали:

$$\delta_{|I_{1тр.4}|} = -0,2685 \% ; \delta_{\varphi_{I_{1тр.4}}} = -0,0003943 \% ;$$

$$\delta_{|I_{1тр.5}|} = -0,2648 \% ; \delta_{\varphi_{I_{1тр.5}}} = -0,0002885 \% .$$

Результаты второй проверки показывают, что относительная погрешность модуля и фазы входного тока трансформатора не превышает по абсолютной величине 1 %.

Для **третьей проверки** (по модулю и фазе входного напряжения трансформатора) сначала через измеренные значения коэффициентов $A_{тр}$ и $B_{тр}$ ЧП трансформатора (см. этап 2) были определены расчетные значения его входного напряжения при подключенных на его выходе нагрузках $R_{н4}$ и $R_{н5}$ в соответствии с выражением

$$U_{1тр.p.i} = A_{тр}U_{R_{ни}} + B_{тр}I_{R_{ни}} \quad (i = 4, 5), \quad (9)$$

где значения $U_{R_{ни}}$ и $I_{R_{ни}}$ были измерены на этапе 2.

Далее была рассчитана относительная погрешность (в процентах) модуля и фазы входного напряжения трансформатора аналогично выражениям (6) и (7).

В рассматриваемом примере, выполнив расчеты, получили:

$$\delta_{|U_{1тр.4}|} = -0,2710 \% ; \delta_{\varphi_{U_{1тр.4}}} = -0,0003525 \% ;$$

$$\delta_{|U_{1тр.5}|} = -0,2651 \% ; \delta_{\varphi_{U_{1тр.5}}} = -0,0002831 \% .$$

Результаты третьей проверки показывают, что относительная погрешность модуля и фазы входного напряжения трансформатора не превышает по абсолютной величине 1 %.

Для выполнения четвертой и пятой проверок (по модулю и фазе входного тока и по модулю и фазе входного напряжения ФПМ) была собрана схема, представленная на рис. 8. К выходу ФПМ поочередно подключались нагрузки $R_{н4}$ и $R_{н5}$, при каждой нагрузке на входе ФПМ (контакты 11-71) устанавливалось напряжение, равное заданной РТ ФПМ (в рассматриваемом примере 3,3 В) и измерялись входные и выходные токи и напряжения ФПМ: $I_{1ФПМ.и.i}$, $U_{1ФПМ.и.i}$, $I_{2ФПМ.и.i}$, $U_{2ФПМ.и.i}$ ($i = 4, 5$).

Для **четвертой проверки** (по модулю и фазе входного тока ФПМ) через измеренные значения

коэффициентов $C_{ФПМ}$ и $D_{ФПМ}$ ЧП ФПМ (см. этап 4) были найдены расчетные значения его входного тока при подключенных на его выходе нагрузках $R_{н4}$ и $R_{н5}$ в соответствии с выражением

$$I_{1ФПМ.p.i} = C_{ФПМ}U_{2ФПМ.и.i} + D_{ФПМ}I_{2ФПМ.и.i} \quad (10) \\ (i = 4, 5).$$

Далее аналогично предыдущим проверкам была рассчитана относительная погрешность (в процентах) модуля и фазы входного тока ФПМ.

В рассматриваемом примере, выполнив расчеты в соответствии с (10) и аналогично (6) и (7), получили следующие результаты:

$$\delta_{|I_{1ФПМ.4}|} = -0,2685 \% ;$$

$$\delta_{\varphi_{I_{1ФПМ.4}}} = -0,0003943 \% ;$$

$$\delta_{|I_{1ФПМ.5}|} = -0,2648 \% ;$$

$$\delta_{\varphi_{I_{1ФПМ.5}}} = -0,0002885 \% .$$

Таким образом, относительная погрешность модуля и фазы входного тока ФПМ не превышает по абсолютной величине 1 %.

Для **пятой проверки** (по модулю и фазе входного напряжения ФПМ) через измеренные значения коэффициентов $A_{ФПМ}$ и $B_{ФПМ}$ (см. этап 4) были определены расчетные значения его входного напряжения при подключенных на его выходе нагрузках $R_{н4}$ и $R_{н5}$ в соответствии с выражением

$$U_{1ФПМ.p.i} = A_{ФПМ}U_{2ФПМ.и.i} + B_{ФПМ}I_{2ФПМ.и.i} \quad (11) \\ (i = 4, 5).$$

Далее аналогично предыдущим проверкам была рассчитана относительная погрешность (в процентах) модуля и фазы входного напряжения ФПМ.

В рассматриваемом примере, выполнив расчеты в соответствии с (11) и аналогично (6) и (7), получили следующие результаты:

$$\delta_{|U_{1ФПМ.4}|} = 0,2969 \% ;$$

$$\delta_{\varphi_{U_{1ФПМ.4}}} = 0,0004458 \% ;$$

$$\delta_{|U_{1ФПМ.5}|} = 0,2715 \% ;$$

$$\delta_{\varphi_{U_{1ФПМ.5}}} = 0,0002982 \% .$$

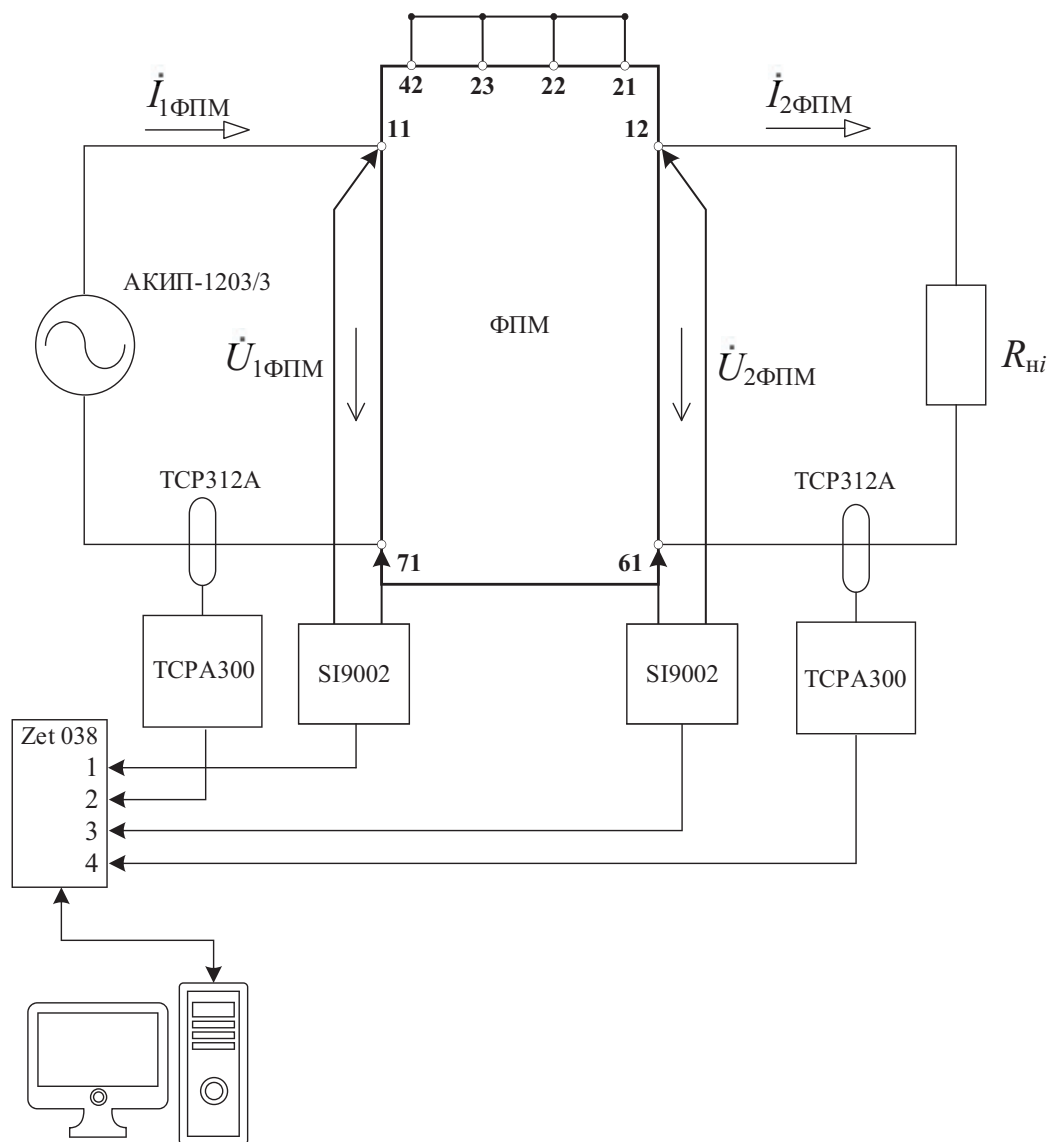


Рис. 8. Схема для измерения входного и выходного тока и напряжения ФПМ (для рассматриваемого примера)

Результаты данной проверки показывают, что относительная погрешность модуля и фазы входного напряжения ФПМ не превышает по абсолютной величине 1 %.

В итоге по результатам всех выполненных проверок относительная погрешность модуля и аргумента входного сопротивления трансформатора, входных токов и напряжений трансформатора и ФПМ не превысила 1 %, что сопоставимо со значениями погрешностей по входному току, приведенными в [5]. Это позволяет сделать вывод, что значения A -параметров эквивалентного ЧП ФПМ определены с приемлемой для использования в указанных ранее целях точностью.

На этом рассмотрение практической реализации методики измерения A -параметров эквивалентного четырехполюсника путевого фильтра тональной рельсовой цепи можно считать законченным. Заметим, что описание измерений представлено одним элементарным набором измерений — при одном (из шести необходимых) коэффициенте трансформации, на одной из девяти несущих частот и на одной из 17 (в зависимости от требуемой минимальной точности моделирования) рабочей точке входного напряжения трансформатора.

Для исследования зависимости точности моделирования трансформатора ФПМ от количества рассматриваемых рабочих точек по

напряжению ниже приводятся результаты измерений во всем диапазоне рабочих напряжений только для одного коэффициента трансформации и только на одной частоте. Результаты представлены в наборе из четырех таблиц и трех графиков. Необходимый для моделирования ФПМ полный объем данных составит $6 \times 9 = 54$ таких набора таблиц и графиков погрешности.

С применением рассмотренной методики и в соответствии со схемой измерений на рис. 3 при каждой из пяти подключаемых нагрузок $R_{нi}$ были выполнены измерения модулей и фаз входных и выходных токов и напряжений трансформатора ФПМ ($|U_{1тр}|$,

$\varphi_{U_{1тр}}$, $|I_{1тр}|$ и $\varphi_{I_{1тр}}$) на частоте 480 Гц в РТ трансформатора 1, 5, 10, 15 В и так далее, до 80 В, с шагом 5 В. Результаты измерений представлены в табл. 2. Здесь $U_{р.т.р}$ (В) в первой колонке — номинальное значение напряжения, оно идентифицирует РТ трансформатора, в которой проводились соответствующие измерения.

При измерениях фаз за нулевую фазу была принята фаза входного тока, что позволило без дополнительных вычислений определять аргумент входного сопротивления трансформатора (в этом случае он равен фазе входного напряжения $\varphi_{U_{1тр}}$).

ТАБЛИЦА 2. Результаты измерений токов и напряжений трансформатора ФПМ на частоте 480 Гц

$U_{р.т.р}$, В	$R_{нi}$, Ом	$ U_{1тр} $, В	$\varphi_{U_{1тр}}$, °	$ I_{1тр} $, А	$\varphi_{I_{1тр}}$, °	$ U_{2тр} $, В	$\varphi_{U_{2тр}}$, °	$ I_{2тр} $, А	$\varphi_{I_{2тр}}$, °
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	100	1,001	61,59	0,01679	0	0,8548	61,07	0,008398	60,73
1	250	1,001	75,94	0,01517	0	0,8629	76,00	0,003379	75,66
1	330	1,001	78,49	0,01502	0	0,8642	78,65	0,002574	78,31
1	500	1,001	81,28	0,01489	0	0,8655	81,54	0,001708	81,20
1	680	1,001	82,78	0,01484	0	0,8662	83,09	0,001254	82,75
5	100	5,006	60,14	0,07962	0	4,273	59,59	0,04192	59,23
5	250	5,005	75,25	0,07109	0	4,313	75,28	0,01687	74,93
5	330	5,005	77,96	0,07028	0	4,319	78,09	0,01287	77,74
5	500	5,005	80,95	0,06961	0	4,326	81,18	0,008561	80,83
5	680	5,005	82,54	0,06934	0	4,330	82,82	0,006288	82,47
10	100	10,01	59,63	0,1566	0	8,548	59,06	0,08388	58,70
10	250	10,01	74,98	0,1393	0	8,629	75,01	0,03375	74,65
10	330	10,01	77,75	0,1377	0	8,642	77,87	0,02572	77,52
10	500	10,01	80,81	0,1363	0	8,655	81,02	0,01709	80,67
10	680	10,01	82,43	0,1357	0	8,662	82,71	0,01256	82,36
15	100	15,01	59,34	0,2327	0	12,81	58,77	0,1257	58,40
15	250	15,01	74,83	0,2064	0	12,94	74,85	0,05055	74,49
15	330	15,01	77,63	0,2039	0	12,95	77,74	0,03856	77,39
15	500	15,01	80,72	0,2018	0	12,98	80,93	0,02562	80,58
15	680	15,01	82,37	0,2010	0	12,99	82,63	0,01881	82,28
20	100	20,01	59,15	0,3084	0	17,09	58,58	0,1677	58,22
20	250	20,01	74,75	0,2731	0	17,25	74,77	0,06738	74,41
20	330	20,01	77,57	0,2698	0	17,28	77,68	0,05141	77,32

Продолжение табл. 2

$U_{PT,TP}, B$	$R_{HI}, Ом$	$ U_{1TP} , B$	$\varphi_{U_{1TP}}, ^\circ$	$ I_{1TP} , A$	$\varphi_{I_{1TP}}, ^\circ$	$ U_{2TP} , B$	$\varphi_{U_{2TP}}, ^\circ$	$ I_{2TP} , A$	$\varphi_{I_{2TP}}, ^\circ$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	500	20,01	80,68	0,2670	0	17,31	80,89	0,03417	80,53
20	680	20,01	82,34	0,2658	0	17,32	82,60	0,02508	82,25
25	100	25,00	59,01	0,3835	0	21,36	58,43	0,2097	58,07
25	250	25,00	74,69	0,3392	0	21,56	74,70	0,08418	74,34
25	330	25,01	77,52	0,3350	0	21,60	77,62	0,06426	77,26
25	500	25,01	80,65	0,3315	0	21,63	80,86	0,04269	80,50
25	680	25,01	82,32	0,3301	0	21,65	82,58	0,03136	82,23
30	100	30,00	58,91	0,4584	0	25,63	58,33	0,2516	57,96
30	250	30,00	74,66	0,4050	0	25,88	74,67	0,1010	74,31
30	330	30,00	77,49	0,4001	0	25,91	77,59	0,07711	77,23
30	500	30,00	80,64	0,3959	0	25,96	80,84	0,05123	80,49
30	680	30,00	82,32	0,3942	0	25,98	82,58	0,03763	82,22
35	100	35,01	58,83	0,5333	0	29,92	58,26	0,2937	57,89
35	250	35,01	74,65	0,4709	0	30,20	74,66	0,1176	74,30
35	330	35,01	77,48	0,4651	0	30,24	77,58	0,08999	77,22
35	500	35,01	80,64	0,4601	0	30,29	80,84	0,05979	80,48
35	680	35,01	82,32	0,4582	0	30,32	82,58	0,04390	82,23
40	100	40,01	58,78	0,6080	0	34,19	58,20	0,3357	57,84
40	250	40,01	74,65	0,5366	0	34,52	74,66	0,1344	74,30
40	330	40,01	77,48	0,5300	0	34,57	77,58	0,1029	77,22
40	500	40,01	80,65	0,5243	0	34,62	80,85	0,06834	80,49
40	680	40,01	82,34	0,5221	0	34,65	82,59	0,05018	82,24
45	100	45,00	58,75	0,6827	0	38,47	58,17	0,3776	57,80
45	250	45,00	74,66	0,6021	0	38,83	74,67	0,1510	74,31
45	330	45,00	77,48	0,5948	0	38,88	77,58	0,1157	77,22
45	500	45,00	80,66	0,5884	0	38,95	80,86	0,07688	80,50
45	680	45,00	82,36	0,5859	0	38,98	82,61	0,05647	82,26
50	100	50,00	58,73	0,7575	0	42,75	58,15	0,4195	57,78
50	250	50,01	74,69	0,6679	0	43,15	74,70	0,1675	74,34
50	330	50,01	77,49	0,6597	0	43,21	77,60	0,1286	77,23
50	500	50,01	80,68	0,6527	0	43,28	80,88	0,08546	80,52
50	680	50,01	82,38	0,6499	0	43,32	82,63	0,06276	82,28
55	100	55,00	58,72	0,8322	0	47,03	58,14	0,4615	57,77
55	250	55,01	74,72	0,7336	0	47,47	74,72	0,1841	74,36
55	330	55,01	77,51	0,7247	0	47,54	77,61	0,1415	77,25
55	500	55,01	80,70	0,7170	0	47,62	80,90	0,09402	80,54

Окончание табл. 2

$U_{PT,TP}, B$	R_{HT}, OM	$ U_{1TP} , B$	$\varphi_{U_{1TP}}, ^\circ$	$ I_{1TP} , A$	$\varphi_{I_{1TP}}, ^\circ$	$ U_{2TP} , B$	$\varphi_{U_{2TP}}, ^\circ$	$ I_{2TP} , A$	$\varphi_{I_{2TP}}, ^\circ$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
55	680	55,01	82,40	0,7139	0	47,66	82,66	0,06905	82,30
60	100	60,01	58,73	0,9069	0	51,31	58,15	0,5033	57,78
60	250	60,01	74,74	0,7994	0	51,80	74,75	0,2007	74,38
60	330	60,01	77,53	0,7897	0	51,87	77,63	0,1544	77,27
60	500	60,01	80,72	0,7814	0	51,95	80,92	0,1026	80,56
60	680	60,01	82,43	0,7780	0	52,00	82,68	0,07535	82,32
65	100	65,00	58,72	0,9819	0	55,60	58,14	0,5456	57,77
65	250	65,01	74,79	0,8653	0	56,13	74,79	0,2170	74,43
65	330	65,00	77,55	0,8550	0	56,20	77,65	0,1673	77,28
65	500	65,00	80,75	0,8459	0	56,29	80,95	0,1112	80,58
65	680	65,01	82,45	0,8422	0	56,34	82,71	0,08167	82,34
70	100	70,01	58,75	1,057	0	59,89	58,17	0,5872	57,78
70	250	70,01	74,83	0,9312	0	60,46	74,84	0,2333	74,45
70	330	70,01	77,57	0,9202	0	60,54	77,67	0,1802	77,29
70	500	70,01	80,77	0,9105	0	60,64	80,97	0,1198	80,59
70	680	70,01	82,48	0,9066	0	60,69	82,73	0,08799	82,35
75	100	75,01	58,79	1,132	0	64,19	58,21	0,6287	57,81
75	250	75,01	74,85	0,9976	0	64,79	74,86	0,2499	74,48
75	330	75,01	77,59	0,9858	0	64,88	77,69	0,1932	77,31
75	500	75,01	80,79	0,9754	0	64,99	80,99	0,1284	80,61
75	680	75,01	82,50	0,9712	0	65,04	82,76	0,09431	82,37
80	100	80,00	58,80	1,207	0	68,48	58,22	0,6708	57,83
80	250	80,00	74,90	1,064	0	69,12	74,91	0,2661	74,52
80	330	80,00	77,62	1,051	0	69,22	77,72	0,2061	77,33
80	500	80,00	80,82	1,040	0	69,33	81,02	0,1370	80,63
80	680	80,01	82,53	1,036	0	69,38	82,78	0,1007	82,40

Далее по результатам измерений были получены параметры эквивалентного ЧП трансформатора в перечисленных РТ, представленные в табл. 3–5. В таблицах приняты следующие обозначения:

- $|A|, \varphi_A, |B|, \varphi_B, |C|, \varphi_C, |D|, \varphi_D$ — модули и аргументы A -параметров трансформатора;
- $|Z_{1C}|, \varphi_{Z_{1C}}, |Z_{2C}|, \varphi_{Z_{2C}}$ — модули и аргументы соответственно входного и выходного характеристических сопротивлений трансформатора;
- a, b, n — собственное затухание (ослабление), характеристическая постоянная (коэффициент) фазы и характеристический коэффициент трансформации ($n = \sqrt{Z_{1C}/Z_{2C}}$);
- $|Z_{1X}|, \varphi_{Z_{1X}}, |Z_{1K}|, \varphi_{Z_{1K}}, |Z_{2X}|, \varphi_{Z_{2X}}, |Z_{2K}|, \varphi_{Z_{2K}}$ — модули и аргументы входных сопротивлений трансформатора со стороны входа (Z_{1X} и Z_{1K}) и со стороны выхода (Z_{2X} и Z_{2K}) в режимах ХХ и КЗ соответственно.

ТАБЛИЦА 3. А-параметры эквивалентного четырехполюсника трансформатора ФПМ на частоте 480 Гц, включенного согласно схеме на рис. 7

$U_{PT,TP}$, В	$ A $, –	φ_A , °	$ B $, Ом	φ_B , °	$ C $, См	φ_C , °	$ D $, –	φ_D , °
1	1,152	-0,54	2,707	55,40	0,01726	-87,46	0,9030	-0,83
5	1,149	-0,47	2,875	44,87	0,01610	-87,47	0,9005	-1,27
10	1,150	-0,49	2,751	50,03	0,01577	-87,47	0,8997	-0,97
15	1,150	-0,44	2,649	47,68	0,01556	-87,41	0,8976	-1,03
20	1,149	-0,48	2,791	49,93	0,01544	-87,47	0,9000	-0,97
25	1,149	-0,47	2,808	48,27	0,01533	-87,47	0,8995	-1,04
30	1,149	-0,46	2,770	47,66	0,01525	-87,48	0,8988	-1,04
35	1,150	-0,44	2,697	48,34	0,01519	-87,49	0,8979	-0,99
40	1,149	-0,47	2,753	49,61	0,01514	-87,54	0,8989	-0,96
45	1,149	-0,44	2,683	47,90	0,01510	-87,54	0,8976	-1,00
50	1,149	-0,46	2,784	49,16	0,01507	-87,60	0,8992	-0,98
55	1,149	-0,43	2,704	47,68	0,01504	-87,61	0,8977	-1,02
60	1,149	-0,46	2,785	49,10	0,01502	-87,67	0,8991	-0,98
65	1,149	-0,44	2,749	47,13	0,01500	-87,68	0,8981	-1,05
70	1,149	-0,47	2,747	49,32	0,01499	-87,73	0,8985	-0,95
75	1,149	-0,47	2,759	48,87	0,01497	-87,76	0,8985	-0,97
80	1,149	-0,43	2,673	47,19	0,01496	-87,75	0,8969	-1,01

ТАБЛИЦА 4. Характеристические параметры эквивалентного четырехполюсника трансформатора ФПМ на частоте 480 Гц, включенного согласно схеме на рис. 7

$U_{PT,TP}$, В	$ Z_{1C} $, Ом	$\varphi_{Z_{1C}}$, °	$ Z_{2C} $, Ом	$\varphi_{Z_{2C}}$, °	a , дБ	b , °	n , –
1	14,14	71,58	11,09	71,28	1,797	-3,351	1,129
5	15,09	66,57	11,83	65,77	1,736	-4,394	1,130
10	14,93	68,99	11,68	68,51	1,708	-3,76	1,131
15	14,77	67,84	11,53	67,25	1,655	-3,886	1,132
20	15,20	68,94	11,9	68,45	1,702	-3,758	1,130
25	15,30	68,15	11,97	67,59	1,693	-3,917	1,130
30	15,24	67,86	11,92	67,28	1,674	-3,940	1,131
35	15,08	68,19	11,78	67,64	1,652	-3,818	1,131
40	15,25	68,82	11,92	68,33	1,672	-3,735	1,131
45	15,08	68,01	11,78	67,44	1,641	-3,844	1,132
50	15,37	68,64	12,02	68,12	1,675	-3,795	1,130
55	15,17	67,93	11,85	67,35	1,642	-3,879	1,131
60	15,39	68,65	12,05	68,13	1,672	-3,802	1,130
65	15,31	67,71	11,97	67,10	1,650	-3,962	1,131
70	15,31	68,77	11,97	68,29	1,660	-3,759	1,131
75	15,35	68,56	12,00	68,06	1,660	-3,810	1,131
80	15,13	67,76	11,81	67,18	1,625	-3,907	1,132

ТАБЛИЦА 5. Параметры холостого хода и короткого замыкания эквивалентного четырехполюсника трансформатора ФПМ на частоте 480 Гц, включенного согласно схеме на рис. 7

$U_{рт.тр}, В$	$ Z_{1X} , Ом$	$\varphi_{Z_{1X}}, ^\circ$	$ Z_{1K} , Ом$	$\varphi_{Z_{1K}}, ^\circ$	$ Z_{2X} , Ом$	$\varphi_{Z_{2X}}, ^\circ$	$ Z_{2K} , Ом$	$\varphi_{Z_{2K}}, ^\circ$
1	66,71	86,93	2,998	56,23	52,30	86,63	2,351	55,93
5	71,36	87,00	3,192	46,14	55,93	86,20	2,502	45,34
10	72,94	86,98	3,058	51,00	57,06	86,50	2,392	50,51
15	73,87	86,98	2,952	48,71	57,67	86,38	2,304	48,11
20	74,47	86,99	3,102	50,90	58,31	86,50	2,429	50,41
25	74,97	87,00	3,122	49,30	58,68	86,44	2,443	48,74
30	75,36	87,02	3,082	48,71	58,94	86,44	2,410	48,12
35	75,67	87,04	3,004	49,34	59,11	86,49	2,346	48,79
40	75,91	87,07	3,063	50,56	59,36	86,58	2,395	50,07
45	76,11	87,11	2,989	48,90	59,45	86,54	2,335	48,34
50	76,27	87,14	3,096	50,14	59,68	86,62	2,423	49,62
55	76,41	87,17	3,012	48,69	59,69	86,59	2,353	48,11
60	76,51	87,21	3,098	50,09	59,87	86,69	2,424	49,57
65	76,61	87,24	3,061	48,18	59,89	86,63	2,393	47,57
70	76,69	87,26	3,057	50,27	59,95	86,78	2,390	49,79
75	76,74	87,29	3,071	49,84	60,00	86,79	2,401	49,33
80	76,80	87,32	2,980	48,20	59,94	86,74	2,326	47,62

С использованием полученных A -параметров (табл. 3) была выполнена проверка адекватности эквивалентного четырехполюсника трансформатору ФПМ. Для этого при пяти нагрузках рассчитаны напряжение и ток на входе трансформатора, а также его входное сопротивление через измеренные напряжение и ток нагрузки, ее сопротивление и каждую из матриц, представленных в табл. 3 наборами A -параметров. Погрешность значений входного напряжения, входного тока и входного сопротивления определена относительно соответствующих измеренных значений. Далее приведены графики зависимостей максимальных (из пяти, по числу нагрузок) значений относительной погрешности:

- по входному току трансформатора $\delta_{I_{1тр}}(U_{1тр})$ — на рис. 9;
- по входному напряжению трансформатора $\delta_{U_{1тр}}(U_{1тр})$ — на рис. 10;
- по входному сопротивлению трансформатора $\delta_{Z_{1тр}}(U_{1тр})$ — на рис. 11.

Графики данных зависимостей иллюстрируют адекватность каждой математической модели трансформатора ФПМ: чем меньше

расхождение расчетного значения тока (напряжения, сопротивления) и измеренного значения, тем точнее модель. В идеальном случае расчетные значения совпадают с измеренными. Чем больше расхождение расчетного значения и измеренного, тем грубее модель и тем большими будут относительные погрешности. Таким образом, получен 51 график — по 17 для погрешности по току, по напряжению и сопротивлению.

Графические зависимости показывают, что наиболее адекватно (с минимальной погрешностью расчетных значений относительно измеренных) работу трансформатора ФПМ описывает та математическая модель, параметры которой были измерены на том же входном напряжении.

На рис. 9–11 также показаны уровни относительной погрешности 1 и 10%. По ним можно определить интервалы входного напряжения, на которых соответствующая погрешность не превышает этих значений.

Графики на рис. 9–11 отражают нелинейность электрических параметров трансформатора ФПМ, так как ни одна из 17 матриц

A -параметров эквивалентного ЧП трансформатора не дает постоянной погрешности в диапазоне рабочих напряжений трансформатора от 5 до 80 В.

В табл. 2–4 и на рис. 9–11 представлены параметры и графики зависимостей, полученные при измерениях, выполненных в РТ трансформатора 1 В. Тем самым была симулирована ситуация, когда измерение входного сопротивления трансформатора осуществляется с помощью измерителя иммитанса, имеющего максимальное напряжение тест-сигнала 1 В. Из графиков на рис. 9 и 11 видно, что в данном случае погрешности по току и сопротивлению существенно (в разы) увеличиваются, превышая 5% во всем рабочем

диапазоне (5–80 В) входного напряжения. Графики же на рис. 10 показывают, что при использовании измерителя иммитанса (то есть при измерениях в РТ 1 В) получаемая погрешность по напряжению во всем рабочем диапазоне сопоставима с погрешностями, получаемыми при измерениях в других РТ. Таким образом, можно сделать выводы, что, во-первых, использование измерителя иммитанса для определения A -параметров трансформатора ФПМ неприемлемо, а во-вторых, проверка адекватности только по напряжению недостаточна, поскольку по напряжению погрешность может быть пренебрежимо низкой, в то время как по току и по сопротивлению — весьма существенной.

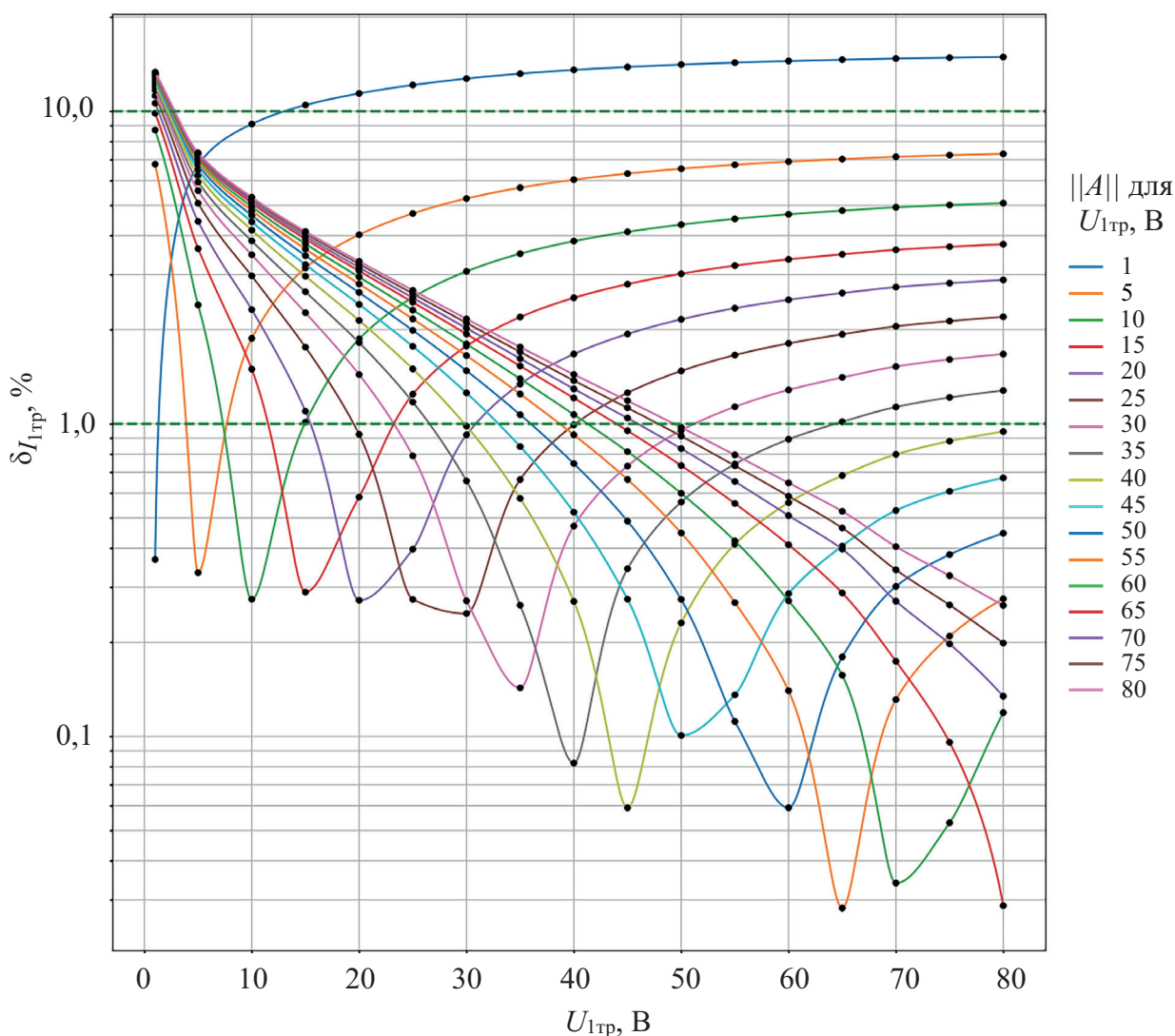


Рис. 9. Зависимости максимальной относительной погрешности по входному току трансформатора от входного напряжения для полученных матриц A -параметров трансформатора

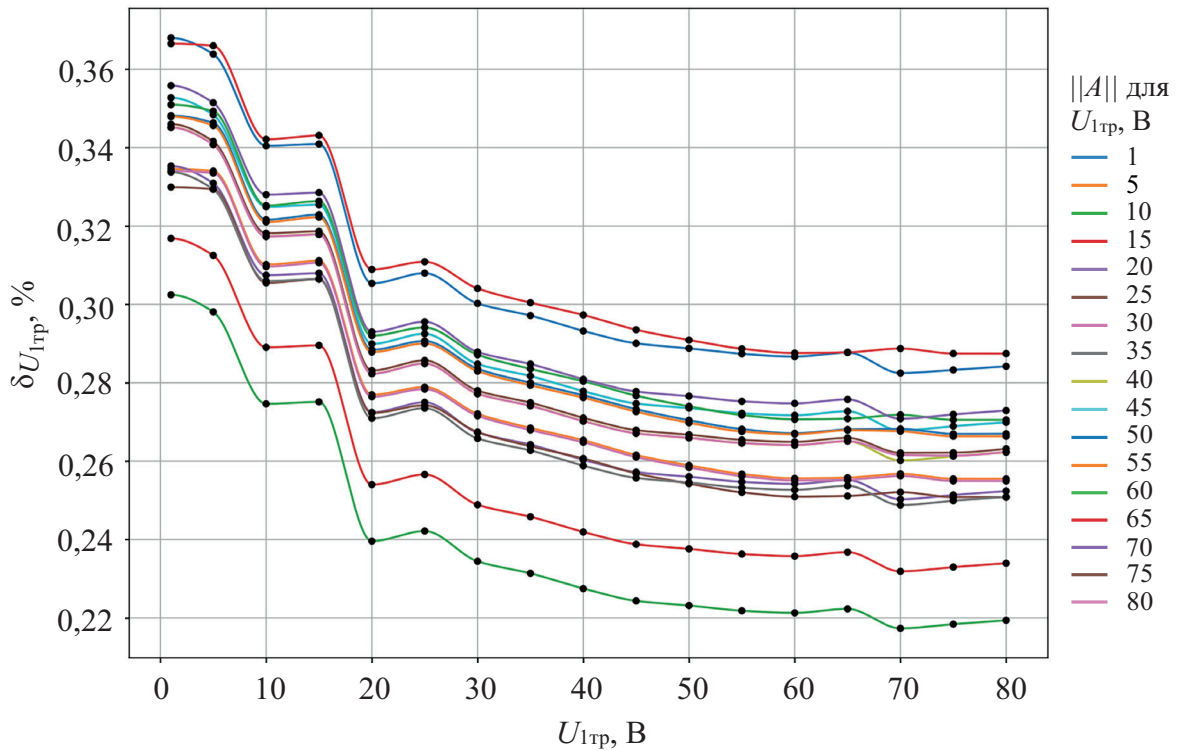


Рис. 10. Зависимости максимальной относительной погрешности по входному напряжению трансформатора от входного напряжения для полученных матриц A -параметров трансформатора

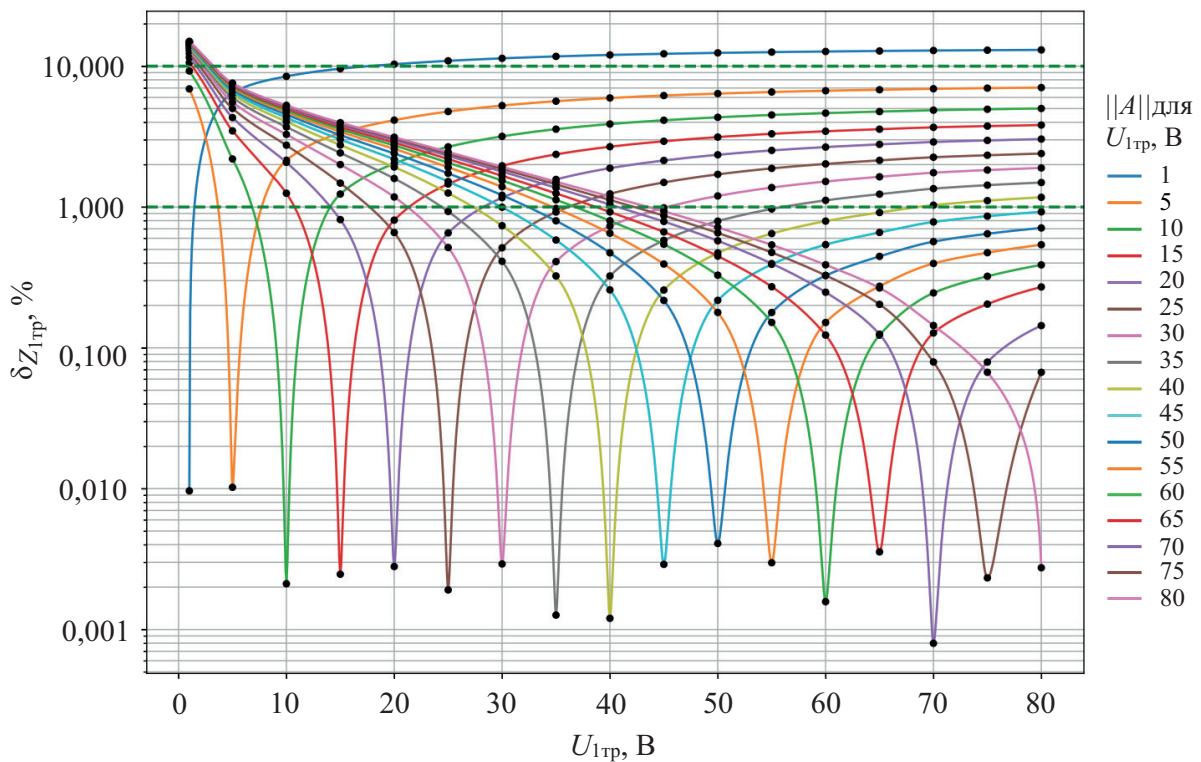


Рис. 11. Зависимости максимальной относительной погрешности по входному сопротивлению трансформатора от входного напряжения для полученных матриц A -параметров трансформатора

Характерным, к сожалению, примером ошибочного выбора измерителя иммитанса как инструмента является экспериментальное исследование входного импеданса рельсовой цепи на входе путевого трансформатора ПРТ-Г [15]. Так, при используемом коэффициенте трансформации 18 напряжение на входе будет составлять десятки вольт. В то же время тест-сигнал измерителя иммитанса использованного типа составляет 0,6 В. Таким образом, погрешность измерений, принимая во внимание существенную нелинейность ПРТ-Г вследствие отсутствия зазора в магнитопроводе, может достигать сотен процентов.

Как показывает практика, для трансформаторов погрешность входного напряжения, рассчитанного через A -параметры, невелика (в районе нескольких процентов), в то время как погрешность входного тока, рассчитанного через A -параметры, вне рабочей точки может достигать десятков и сотен процентов. Так, из результатов исследования дроссель-трансформаторов видно, что если погрешность входного напряжения (графики на рис. 2 и 4 [7]) укладывается в 4,1 и 1,4 % во всем диапазоне напряжений, то погрешность входного тока при этом составляет соответственно до 35 и 25 % (графики на рис. 1 и 3 [7]). Графики на рис. 9 и 10 также показывают, что погрешность по модулю входного тока может превышать погрешность по модулю входного напряжения в несколько раз. Таким образом, необходим комплекс проверок как трансформатора, так и ФПМ в целом, включающий проверки как по напряжению, так и по току, а также по входному сопротивлению и характеристическим параметрам трансформатора.

Представленные графики зависимости относительной погрешности по току и напряжению дают ответ на вопрос о причине расхождения расчетных и измеренных значений в реальной рельсовой цепи да и в ее лабораторном макете. Близкое совпадение измеренных и рассчитанных напряжений и существенное, достигающее до 100 % несовпадение токов авторам доводилось наблюдать при проведении экспериментов на макетах рельсовой цепи и в условиях эксплуатации при измерениях в действующих РЦ, когда в качестве параметров математической модели использовались

A -параметры эквивалентных ЧП трансформаторов, представленные в [3, 4, 16] как универсальные, не зависящие от напряжения на входных/выходных зажимах. Графики, полученные в данной работе, как и в других упомянутых трудах, иллюстрируют причину расхождения рассчитанных и измеренных значений тока как следствие несоответствия математической модели устройства моделируемому устройству. Несложно спрогнозировать, какими будут результаты измерения параметров нелинейного трансформатора с помощью автоматизированных аппаратно-программных комплексов, не учитывающих описанные особенности.

Заключение

Использование предельных режимов холостого хода и короткого замыкания вследствие нелинейности трансформатора ФПМ на практике не позволяет получить значения A -параметров эквивалентного четырехполюсника ФПМ, корректные во всем диапазоне возможных значений входного напряжения ФПМ.

Переход к измерению A -параметров в заданной РТ ФПМ (учитывающей реальные условия его эксплуатации) с применением метода трех известных нагрузок позволяет получить набор значений параметров, справедливый в этой РТ ФПМ и ее окрестностях. Такой подход делает возможным использование линейной модели трансформатора ФПМ в виде набора A -параметров эквивалентного четырехполюсника, справедливого в определенном интервале значений входного напряжения в зависимости от уровня допустимой погрешности.

Рассмотренная методика измерения A -параметров эквивалентного четырехполюсника ФПМ, включающая в себя ряд количественных и качественных проверок результатов измерений, может быть применена к ФПМ всех типов, на всех используемых в ТРЦ частотах, во всем диапазоне значений входного напряжения ФПМ. Кроме того, она может быть применена и в рамках подхода, когда периодический сигнал ТРЦ в виде модулированного несущего колебания, имеющий сложный спектр, представляется в виде разложения в ряд Фурье. В этом случае A -параметры ФПМ, измеренные на

одной заданной частоте, следует применять не ко всему сигналу, а только к соответствующей по частоте гармонике спектра сигнала. Тогда в каждой РТ эквивалентный ЧП ФПМ будет характеризоваться не одним набором, а совокупностью наборов A -параметров — по одному набору для каждой присутствующей в спектре сигнала гармоники.

Практическое применение данной методики измерения A -параметров эквивалентного ЧП ФПМ в организациях и на предприятиях, осуществляющих разработку и (или) актуализацию цифровых двойников ТРЦ, с учетом рассмотренных в настоящей статье аспектов позволит повысить адекватность входящих в состав этих двойников математических моделей ФПМ за счет учета нелинейности трансформатора ФПМ. Методика также вполне реализуема в учебном процессе, поскольку не предъявляет особых требований к используемым приборам и оборудованию. В частности, при применении метода трех вольтметров отпадает необходимость в наличии дорогостоящего измерительного комплекса из четырехканального цифрового осциллографа, дифференциального предусилителя и токовых датчиков (пример такого комплекса был приведен выше). Наличие таких приборов и оборудования также не предусмотрено и упомянутым выше Регламентом технической и технологической оснащенности дистанций сигнализации, централизации и блокировки — структурных подразделений Центральной дирекции инфраструктуры.

Рассмотренная методика может быть использована и при разработке и конструировании автоматизированных измерителей A -параметров эквивалентных четырехполюсников трансформаторов, применяемых в рельсовых цепях. ▲

Список источников

1. Поменков Д. М. Цифровая трансформация хозяйства автоматики и телемеханики // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 4. С. 12–14. EDN ZCKVMD
2. Shubinsky I. B., Rozenberg E. N., Baranov L. A. Safety-critical railway systems // Editor(s): Mangey Ram, Liudong Xing, In *Advances in Reliability Science, Reliability Modeling in Industry 4.0*, Elsevier, 2023, pp. 83–122. DOI: 10.1016/B978-0-323-99204-6.00006-6
3. Аркатов В. С., Кравцов Ю. А., Степенский Б. М. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание. М.: Транспорт, 1990. 295 с.
4. Рельсовые цепи магистральных железных дорог / В. С. Аркатов [и др.], 3-е изд., перераб. и доп. М.: Миссия-М, 2006. 496 с.
5. Щербина Е. Г., Щербина А. Е. Определение параметров математической модели дроссель-трансформатора // Автоматика, связь, информатика. 2023. № 5. С. 17–23. DOI: 10.34649/AT.2023.5.5.003. EDN RCPQAN
6. Дмитренко И. Е., Устинский А. А., Цыганков В. И. Измерения в устройствах автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте. М.: Транспорт, 1982. 312 с.
7. Щербина, Е. Г., Щербина А. Е., Гоман Е. А. Параметры эквивалентного четырехполюсника дроссель-трансформаторов ДТЕ-0,2/0,4-1500М // Автоматика, связь, информатика. 2023. № 10. С. 15–22. EDN OVJIND
8. Медведев Д. Д. Определение первичных параметров путевых фильтров // Сборник студенческих научных работ. Гомель: Белорусский государственный университет транспорта, 2022. Вып. 27, ч. II. С. 67–70.
9. Хоменко С. И., Медведев Д. Д., Залесовский В. А. Микропроцессорный измеритель параметров четырехполюсников // Проблемы безопасности на транспорте: материалы X Международной научно-практической конференции (Гомель, 26–27 ноября 2020 года). Гомель: Белорусский государственный университет транспорта, 2020. Ч. 1. С. 48–50.
10. Неклюдов Ю. Н. Выбор методики измерения A -параметров четырехполюсника замещения трансформатора // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 39. С. 193–208. EDN GNVJLM
11. Медведев Д. Д., Хоменко С. И., Жигалин И. О. Особенности измерения первичных параметров путевых фильтров // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XII Международной научно-практической конференции (Гомель, 24–25 ноября 2022 года). Гомель: Белорусский государственный университет транспорта, 2022. Ч. 1. С. 223–225.
12. Медведев Д. Д., Хоменко С. И., Жигалин И. О. Определение первичных параметров элементов ЖАТС с ферромагнитными компонентами // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. 2023. № 2 (47). С. 11–13.
13. Методика измерения A -параметров эквивалентного четырехполюсника путевого фильтра ФПМ / Р. Р. Юсупов [и др.] // Автоматика, связь, информатика. 2026. № 4. С. 12–15. DOI: 10.62994/AT.2026.4.4.003. EDN WLXWJV

14. Расчет А-параметров четырехполюсника фильтра путевого ФПМ: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022619457 Российская Федерация. № 2022618492 / Р.Р. Юсупов, А.С. Хохрин, В.Б. Леушин; заявл. 10.05.2022; опубл. 23.05.2022; заявитель Самарский государственный университет путей сообщения. EDN PRAZGZ
15. Ходкевич А.Г., Соколов М.М., Рыбина Л.А. Определение зависимости импеданса рельсовой линии от положения шунта // Автоматика, связь, информатика. 2026. № 2. С. 17–19. DOI: 10.62994/AT.2026.2.2.004. EDN RTCQAI
16. Сороко В.И., Фотькина Ж.В. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики: справочник: в 5 кн. Кн. 1. 5-е изд. М.: НПФ «Планета», 2020. 968 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH. 2026. Vol. 12, no. 2, pp. 89–113
DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-02-89-113

Theoretical And Practical Aspects of Measuring the A-Parameters of the Equivalent Two-Port Network of the Track Filter

Information about authors

Iusupov R. R.¹, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of Department "Automation, Remote Control and Communications in Railway Transport"; e-mail: r.iusupov@samgups.ru

Khokhrin A. S.¹, PhD in Engineering, Associate Professor of Department "Automation, Remote Control and Communications in Railway Transport"; e-mail: a.hokhrin@samgups.ru

Shcherbina E. G.², PhD in Engineering, Associate Professor, Technical Director; e-mail: evgeny.shcherbina@1520signal.ru

Shcherbina A. E.², PhD in Engineering, Head of the Track Circuits Department; e-mail: alexey.shcherbina@1520signal.ru

Pavlov E. V.³, PhD in Engineering, First Deputy General Director; e-mail: ev.pavlov@elteza.ru

¹ Volga State Transport University (VSTU), Samara

² 1520 Signal Ltd., Moscow

³ Electrical Engineering Plants Incorporated Joint Stock Company (ELTEZA JSC), Moscow

Abstract: when developing and subsequently updating digital twins of audio-frequency track circuits, a need arises to measure the *A* parameters (coefficients *A*, *B*, *C*, *D*) of equivalent two port networks of the equipment being part of a specific track circuit. Measuring the *A* parameters of the two port network of the track filter TF used in audio-frequency track circuits is complicated by the nonlinearity of the transformer included in the TF, which makes these parameters dependent on the voltage at the TF input. Currently applied methods for measuring the *A* parameters of linear two port networks are reviewed. Aspects of the practical implementation of the methodology earlier proposed by the authors for measuring the *A* parameters of the TF two port network are presented. The methodology takes into account the nonlinearity of the TF transformer by performing measurements at a specific operating point of the TF, understood as a given voltage value at its input. The methodology was implemented for a TF 8,9,11 filter tuned to a carrier frequency of 480 Hz with a TF input voltage of 3.3 V. The coefficient matrix of the TF two port network was calculated. Measurement verification was carried out. The relative error of the magnitude and argument of the transformer input impedance, of the magnitudes and phases of the transformer input current and voltage, and of the magnitudes and phases of the TF input current and voltage did not exceed 1% in absolute value. The use of methods for measuring the *A* parameters of linear two port networks under open circuit and short circuit conditions, due to the nonlinearity of the TF transformer, may lead to incorrect values of the parameters of the TF two port network. The methodology for measuring the *A* parameters of the TF two port network, considered

in the paper through a specific practical example, makes it possible to determine the values of the parameters of the TF two port network with an accuracy acceptable for use in calculations of adjustment characteristics of track circuits.

Keywords: digital twin, audio-frequency track circuit, track filter, three-known-loads method, methodology for measuring, operating point

References

- Pomenkov D. M. Tsifrovaya transformatsiya khozyajstva avtomatiki i teleme-khaniki [Digital Transformation of Automation and Telemechanics Systems], *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, Communications, Informatics]*, 2019, no. 4, pp. 12–14. EDN ZCKVMD (In Russian)
- Shubinsky I. B., Rozenberg E. N., Baranov L. A. Safety-Critical Railway Systems, ed. By M. Ram, L. Xing, In *Advances in Reliability Science, Reliability Modeling in Industry 4.0*, Elsevier, 2023, pp. 83–122. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99204-6.00006-6>
- Arkatov V. S., Kravtsov Yu. A., Stepensky B. M. Rel'sovye tsepi. Analiz raboty i tekhnicheskoe obsluzhivanie [Rail Circuits. Analysis of Operation and Maintenance], Moscow, Transport, 1990, 295 p. (In Russian)
- Arkatov V. S., et al. Rel'sovye tsepi magistral'nykh zheleznikh dorog [Rail Circuits of Mainline Railways: A Reference Book], 3rd ed., revised and enlarged. Moscow, Missiya-M, 2006, 496 p. (In Russian)
- Shcherbina E. G., Shcherbina A. E. Opredelenie parametrov matematicheskoy modeli drossel'-transformatora [Determination of Parameters of the Mathematical Model of an Impedance Bond], *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, Communications, Informatics]*, 2023, no. 5, pp. 17–23. DOI: 10.34649/AT.2023.5.5.003. EDN RCPQAH (In Russian)
- Dmitrenko I. E., Ustinsky A. A., Tsygankov V. I. Izmereniya v ustrojstvakh avtomatiki, telemekhaniki i svyazi na zheleznodorozhnom transporte [Measurements in Railway Automation, Telemechanics and Communication Devices], Moscow, Transport, 1982, 312 p. (In Russian)
- Shcherbina E. G., Shcherbina A. E., Goman E. A. Parametry ekvivalentnogo chetyrekhpol'yusnika drossel'-transformatorov DTE-0,2/0,4-1500M [Parameters of the Equivalent Two-Port Network of Impedance Bonds DTE-0.2/0.4-1500M], *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, Communications, Informatics]*, 2023, no. 10, pp. 15–22. EDN OVJIHD (In Russian)
- Medvedev D. D. Opredelenie pervichnykh parametrov putevykh fil'trov, sbornik studencheskikh nauchnykh rabot [Determination of Primary Parameters of Track Filters, collection of Student Scientific Papers], Gomel: Belarusian State University of Transport, 2022, iss. 27, part II, pp. 67–70. (In Russian)
- Khomenko S. I., Medvedev D. D., Zalesovsky V. A. Mikroprotsessornyy izmeritel' parametrov chetyrekhpol'yusnikov. Problemy bezopasnosti na transporte: materialy X Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Microprocessor-Based Meter for Two-Port Network Parameters. Transport Safety Problems: Proceedings of the X International Scientific-Practical Conf.], Gomel, November 26–27, 2020). Gomel, Belarusian State University of Transport, 2020, part I, pp. 48–50. (In Russian)
- Neklyudov Yu. N. Vybór metodiki izmereniya A-parametrov chetyrekhpol'yusnika zameshcheniya transformatora [Choice of Methodology for Measuring

- A-Parameters of the Equivalent Two-Port Network of a Transformer], *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie [Innovation. Science. Education]*, 2021, no. 39, pp. 193–208, EDN GNVJLM (In Russian)
11. Medvedev D. D., Khomenko S. I., Zhigalin I. O. Osobennosti izmereniya pervichnykh parametrov putevykh fil'trov. Problemy bezopasnosti na transporte: materialy XII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Features of Measuring Primary Parameters of Track Filters. Transport Safety Problems: Proceedings of the XII International Scientific-Practical Conf.], Gomel, November 24–25, 2022, Gomel, Belarusian State University of Transport, 2022, part I, pp. 223–225. (In Russian)
 12. Medvedev D. D., Khomenko S. I., Zhigalin I. O. Opredelenie pervichnykh parametrov elementov ZhATS s ferromagnitnymi komponentami [Determination of Primary Parameters of Railway Automation and Telemechanics Elements with Ferromagnetic Components], *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport [Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport]*, 2023, no. 2 (47), pp. 11–13. (In Russian)
 13. Iusupov R. R., et al. Metodika izmereniya A-parametrov ekvivalentnogo chetyrekhpol'yusnika putevogo fil'tra FPM / R [Methodology for Measuring A-Parameters of an Equivalent Four-Port Network of the Track Filter], *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, Communications, Informatics]*, 2026, no. 4, pp. 12–15. DOI: 10.62994/AT.2026.4.4.003. EDN WLXWJV (In Russian)
 14. Yusupov R. R., Khokhrin A. S., Leushin V. B. Svidetelstvo o gosudarstvennoj registratsii programmy dlya EVM № 2022619457 Rossijskaya Federatsiya. Raschet A-parametrov chetyrekhpol'yusnika fil'ra putevogo FPM [Certificate of State Registration of Computer Program No. 2022619457, Russian Federation. Calculation of A-Parameters of the Four-Pole Network of the Fpm Track Filter], no. 2022618492, filed May 10, 2022, published May 23, 2022, applicant Samara State Transport University. EDN PRAZGZ (In Russian)
 15. Khodkevich A. G., Sokolov M. M., Rybina L. A. Opredelenie zavisimosti impedansa rel'sovoj linii ot polozheniya shunta [Determination of the Dependence of the Impedance of the Rail Line on the Position of the Shunt], *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, Communications, Informatics]*, 2026, no. 2, pp. 17–19. DOI: 10.62994/AT.2026.2.2.004. EDN RTCQAI (In Russian)
 16. Soroko V. I., Fot'kina Zh. V. Apparatura zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki: spravochnik [Railway Automation and Telemechanics Equipment: A Handbook], in 5 vols, vol. 1, 5th ed., Moscow, NPF "Planeta", 2020, 968 p. (In Russian)

ЗАЩИЩЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ВВОДАМ ПИТАНИЯ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ ПРИ УДАРАХ МОЛНИИ

СОЛОВЬЁВ Александр Дмитриевич, аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»; e-mail: Shura.Solovyov.01@mail.ru

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

В статье рассматривается задача защиты вводов питания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики от грозовых перенапряжений, распространяющихся по воздушным линиям автоблокировки 10 кВ. Показано, что при прямых и повторных ударах молнии вводной ограничитель перенапряжений, установленный непосредственно у защищаемого объекта, может испытывать недопустимую токовую и энергетическую нагрузку, что снижает устойчивость системы защиты. Для исследования указанных процессов разработана объединенная математическая модель системы «воздушная линия — ввод питания — средства защиты», включающая трехфазную распределенную модель линии, источник грозового воздействия на основе функции Хайдлера, модель ввода питания релейного шкафа, частотно-зависимую модель заземляющего устройства и нелинейные модели ограничителя перенапряжений и мультикамерных разрядников. Численная реализация модели выполнена в среде MATLAB. Проведены вычислительные эксперименты для одиночных и серийных ударов молнии при различных конфигурациях защищенных подходов и схемах размещения защитных аппаратов на линии. Установлено, что равномерная установка ограничителей перенапряжений по длине линии не обеспечивает требуемой устойчивости при энергоемких импульсах типа 10/350 мкс вследствие превышения допустимой энергонагрузки аппаратов. Показано, что применение мультикамерных разрядников позволяет существенно снизить напряжение на вводе питания и нагрузку на вводной ограничитель перенапряжений. Полученные результаты подтверждают перспективность пространственно-организованных схем защиты, обеспечивающих поэтапное ограничение грозовой волны и перераспределение импульсной энергии между несколькими аппаратами при одиночных и серийных ударах молнии.

Ключевые слова: удар молнии, математическая модель, защищенные подходы, импульсные перенапряжения, железнодорожная автоматика и телемеханика

DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-02-114-127

▼ Введение

Надежность функционирования устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) во многом определяется устойчивостью их систем электроснабжения к внешним электромагнитным воздействиям, среди которых особое место занимают грозовые перенапряжения. Для значительной части объектов ЖАТ питание осуществляется от воздушных линий автоблокировки (ВЛ АБ) напряжением 10 кВ, по которым при ударах молнии распространяются импульсные электромагнитные волны, способные достигать вводов питания релейных шкафов и вызывать опасные перенапряжения в высоковольтных и вторичных цепях. В этих условиях ввод питания становится одним из наиболее ответственных узлов, через который

внешнее грозовое воздействие преобразуется во внутреннюю электромагнитную нагрузку на элементы защищаемой аппаратуры.

Ранее выполненные исследования [1] позволили установить высокую значимость грозовых воздействий в структуре отказов устройств ЖАТ, а также показать определяющую роль вводов питания как канала проникновения опасных импульсных воздействий в аппаратуру. В работе [2] также были рассмотрены волновые процессы в ВЛ АБ 10 кВ при воздействии молнии, обоснована необходимость использования трехфазной модели линии с распределенными параметрами и показано влияние места установки ограничителей перенапряжений на характер переходных процессов. Вместе с тем данные результаты не решают в полном объеме

задачу рационального построения защиты самого ввода питания, поскольку не отвечают на вопрос о том, каким образом должна быть организована система средств защиты на подходе к защищаемому объекту.

Традиционная схема грозозащиты, основанная на установке ограничителя перенапряжений непосредственно на вводе питания, в ряде случаев оказывается недостаточной [3]. При распространении грозового импульса по линии вводной ограничитель воспринимает на себя основную токовую и энергетическую нагрузку, величина которой определяется не только параметрами самого импульса, но и волновыми процессами в линии, отражениями, несогласованием импедансов, динамикой потенциала заземления и взаимодействием с другими элементами схемы [4]. Особенно жесткие режимы возникают при серийных ударах молнии, когда повторное поступление импульсной энергии может приводить к перегрузке вводного средства защиты даже при наличии отдельных средств защиты, размещенных вдоль линии [5].

В связи с этим представляет интерес переход от локального принципа защиты к принципу формирования защищенного подхода к вводу питания. Под защищенным подходом в данной работе понимается локализованный участок линии, примыкающий к защищаемому объекту и оснащенный пространственно-согласованной системой средств защиты, обеспечивающей поэтапное ограничение грозовой волны до ее поступления на ввод питания. Такой подход позволяет рассматривать задачу защиты не как выбор отдельного средства защиты, а как задачу координации нескольких средств защиты, совместно работающих в единой электромагнитной системе «линия — подход — ввод питания».

Цель работы состоит в расчетном обосновании конфигурации защищенного подхода к вводу питания устройств ЖАТ, обеспечивающей снижение остаточного напряжения и энергетической нагрузки на вводное средство защиты при грозовых воздействиях.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать объединенную математическую модель системы «ВЛ АБ 10 кВ — ввод

питания релейного шкафа — заземляющее устройство — средства защиты», предназначенную для исследования волновых процессов и энергетической нагрузки защитных аппаратов при грозовых воздействиях;

- выполнить численное исследование защищенных подходов при одиночных ударах молнии, включая анализ вариантов размещения средств защиты на линии, расчет максимальных напряжений на вводе питания и защищаемых устройствах ЖАТ, а также оценку энергетической нагрузки средств защиты;
- исследовать работу защитных схем при серийных ударах молнии и обосновать конфигурацию защищенного подхода, обеспечивающую поэтапное ограничение грозовой волны, снижение нагрузки на вводной ОПН и сохранение работоспособности средств защиты.

В работе используется математическое моделирование во временной области, позволяющее рассматривать ВЛ АБ, ввод питания, заземляющее устройство и средства защиты в составе единой динамической системы. Это дает возможность исследовать влияние структуры защищенного подхода на токовую и энергетическую нагрузку вводного средства защиты при одиночных и серийных ударах молнии.

Математическая модель ввода питания устройств ЖАТ

Для исследования защищенных подходов к вводам питания устройств ЖАТ используется объединенная математическая модель, в которой ВЛ АБ 10 кВ, грозовое воздействие, ввод питания релейного шкафа (РШ), система заземления и средства защиты рассматриваются как единая динамическая система. Такая постановка позволяет проследить распространение импульсного воздействия от точки удара молнии до ввода питания, а также определить перераспределение токов и энергии между ВЛ АБ, трансформатором, паразитными емкостями, средствами защиты и локальным заземлением.

Импульсные процессы в трехфазной ВЛ АБ описываются многопроводными телеграфными уравнениями [6], которые в матричной форме имеют вид:

$$\frac{du(x,t)}{dx} = -L \frac{di(x,t)}{dt} - Ri(x,t), \quad (1)$$

$$\frac{di(x,t)}{dx} = -C \frac{du(x,t)}{dt} - Gu(x,t), \quad (2)$$

где $u(x, t)$ и $i(x, t)$ — векторы фазных напряжений и токов соответственно;

R, L, G, C — матрицы продольных и поперечных распределенных параметров линии.

В такой постановке каждая фаза рассматривается не изолированно, а во взаимосвязи с двумя другими фазами, что особенно важно при грозовых воздействиях, когда межфазные индуктивные и емкостные связи заметно влияют на перераспределение энергии импульса.

Использование телеграфных уравнений позволяет описывать не только локальные токи и напряжения, но и распространение, отражение и переотражение бегущих волн вдоль линии [7]. Для задачи защиты ввода питания это принципиально, поскольку режим работы вводного средства защиты и средств защиты, установленных на подходе, определяется не одним только параметром источника молнии, а всей структурой волнового процесса в линии.

Для численной реализации непрерывная по длине линия заменяется каскадом π -звеньев [8] длиной Δx , параметры которых определяются соотношениями:

$$R_\pi = R\Delta x, \quad L_\pi = L\Delta x, \quad G_\pi = G\Delta x, \quad C_\pi = C\Delta x.$$

Такой переход от распределенной системы к цепной π -модели позволяет сохранить физический смысл параметров линии и одновременно получить конечномерную систему уравнений, пригодную для численного интегрирования во временной области.

После дискретизации модель ВЛ АБ приводится к форме переменных состояния:

$$M_l \dot{x}_l = A_l x_l + B_l f_l(t), \quad (3)$$

где x_l — вектор состояний линии, включающий токи продольных индуктивных ветвей и напряжения на емкостных узлах π -модели; f_l — вектор внешних воздействий.

Такая форма записи удобна тем, что позволяет включить ВЛ АБ в общую нелинейную систему уравнений совместно с моделью ввода питания, средствами защиты и заземлением.

Внешнее возбуждение в расчетной схеме задается аналитической функцией Хайдлера, широко применяемой при моделировании токов молнии [9]. Временная зависимость импульса записывается в виде:

$$i_M(t) = I_p \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right), \quad (4)$$

где $i_M(t)$ — ток молнии, А;

I_p — амплитуда тока, А;

τ_1 — параметр фронта, с;

τ_2 — параметра хвоста, с;

n — показатель крутизны фронта;

$t \geq 0$ — время от момента начала разряда, с.

Для описания серийных ударов молнии суммарное воздействие представляется суперпозицией отдельных импульсов:

$$i_M^{(\Sigma)}(t) = \sum_{k=1}^{N_{\text{уд}}} i_{M,k}(t - t_k), \quad (5)$$

где $N_{\text{уд}}$ — число ударов в серии;

t_k — момент начала k -го удара, с;

$i_{M,k}$ — ток k -го удара по форме (4).

Введение такой зависимости принципиально важно, поскольку при серийных ударах определяющим становится уже не только максимальное мгновенное значение тока, но и накопление энергии в защитных аппаратах, прежде всего во вводном средстве защиты.

Источник тока молнии включается в общую расчетную схему через распределенную модель линии. Тем самым параметры импульса определяют не только локальное возбуждение в точке удара, но и весь последующий волновой процесс, формирующий нагрузку на средства защиты, защищенного подхода и на ввод питания релейного шкафа.

Ввод питания в РШ рассматривается как сосредоточенная нелинейная подсистема, присоединенная к конечному узлу ВЛ АБ. В ее состав входят первичная цепь трансформатора, магнитная ветвь с учетом нелинейности намагничивания, паразитные емкости, вводной кабель, защитное устройство и локальная система заземления. Такая структура модели позволяет учитывать основные каналы передачи импульсной энергии во внутренние цепи

релейного шкафа: проводящий, магнитный и емкостный.

Для первичной цепи трансформатора уравнение принимается в виде:

$$L_{Q1} \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + u_p - u_g = u_m(t), \quad (6)$$

где i_1 — ток первичной обмотки;

L_{Q1} и R_1 — индуктивность рассеяния и активное сопротивление первичной цепи;

u_p — потенциал первичного узла;

u_g — потенциал локальной земли;

u_m — напряжение на конце ВЛ АБ.

Нелинейность намагничивания трансформатора учитывается через дифференциальную индуктивность магнитной ветви:

$$u_m = L_d(i_m) \frac{di_m}{dt}, \quad (7)$$

где i_m — ток намагничивания;

$L_d(i_m)$ — дифференциальная индуктивность, зависящая от текущего значения магнитного тока.

Введение зависимости $L_d(i_m)$ позволяет отказать от квазилинейного описания трансформатора и учесть изменение его магнитного состояния при импульсных воздействиях, что важно для корректной оценки магнитного канала передачи перенапряжения.

Паразитные емкостные связи описываются токами смещения:

$$i_{pg}(t) = C_{pg} \frac{du_p(t)}{dt}, \quad i_{sg}(t) = C_{sg} \frac{du_s(t)}{dt},$$

$$i_{ps}(t) = C_{ps} \frac{d(u_p(t) - u_s(t))}{dt},$$

где u_s — потенциал вторичной стороны;

C_{pg} — емкость первичной обмотки относительно земли;

C_{ps} — межобмоточная емкость;

C_{sg} — эквивалентная емкость вторичной цепи относительно земли.

Данные соотношения отражают емкостный канал проникновения грозового воздействия, который особенно заметен на крутых фронтах импульса и потому должен учитываться совместно с магнитной и проводящей передачей.

Вводной кабель моделируется π -схемой с продольными параметрами R_k, L_k и попереч-

ными параметрами C_k, G_k . Для продольной ветви записывается:

$$L_k \frac{di_k}{dt} + R_k i_k = u_{k,in} - u_{k,out}, \quad (8)$$

а для входного и выходного узлов кабеля:

$$C_k \frac{du_{k,in}}{dt} = i_{in} - \frac{1}{2} G_k u_{k,in} - i_k, \quad (9)$$

$$C_k \frac{du_{k,out}}{dt} = i_k - \frac{1}{2} G_k u_{k,out} - i_{load}. \quad (10)$$

В этой постановке кабельный участок рассматривается не как пассивное соединение, а как самостоятельное звено преобразования импульсного воздействия: продольные параметры определяют форму тока и падение напряжения, а поперечные — перераспределение зарядов между узлами схемы.

В результате модель ввода питания приводится к форме переменных состояния:

$$M_{in} \dot{x}_m = A_{in} x_m + b_m(t) + \varphi_{in}(x_m, t), \quad (11)$$

где x_m содержит токи индуктивных элементов, напряжения на емкостях и внутренние переменные заземляющей подсистемы, а φ_{in} включает нелинейности магнитной ветви и защитных устройств.

Такое представление получено на основе модифицированного узлового метода и обеспечивает энергетически согласованное сопряжение ввода питания с моделью линии.

При импульсных воздействиях система заземления не может рассматриваться как идеальный нулевой потенциал [10]. Протекание тока через заземляющее устройство вызывает динамическое смещение потенциала локальной земли, что влияет на синфазную составляющую перенапряжений и, следовательно, на фактическое напряжение на защищаемой нагрузке и режим работы средств защиты [11].

Для описания частотно-зависимого импеданса заземляющего устройства используется Foster-аппроксимация [12]:

$$Z_g(s) = \sum_{k=1}^m \frac{R_k}{1 + sR_k C_k}. \quad (12)$$

Такая форма позволяет учесть как начальную емкостную стадию процесса, связанную

с зарядкой окружающего объема грунта, так и последующий режим, в котором возрастает роль активного сопротивления растекания.

Во временной области каждая ветвь Foster-модели описывается уравнением:

$$\frac{du_{gk}}{dt} = -\frac{1}{R_k C_k} u_{gk} + \frac{1}{C_k} i_g, \quad (13)$$

где u_{gk} — напряжение на k -й ветви;

i_g — ток, поступающий в систему заземления.

Потенциал локального узла земли определяется суммой напряжений на всех ветвях [13]:

$$u_g = \sum_{k=1}^m u_{gk}. \quad (14)$$

Введение переменной u_g позволяет учитывать смещение потенциала локальной земли во времени и тем самым корректно описывать синфазную составляющую перенапряжения.

С учетом динамики заземления фактическое напряжение на защищаемой нагрузке определяется выражением:

$$u_{load} = u_{prot} + u_g, \quad (15)$$

где u_{prot} — остаточное напряжение на защитном устройстве.

Из соотношения (15) следует, что даже при исправной работе ограничителя повышение потенциала локальной земли может привести к росту напряжения относительно удаленной земли.

В качестве средства защиты будет моделироваться ограничитель перенапряжения нелинейный (ОПН). Вводной ОПН моделируется как нелинейный двухполюсник, подключенный между фазным узлом и локальной землей [14]. Напряжение на ОПН определяется выражением:

$$u_{опн} = u_\phi - u_g, \quad (16)$$

где u_ϕ — потенциал фазного узла.

Такая запись подчеркивает, что рабочий режим ограничителя определяется не абсолютным уровнем фазного напряжения, а разностью потенциалов между фазой и динамическим узлом локальной земли.

Ток через ОПН аппроксимируется степенной вольт-амперной характеристикой [15]:

$$i_{var}(t) = k_{опн} |u_{опн}(t)|^{a_{опн}} \text{sign}(u_{опн}(t)), \quad (17)$$

где $k_{опн}$ — коэффициент масштабирования вольт-амперной характеристики;

$i_{var}(t)$ — ток варисторного элемента;

$a_{опн}$ — показатель нелинейности.

Это позволяет анализировать не только уровень ограничения напряжения, но и перераспределение тока и энергии в схеме.

Для оценки энергетической нагрузки вводится переменная накопленной энергии:

$$\dot{W}_{опн} = u_{опн} i_{опн}, \quad (18)$$

$$W_{опн}(t) = \int_0^t u_{опн}(\tau) i_{опн}(\tau) d\tau. \quad (19)$$

Именно энергия, рассеиваемая во вводном ОПН, в настоящей статье рассматривается как один из основных критериев эффективности защищенного подхода, поскольку при тяжелых воздействиях предельное состояние аппарата определяется не только мгновенным током, но и суммарной поглощенной энергией. Критерий разрушения ОПН принимается в виде:

$$W_{опн}(t) \geq W_{lim}, \quad (20)$$

где W_{lim} — предельно допустимая энергия.

После достижения этого уровня в модели полагается:

$$i_{опн} = 0, \quad W_{опн}(t) \geq W_{lim},$$

что соответствует переходу средства защиты в режим разрушения. Для защитного устройства, установленного на выходе вводного кабеля, используются аналогичные соотношения:

$$u_{prot} = u_{k,out} - u_g, \quad (21)$$

$$i_{prot} = f(u_{prot}), \quad (22)$$

где функция f определяется типом применяемого устройства. Такое представление удобно тем, что позволяет включать в общую систему различные варианты защитных элементов без изменения общей структуры модели.

Кроме ОПН, в качестве средства защиты в дальнейших экспериментах будут использоваться мультикамерные разрядники (МКР).

МКР рассматривается как дуговое средство защиты [16], подключенное в узел «фаза — земля». Его влияние на режим системы определяется динамикой дуговых проводимостей и логикой переходов между режимами

«изоляция — дуга — восстановление». В компактной форме эквивалентное напряжение МКР можно записать как:

$$u_{\text{МКР}} = i_{\text{МКР}} \sum_{j=1}^{N_C} \frac{1}{g_j + \varepsilon}, \quad (23)$$

где g_j — проводимость j -й камеры;
 ε — параметр регуляризации;
 N_C — число камер.

Динамика проводимостей задается системой уравнений:

$$\frac{dg_j}{dt} = F_j(g_j, u_j, i_j). \quad (24)$$

Именно такая модель позволяет исследовать перераспределение тока между дугowymi и варисторными средствами защиты и, следовательно, оценивать разгрузку вводного ОПН в составе защищенного подхода.

После построения моделей отдельных подсистем формируется объединенная динамическая модель системы «ВЛ АБ — ввод питания — средства защиты». Вектор состояния имеет блочную структуру

$$x = \begin{bmatrix} x_l \\ x_{in} \\ x_g \\ x_{prot} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

где x_l — состояния ВЛ АБ;
 x_{in} — состояния ввода питания;
 x_g — состояния заземляющей подсистемы;
 x_{prot} — внутренние переменные защитных устройств.

Итоговая система записывается в виде

$$M\dot{x} = Ax + b(t) + \varphi(x, t), \quad (26)$$

где M — матрица масс;
 A — линейная часть модели;
 $b(t)$ — внешнее возбуждение со стороны тока молнии;
 $\varphi(x, t)$ — нелинейные составляющие, связанные с характеристиками трансформатора, ОПН и МКР.

Сопряжение распределенной модели линии и сосредоточенной модели ввода питания выполняется по конечному узлу ВЛ АБ: напряжение в конце линии непосредственно прикладывается к вводу питания, а ток

в точке сопряжения определяется балансом токов между магнитной ветвью трансформатора, паразитными емкостями, защитными устройствами и системой заземления. Такое объединение обеспечивает энергетическую согласованность модели и позволяет проследить распространение грозового импульса от места удара молнии до оборудования РШ без разрыва между распределенной и сосредоточенными частями схемы. Именно эта объединенная система далее используется для численного исследования эффективности защищенных подходов при одиночных и серийных ударах молнии.

На основе представленной математической модели разработана программа в среде MATLAB, реализующая численное исследование системы «ВЛ АБ — ввод питания — средства защиты» во временной области. Для интегрирования объединенной системы уравнений используется решатель ode15s, выбор которого обусловлен жесткостью задачи [17], связанной с совместным учетом распределенной модели линии, нелинейных защитных устройств, паразитных связей и динамики заземляющего устройства. Программа позволяет варьировать параметры ВЛ АБ, грозового воздействия и конфигурации средств защиты, обеспечивая проведение вычислительных экспериментов для различных вариантов защищенного подхода при одиночных и серийных ударах молнии.

Результаты исследования защищенных подходов при одиночных ударах молнии

Численное исследование при одиночных ударах молнии выполнялось для трехфазной ВЛ АБ 10 кВ длиной 2000 м с дискретизацией на 100 μ -звеньев. В качестве воздействий рассматривались импульсы тока молнии с амплитудой 100 кА и временными характеристиками 1,2/50¹ мкс, 8/20 мкс и 10/350² мкс. Такой набор импульсов позволяет сопоставить

¹ IEC 60060-1. High-voltage test techniques. Part 1: General definitions and test requirements. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2010. 139 p.

² IEC 62305-1. Protection against lightning. Part 1: General principles. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2010. 82 p.

режимы, различающиеся как по крутизне фронта, так и по энергоемкости, и тем самым оценить работу средств защиты в различных расчетных условиях.

Указанные формы импульсов соответствуют различным сценариям грозового воздействия: от стандартного испытательного импульса до энергоемкого воздействия, моделирующего прямой удар молнии. Для каждого варианта схемы определялись:

- энергия, выделяемая в каждом защитном аппарате;
- напряжение на вводе питания трансформатора;

- напряжение на защищаемых вторичных устройствах;
- факт разрушения средств защиты.

На рис. 1 показана расстановка ОПН по линии для защиты ввода питания в РЩ.

В табл. 1 приведены результаты численного моделирования электромагнитных процессов в линии при воздействии импульса тока амплитудой 100 кА с временной характеристикой 1,2/50 мкс. Расчеты выполнены для различных вариантов равномерной установки ОПН по длине линии. В таблице представлены значения энергии, выделяемой на каждом средстве защиты, максимальные напряжения на вводе

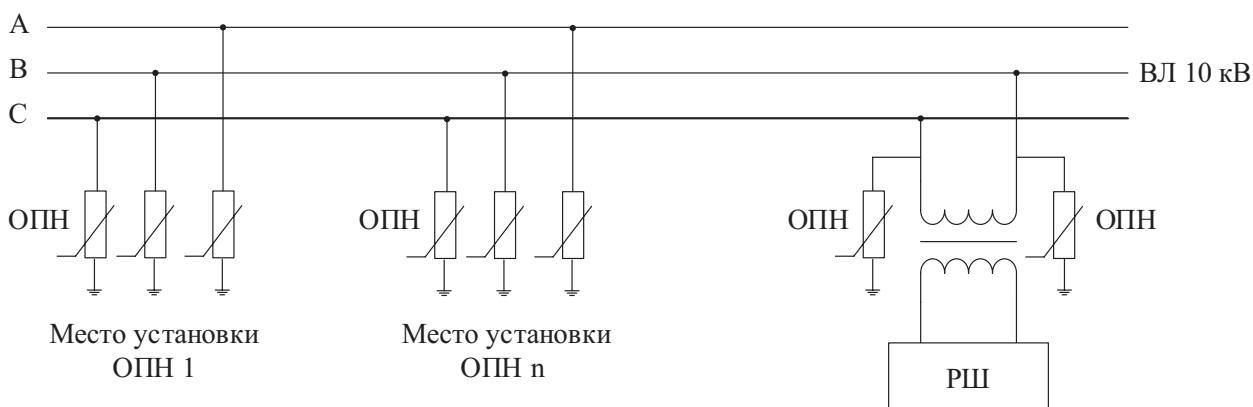


Рис. 1. Расстановка ОПН по линии для защиты ввода питания в РЩ

ТАБЛИЦА 1. Результаты численного моделирования при ударе молнии импульсом 1,2/50 с использованием ОПН

Амплитуда волны, кА	Хар-ка имп. Мкс	Кол-во ОПН по линии	Энергия, выделяемая на ОПН, кДж					Напряжение на вводе питания, кВ	Напряжение на устройствах, кВ	
			Место установки разрядников по линии, м							
			0	400	800	120	1600			Вводное
100	1,2/50	-							542,4	45
		-						Разр.	127,2	18
		1 по лин.	Разр.					Разр.	70,8	11,6
		1 по лин.			Разр.			Разр.	74,6	11,8
		1 по лин.					Разр.	Разр.	78,3	12
		2 по лин.	Разр.				Разр.	2,8	64,1	10,8
		2 по лин.	Разр.		Разр.			2,8	62,5	10,5
		2 по лин.			Разр.		Разр.	2,8	66,7	11
		3 по лин.	Разр.		Разр.		2,8	1,6.	58,9	10
		5 по лин.	Разр.	Разр.	Разр.	3,1	2,4	1,2	49,8	9,8

питания в РШ, а также напряжения на подключенных устройствах ЖАТ.

Анализ результатов показывает, что установка одного ОПН снижает напряжение на вводе до порядка 70–80 кВ, однако сопровождается разрушением аппарата вследствие превышения допустимой энергонагрузки. При увеличении числа ОПН до трех — пяти наблюдается дальнейшее снижение остаточного напряжения до 49–60 кВ, а напряжение на защищаемых устройствах уменьшается до 9–12 кВ. Снижение амплитуды по сравнению с незащищенным режимом превышает 85–90 %.

При этом распределение энергии остается неравномерным: первые по линии ОПН воспринимают наибольшую нагрузку и разрушаются. Таким образом, для импульса 1,2/50 достигается эффективное ограничение напряжения, однако устойчивость защитной системы ограничена из-за перегрузки средств защиты.

В табл. 2 представлены результаты моделирования при воздействии импульса тока амплитудой 100 кА с характеристикой 8/20 мкс для тех же вариантов равномерной установки ОПН. В таблице приведены значения энергии, выделяемой в аппаратах, а также максимальные напряжения на вводе питания и на под-

ключаемых устройствах. Это позволяет сопоставить эффективность защиты при импульсе иной временной формы и оценить влияние длительности токовой составляющей на энергонагрузку.

Согласно полученным данным, при установке 3–5 ОПН напряжение на вводе снижается до 37–56 кВ, а на защищаемых устройствах — до 8,6–10,4 кВ. По сравнению с исходным уровнем напряжения снижение достигает 85–90 %. Разрушение средства защиты фиксируется преимущественно при малом их количестве.

По сравнению с импульсом 1,2/50 наблюдается более устойчивый режим работы системы. Это объясняется меньшей интегральной энергией импульса 8/20 и более короткой длительностью токовой составляющей, что снижает тепловую нагрузку на варисторные элементы [18].

В табл. 3 приведены результаты моделирования при воздействии импульса тока амплитудой 100 кА с характеристикой 10/350 мкс. Данный импульс характеризуется значительно большей длительностью и интегральной энергией и используется для оценки устойчивости защитной схемы при энергоемком воздействии [19].

ТАБЛИЦА 2. Результаты численного моделирования при ударе молнии импульсом 8/20 с использованием ОПН

Амплитуда волны, кА	Хар-ка имп. Мкс	Кол-во ОПН по линии	Энергия, выделяемая на ОПН, кДж						Напряжение на вводе питания, кВ	Напряжение на устройствах, кВ
			Место установки разрядников по линии, м							
			0	400	800	1200	1600	Вводное		
100	8/20	–							542,4	45
		–						Разр.	117,1	17,6
		1 по лин.	Разр.					Разр.	60,3	10,3
		1 по лин.			Разр.			Разр.	64,5	10,5
		1 по лин.					Разр.	Разр.	68,2	11,4
		2 по лин.	Разр.				Разр.	2,4	54,8	10,3
		2 по лин.	Разр.		Разр.			2,3	52,3	10,2
		2 по лин.			Разр.		Разр.	2,5	56,1	10,4
		3 по лин.	Разр.		Разр.		2,8	1,6	45,9	9,4
		5 по лин.	Разр.	Разр.	3,2	2,7	2,4	1,2	37,1	8,6

ТАБЛИЦА 3. Результаты численного моделирования при ударе молнии импульсом 10/350 с использованием ОПН

Амплиту- да волны, кА	Хар-ка имп. Мкс	Кол-во ОПН по линии	Энергия, выделяемая на ОПН, кДж					Напря- жение на вводе пи- тания, кВ	Напря- жение на устрой- ствах, кВ	
			Место установки разрядников по линии, м							
			0	400	800	1200	1600			Вводное
100	10/350	–							562,3	45
		–						Разр.	217,1	27,6
		1 по лин.	Разр.					Разр.	160,3	20,3
		1 по лин.			Разр.			Разр.	164,5	20,5
		1 по лин.					Разр.	Разр.	168,2	21,4
		2 по лин.	Разр.				Разр.	Разр.	154,8	19,3
		2 по лин.	Разр.		Разр.			Разр.	152,3	19,2
		2 по лин.			Разр.		Разр.	Разр.	156,1	19,4
		3 по лин.	Разр.		Разр.		Разр.	Разр.	145,9	19
		5 по лин.	Разр.	Разр.	Разр.	Разр.	Разр.	Разр.	137,1	18,6

Анализ таблицы показывает, что даже при установке пяти ОПН напряжение на вводе остается на уровне порядка 137 кВ, что существенно превышает безопасные значения. Снижение амплитуды по сравнению с незащищенным режимом оказывается значительно менее выраженным, чем для импульсов 1,2/50 и 8/20. Практически все ОПН подвергаются разрушению вследствие превышения допустимой энергонагрузки.

Полученные результаты подтверждают, что при импульсе 10/350 определяющим фактором является интегральная энергия, а не только пиковое значение напряжения. Равномерная установка варисторных ОПН по линии в дан-

ном случае не обеспечивает требуемой устойчивости системы защиты.

В связи с этим представляется целесообразным рассмотреть альтернативный вариант пространственной организации защиты с использованием МКР, обладающих дуговым механизмом ограничения перенапряжения и принципиально иной энергетической устойчивостью.

На рис. 2 показана расстановка МКР по линии для защиты ввода питания в РЩ.

В табл. 4 приведены результаты численного моделирования при воздействии импульса тока амплитудой 100 кА с характеристикой 10/350 мкс при установке МКР по длине линии, при

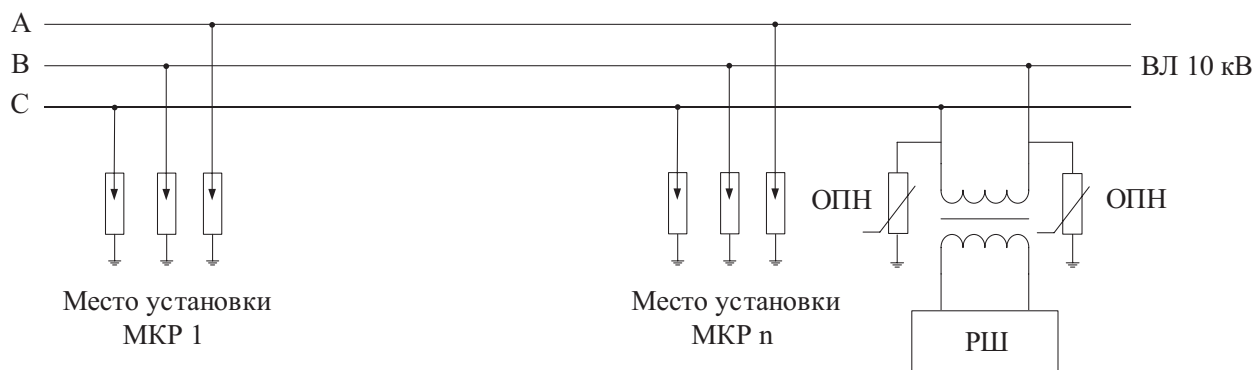


Рис. 2. Установка МКР по линии для защиты ввода питания в РЩ

ТАБЛИЦА 4. Результаты численного моделирования при ударе молнии импульсом 10/350 с использованием МКР

Амплитуда волны, кА	Хар-ка имп. мкс	Кол-во ОПН по линии	Энергия, выделяемая на ОПН, кДж						Напряжение на вводе питания, кВ	Напряжение на устройствах, кВ	
			Место установки разрядников по линии, м								
			0	400	800	1200	1600	Вводное			
100	10/350	–							562,3	45	
		–						Разр.	217,1	27,6	
		1 по лин.	МКР.						3,2	48,6	9,6
		1 по лин.			МКР.				3,3	49,5	9,7
		1 по лин.					МКР		3,5	51,2	9,8
		2 по лин.	МКР					МКР	1,1	13,8	0,4
		2 по лин.	МКР			МКР.			1,2	12,3	0,4
		2 по лин.				МКР		МКР	1,3	14,1	0,4

этом ОПН непосредственно у ввода питания в РШ остается — для сглаживания остаточного импульса.

Анализ данных табл. 4 показывает, что применение МКР обеспечивает эффективное ограничение перенапряжения при импульсе тока 100 кА с характеристикой 10/350 мкс. Уже при установке одного МКР напряжение на вводе питания снижается до 48–51 кВ, что соответствует существенному уменьшению по сравнению с незащищенным режимом, но при этом данные напряжения все еще остаются опасными для устройств, поэтому установка одного МКР по линии является недостаточной.

При установке двух МКР напряжение на вводе дополнительно снижается до 12–14 кВ. Указанный уровень полностью соответствует требованиям электромагнитной устойчивости устройств ЖАТ и не приводит к пробое изоляции или повреждению вторичных цепей. Напряжение на защищаемых устройствах при этом находится на допустимом уровне

Распределение энергии между разрядниками носит устойчивый характер и не приводит к их разрушению. Энергия не концентрируется в одном аппарате, а перераспределяется между несколькими МКР, что подтверждает их способность воспринимать энергоемкий импульс без потери работоспособности.

Таким образом, равномерная установка МКР по линии обеспечивает снижение оста-

точного напряжения до безопасного уровня даже при воздействии импульса 10/350, что подтверждает высокую энергетическую устойчивость дугового механизма ограничения.

Результаты исследования защищенных подходов при серийных ударах молнии

Несмотря на полученные положительные результаты для одиночного импульса 10/350, в реальных условиях грозное воздействие нередко носит серийный характер и включает несколько последовательных разрядов с различной амплитудой и временными параметрами [20]. В этом случае защитная система работает в условиях повторной нагрузки, а определяющим фактором становится накопление энергии в аппаратах и изменение их состояния между импульсами.

В табл. 5 приведены результаты моделирования при воздействии серии ударов молнии. Рассматривалась последовательность импульсов, включающая первый удар повышенной амплитуды и последующие импульсы меньшей величины.

Анализ данных табл. 5 показывает, что при серийном воздействии установка двух МКР оказывается недостаточной: уровень остаточного напряжения на вводе питания остается высоким, что приводит к перегрузке ОПН и его разрушению. Таким образом, даже при

ТАБЛИЦА 5. Результаты численного моделирования при серийном ударе молнии с использованием МКР

Амплитуда волны, кА	Хар-ка имп. Мкс	Кол-во ОПН по линии	Энергия, выделяемая на ОПН, кДж						Напряжение на вводе питания, кВ	Напряжение на устройствах, кВ
			Место установки разрядников по линии							
			1	2	3	4	5	ОЛ		
		-							637,3	55
		-						Разр.	417,1	39,3
100	10/350	1 по лин.	МКР.					Разр.	215,6	27,5
50	1,2/50	1 по лин.			МКР.			Разр.	217,2	27,6
40	1,2/50	1 по лин.					МКР	Разр.	223,3	27,8
30	1,2/50	2 по лин.	МКР				МКР	Разр.	126,8	18
20	1,2/50	2 по лин.	МКР		МКР.			Разр.	124,3	18,1
		2 по лин.			МКР		МКР	Разр.	128,1	18,2
		Защ. подход						1,1	13,3	0,4

наличии дуговых устройств по линии сохраняется критический режим для варисторного ограничителя на вводе, поскольку на него поступает волна перенапряжения, превышающая допустимый энергетический ресурс.

Следовательно, для устойчивой защиты при серийных ударах требуется иной принцип пространственной организации — не только ограничение в нескольких точках линии, но и формирование зоны локального демпфирования непосредственно перед вводом питания (защищенного подхода), обеспечивающей снижение амплитуды и энергии волны до уровня, безопасного для ОПН и вторичных цепей. Защищенный подход представляет собой установку МКР на четырех ближайших опорах

к вводу питания в РШ. На рис. 3 показано формирование защищенного подхода к вводу питания в РШ.

Результаты моделирования показывают, что при формировании защищенного подхода, предусматривающего установку четырех МКР на ближайших к вводу питания опорах, характер волнового процесса принципиально изменяется. Последовательное включение разрядников на коротком участке линии приводит к ступенчатому ограничению перенапряжения и существенному снижению амплитуды волны до ее поступления на ОПН, установленный на вводе питания.

Согласно данным табл. 5, в данном варианте максимальное напряжение на вводе питания

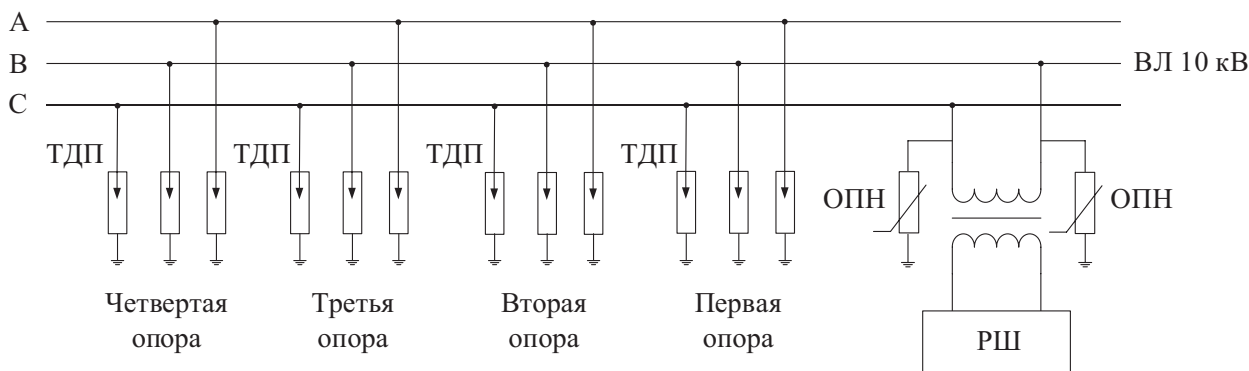


Рис. 3. Формирование защищенного подхода к вводу питания в РШ

не превышает безопасных значений для оборудования ЖАТ, а энергетическая нагрузка на ОПН остается в пределах его допустимого ресурса. Разрушение аппаратов не фиксируется. При этом напряжение на защищаемых вторичных устройствах находится на уровне, исключающем пробой изоляции и отказ аппаратуры.

Таким образом, формирование защищенного подхода обеспечивает не только снижение амплитуды перенапряжения, но и перераспределение энергии импульсного воздействия между несколькими дуговыми устройствами, что предотвращает перегрузку ОПН на вводе. Полученные результаты подтверждают, что пространственная концентрация средств защиты в непосредственной близости от защищаемого объекта является необходимым условием обеспечения устойчивости системы при серийных ударах молнии.

Заключение

В результате численного моделирования установлено, что эффективность защиты ввода питания устройств ЖАТ существенно зависит от временной формы грозового импульса и способа размещения защитных аппаратов на линии. При воздействии импульсов 1,2/50 и 8/20 мкс равномерная установка ОПН по длине ВЛ АБ 10 кВ обеспечивает снижение остаточного напряжения на вводе питания и на защищаемых устройствах. Однако такая схема не обеспечивает равномерного распределения энергии между средствами защиты: первые по направлению распространения волны ОПН воспринимают наибольшую нагрузку и могут разрушаться.

При воздействии энергоемкого импульса 10/350 мкс равномерная установка варисторных ОПН по линии оказывается недостаточной. Даже увеличение числа средств защиты не исключает превышения допустимой энергетической нагрузки и не обеспечивает снижения напряжения на вводе питания до требуемого уровня. Это показывает ограниченность схем защиты, построенных только на применении ОПН, при прямых и энергоемких грозовых воздействиях.

Показано, что применение МКР на подходе к вводу питания позволяет существенно повысить устойчивость системы защиты. В отличие от ОПН МКР обеспечивают дуговой ме-

ханизм отвода импульсной энергии и позволяют снизить нагрузку на вводной ОПН. При одиночном воздействии 10/350 мкс установка двух МКР на линии обеспечивает значительное снижение остаточного напряжения и предотвращает разрушение вводного ограничителя.

При серийных ударах молнии определяющим фактором становится не только амплитуда перенапряжения, но и накопление энергии во вводном ОПН при повторных импульсных воздействиях. Расчеты показали, что схемы с ограниченным числом МКР на линии не всегда обеспечивают устойчивый режим защиты вводов питания устройств ЖАТ. Наиболее эффективным является формирование защищенного подхода, предусматривающего установку МКР на ближайших к защищаемому объекту опорах ВЛ АБ. Такая конфигурация обеспечивает поэтапное ограничение грозовой волны, перераспределение импульсной энергии между несколькими дуговыми средствами защиты и снижение энергетической нагрузки на вводной ОПН до допустимого уровня.

Полученные результаты подтверждают, что защита вводов питания устройств ЖАТ должна рассматриваться не как локальная установка одного средства защиты у объекта, а как задача пространственного размещения средств защиты на участке линии, примыкающем к вводу питания. Дальнейшие исследования целесообразно направить на экспериментальную проверку предложенной схемы защищенного подхода на физической модели или полигонном участке. ▲

Список источников

1. Соловьёв А.Д., Манаков А.Д. Анализ воздействия атмосферных перенапряжений на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики // Автоматика на транспорте. 2025. Т. 11, № 4. С. 287–302. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-287-302. EDN MYPJAE
2. Соловьёв А.Д., Манаков А.Д. Волновые процессы при воздействии молнии в высоковольтной линии автоблокировки 10 кв // Автоматика на транспорте. 2026. Т. 12, № 1. С. 56–72. DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-01-56-72. EDN LEQTWD
3. Манаков А.Д., Балуев Н.Н. Усиление защиты вводов питания устройств железнодорожной автоматики и телемеханики при близких грозовых разрядах // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2011. № 1 (26). С. 73–80. EDN NTZCCD

4. Rakov V.A., Uman M.A. *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 687 p.
5. Malcolm N., Aggarwal R.K. The Impact of Multiple Lightning Strokes on the Energy Absorbed by MOV Surge Arresters in Wind Farms During Direct Lightning Strikes // *Renewable Energy*. 2015. Vol. 83. Pp. 1305–1314. DOI: 10.1016/j.renene.2015.05.010
6. Efficient Procedure to Evaluate Electromagnetic Transients: Transmission Line Model Based on Lumped Elements and State-Space Techniques / E.C.M. Costa [et al.] // *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2010. DOI: 10.1049/iet-gtd.2009.0660
7. *Power System Transients: Theory and Applications* / A. Ametani [et al.]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. 600 p.
8. Mamiş M.S., Nacaroglu A. Transient Voltage and Current Distributions on Transmission Lines // *IEE Proceedings — Generation, Transmission and Distribution*. 2002. Vol. 149, no. 6. Pp. 705–712. DOI: 10.1049/ip-gtd:20020625
9. Hosseini S.M.A., Mohammadirad A., Akmal A.A. Surge Analysis on Wind Farm Considering Lightning Strike to Multi-Blade // *Renewable Energy*. 2022. Vol. 186. Pp. 312–326. DOI: 10.1016/j.renene.2021.12.061
10. Grcev L. Impulse Efficiency of Ground Electrodes // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2009. Vol. 24, no. 1. Pp. 441–451. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.923396
11. Diagnostic Analysis and Protective Measures of Transient Ground Potential Rise in a 1000 kV UHV Substation / F. Pang [et al.] // *The Journal of Engineering*. 2018. No. 17. Pp. 1670–1674. DOI: 10.1049/joe.2018.8638
12. Gustavsen B., Semlyen A. Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1999. Vol. 14, no. 3. Pp. 1052–1061. DOI: 10.1109/61.772353
13. Lee B.-H., Joe J.-H., Choi J.-H. Simulations of Frequency-dependent Impedance of Ground Rods Considering Multi-layered Soil Structures // *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2009. Vol. 4, no. 4. Pp. 531–537. DOI: 10.5370/JEET.2009.4.4.531
14. On the Computation of the Voltage Distribution along the Non-Linear Resistor of Gapless Metal Oxide Surge Arresters / C.A. Christodoulou [et al.] // *Energies*. 2018. Vol. 11, no. 11. Art. 3046. DOI: 10.3390/en11113046
15. Quality Assessment of Low Voltage Surge Arresters / L.S. Litzbarski [et al.] // *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. Pp. 129313–129321. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3226401
16. Бельский Р.А., Фролов В.Я., Подпоркин Г.В. Электрическая прочность разрядника для молниезащиты линий 6–35 кВ при грозовых перенапряжениях // *Записки Горного института*. 2018. Т. 232. С. 401–406. DOI: 10.31897/PMI.2018.4.401
17. Shampine L.F., Reichelt M.W. The MATLAB ODE Suite // *SIAM Journal on Scientific Computing*. 1997. Vol. 18, no. 1. Pp. 1–22. DOI: 10.1137/S1064827594276424
18. Critical Insight into Performance Requirements and Test Methods for Surge Protective Devices Connected to Low-Voltage Power Systems / T.E. Tsovilis [et al.] // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021. Vol. 36, no. 5. Pp. 3055–3064. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3032763
19. Lightning Performance Analysis of a Rooftop Grid-Connected Solar Photovoltaic Without External Lightning Protection System / M.S.M. Nasir [et al.] // *PLOS ONE*. 2019. Vol. 14, no. 7. Art. e0219326. DOI: 10.1371/journal.pone.0219326
20. Rakov V.A. A Review of Positive and Bipolar Lightning Discharges // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2003. Vol. 84, no. 6. Pp. 767–776. DOI: 10.1175/BAMS-84-6-767

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH. 2026. Vol. 12, no. 2, pp. 114–127
DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-02-114-127

Protected Approaches to Power Supply Inputs of Railway Automation and Remote Control Devices under Lightning Strikes

Information about authors

Solov'yov A. D., Postgraduate Student of the "Automation and Remote Control on Railways" Department; e-mail: Shura.Solovyov.01@mail.ru

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

Abstract: the article addresses the protection of power supply inputs of railway automation and remote-control devices against lightning overvoltages propagating along 10 kV overhead autoblocking lines. It is shown that during

direct and repeated lightning strikes, the surge arrester installed directly at the protected facility may be subjected to unacceptable current and energy loads, which reduces the stability of the protection system. To investigate these processes, an integrated mathematical model of the system "overhead line – power supply input – protective devices" has been developed, including a three-phase distributed-parameter line model, a lightning impact source based on the Heidler function, a relay cabinet power supply input model, a frequency-dependent grounding system model, and nonlinear models of surge arresters and multi-chamber arresters. The numerical implementation of the model was carried out in MATLAB. Computational experiments were performed for single and multiple lightning strikes under various protected-approach configurations and different arrangements of protective devices along the line. It was found that the uniform installation of surge arresters along the line does not provide the required stability under high-energy 10/350 μ s impulses due to the exceedance of the permissible energy load of the devices. It is shown that the use of multi-chamber arresters makes it possible to significantly reduce

the voltage at the power supply input and the load on the input surge arrester. The results obtained confirm the promise of spatially organized protection schemes that provide step-by-step limitation of the lightning wave and redistribution of impulse energy among several devices under single and multiple lightning strikes.

Keywords: lightning strike, mathematical model, protected approaches, impulse overvoltages, railway automation and remote control

References

- Solov'yov A. D., Manakov A. D. Analiz vozdeystviya atmosferykh perenapryazhenij na ustrojstva zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki [Analysis of the Impact of Atmospheric Overvoltages on Railway Automation and Telemechanics Devices], *Avtomatika na transporte [Transport Automation Research]*, 2025, vol. 11, no. 4, pp. 287–302. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-287-302. EDN MYPJAE (In Russian)
- Solov'yov A. D., Manakov A. D. Volnovye protsessy pri vozdeystvii molnii v vysokovol'noy linii avtoblokirovki 10 kV [Wave Processes under Lightning Impact in a 10 kV High-Voltage Automatic Block Signalling Line], *Avtomatika na transporte [Transport Automation Research]*, 2026, vol. 12, no. 1, pp. 56–72. DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-01-56-72. EDN: LEQTWD (In Russian)
- Manakov A. D., Baluev N. N. Usilenie zashchity vvodov pitaniya ustroystv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki pri blizkikh grozovykh razryadakh [Strengthening the Protection of Power Supply Inputs of Railway Automation and Telemechanics Devices Under Nearby Lightning Discharges], *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]*, 2011, no. 1 (26), pp. 73–80. EDN NTZCCD (In Russian)
- Rakov V. A., Uman M. A. Lightning: Physics and Effects, Cambridge: Cambridge University Press, 2003, 687 p.
- Malcolm N., Aggarwal R. K. The Impact of Multiple Lightning Strokes on the Energy Absorption Capability of MOV Surge Arresters in Wind Farms During Direct Lightning Strikes, *Renewable Energy*, 2015, vol. 83, pp. 1305–1314. DOI: 10.1016/j.renene.2015.05.010
- Costa E. C. M., et al. Efficient Procedure to Evaluate Electromagnetic Transients: Transmission Line Model Based on Lumped Elements and State-Space Techniques, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2010. DOI: 10.1049/iet-gtd.2009.0660
- Ametani A., et al. Power System Transients: Theory and Applications, 2nd ed., Boca Raton: CRC Press, 2013. 488 p.
- Mamiş M. S., Nacaroğlu A. Transient Voltage and Current Distributions on Transmission Lines, *IEE Proceedings — Generation, Transmission and Distribution*, 2002, vol. 149, no. 6, pp. 705–712. DOI: 10.1049/ip-gtd:20020625
- Hosseini S. M. A., Mohammadirad A., Akmal A. A. Surge Analysis on Wind Farm Considering Lightning Strike to Multi-Blade, *Renewable Energy*, 2022, vol. 186, pp. 312–326. DOI: 10.1016/j.renene.2021.12.061
- Grcev L. Impulse Efficiency of Ground Electrodes, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, vol. 24, no. 1, pp. 441–451. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.923396
- Pang F., et al. Diagnostic Analysis and Protective Measures of Transient Ground Potential Rise in a 1000 kV UHV Substation, *The Journal of Engineering*, 2018, no. 17, pp. 1670–1674. DOI: 10.1049/joe.2018.8638
- Gustavsen B., Semlyen A. Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999, vol. 14, no. 3, pp. 1052–1061. DOI: 10.1109/61.772353
- Lee B. H., Joe J.-H., Choi J.-H. Simulations of Frequency-dependent Impedance of Ground Rods Considering Multi-layered Soil Structures, *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2009, vol. 4, no. 4, pp. 531–538. DOI: 10.5370/JEET.2009.4.4.531
- Christodoulou C. A., et al. On the Computation of the Voltage Distribution along the Non-Linear Resistor of Gapless Metal Oxide Surge Arresters, *Energies*, 2018, vol. 11, no. 11, art. 3046. DOI: 10.3390/en11113046
- Litzbarski L. S., et al. Quality Assessment of Low Voltage Surge Arresters, *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 129313–129321. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3226401
- Belskii R. A., Frolov V. Ya., Podporokin G. V. Elektricheskaya prochnost' razryadnika dlya molniezashchity linij 6–35 kV pri grozovykh perenapryazheniyakh [Electrical Strength of an Arrester for Lightning Protection Of 6–35 Kv Lines Under Lightning Overvoltages], *Zapiski Gornogo instituta [Journal of Mining Institute]*, 2018, vol. 229, pp. 30–36. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.30 (In Russian)
- Shampine L. F., Reichelt M. W. The MATLAB ODE Suite, *SIAM Journal on Scientific Computing*, 1997, vol. 18, no. 1, pp. 1–22. DOI: 10.1137/S1064827594276424
- Tsovilis T. E., et al. Critical Insight into Performance Requirements and Test Methods for Surge Protective Devices Connected to Low-Voltage Power Systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, vol. 36, no. 5, pp. 3055–3064. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3032763
- Nasir M. S. M., et al. Lightning Performance Analysis of a Rooftop Grid-Connected Solar Photovoltaic Without External Lightning Protection System, *PLOS ONE*, 2019, vol. 14, no. 7, art. e0219326. DOI: 10.1371/journal.pone.0219326
- Rakov V. A. A Review of Positive and Bipolar Lightning Discharges, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, vol. 84, no. 6, pp. 767–776. DOI: 10.1175/BAMS-84-6-767

ВЫБОР АЛГОРИТМОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЗАДАЧАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И ЛОКАЛИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

БАРАНОВ Леонид Аврамович, доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры «Управление и защита информации»; e-mail: baranov.miit@gmail.com

КУЛАГИН Максим Алексеевич, кандидат техн. наук, доцент кафедры «Управление и защита информации»; e-mail: maksimkulagin06@yandex.ru

ЯНЧЕНКО Герман Олегович, аспирант кафедры «Управление и защита информации»; e-mail: ya@yanchenko.ru

Российский университет транспорта (МИИТ), Москва

Статья посвящена проблеме выбора и обоснования архитектур нейронных сетей для систем технического зрения на железнодорожном транспорте. В условиях цифровой трансформации отрасли важным становится создание надежных интеллектуальных систем поддержки принятия решений, способных работать в режиме реального времени. В работе проведен сравнительный анализ эффективности современных сверточных нейронных сетей и перспективных трансформерных архитектур в задаче семантической сегментации ключевых объектов железнодорожной инфраструктуры. Исследование базируется на специализированном наборе данных, включающем 8203 изображения, полученных с бортовых камер локомотивов в различных погодных и осветительных условиях. Протестированы пять моделей искусственного интеллекта: U-Net, U-Net++, DeepLabV3+, MAnet и SegFormer. Оценка эффективности проводилась по критериям, включающим метрику Mean Intersection over Union, время обработки одного кадра, а также анализ вероятностей ошибок первого (ложная тревога) и второго (пропуск объекта) рода. Экспериментально установлено, что архитектура U-Net++ с энкодером DenseNet-121 обеспечивает наиболее сбалансированные показатели, минимизируя критические пропуски сигналов при высокой точности локализации. Полученные результаты и предложенные критерии оценки позволяют обоснованно подходить к выбору алгоритмов машинного зрения при проектировании автономных систем управления и интеллектуальной системы поддержки принятия решений машинистов путевых машин.

Ключевые слова: семантическая сегментация, сверточные нейронные сети, трансформеры, техническое зрение, железнодорожная инфраструктура, искусственный интеллект

DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-02-128-137

▼ Введение

Современный этап развития транспортного комплекса Российской Федерации характеризуется масштабной цифровой трансформацией. Согласно стратегическим направлениям в области цифровой трансформации науки и высшего образования¹, внедрение технологий искусственного интеллекта (ИИ) является приоритетным вектором развития высокотехнологичных отраслей. Внедрение цифровых технологий и развитие интеллектуальных транспортных систем (ИТС) являются ключевыми направлениями модернизации железно-

дорожной отрасли. В современной литературе уделяется значительное внимание вопросам автоматизации технологических процессов [1] и роботизации инфраструктуры [2], а также перспективам перехода к автономному вождению [3] и внедрению комплексов автоматизированного управления движением поездов [4].

Одним из основным элементов таких интеллектуальных систем выступают технологии машинного зрения, позволяющие эффективно решать задачи сбора и анализа данных, оценки состояния пути и распознавания объектов [5, 6]. При этом широкое внедрение подобных решений требует особого внимания к вопросам обеспечения функциональной и информационной безопасности: исследователи активно прорабатывают методы защиты

¹ Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации науки и высшего образования: распоряжение Правительства Российской Федерации от 21.12.2021 № 3759-р.

автоматизированных систем управления и объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ) от угроз [7, 8], в том числе с учетом специфики алгоритмов машинного обучения [9]. Также известны работы по созданию и внедрению систем автоматического управления движением поездов внеуличного городского транспорта, магистральных железных дорог, в том числе высокоскоростных пассажирских поездов, развивается новое направление автоматического управления путевых машин [10, 11].

Аппаратные решения и алгоритмы функционирования систем управления зависят от уровня автоматизации [12], требований к безопасности движения, диапазона скоростей и условий эксплуатации. Одним из требований, предъявляемых к автоматическим системам управления подвижным составом, является определение свободности пути следования подвижного состава, что делает необходимым использовать системы технического зрения (СТЗ). Соответствующие исследования ведутся в ряде организаций: РУТ (МИИТ), АО «ВНИИЖТ», АО «НИИАС». Аналогичными разработками занимаются зарубежные компании (Siemens Mobility, Alstom, Thales, Stadler) [13].

Концепция построения подсистемы технического зрения для интеллектуальной системы поддержки принятия решений (ИСППР) для автоматического управления путевых машин рассмотрена в [10]. В рамках данной статьи описывается задача семантической сегментации, решение которой осуществляется с помощью моделей ИИ. В большинстве существующих исследований для сегментации железнодорожной инфраструктуры применяются сверточные нейронные сети (CNN) [14, 15]. Развитие ИИ привело к появлению новых архитектур нейронных сетей (НС), использующих трансформеры (transformers). В отличие от сверточных НС, работающих с локальными признаками, трансформерные НС используют механизмы глобального внимания (global attention), что позволяет эффективнее учитывать контекст всей сцены при попиксельной классификации. Исследование эффективности такого подхода в условиях управления движением подвижных единиц железнодорожного транспорта является актуальным.

Для оценки качества функционирования подсистем технического зрения используются два следующих статистических критерия:

- ошибка первого рода (α) — вероятность того, что препятствие находится на пути при его фактическом отсутствии (ложная тревога);
- ошибка второго рода (β) — вероятность сигнала об отсутствии препятствия при фактическом его наличии (пропуск сигнала).

Целью данной работы является научно обоснованный выбор и верификация архитектуры НС для интеграции в подсистему технического зрения ИСППР на железнодорожном транспорте.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решаются следующие задачи:

1. Подобрать из открытых источников специализированный набор данных, содержащий изображения с бортовых камер локомотивов в различных погодных условиях и при разной освещенности.

2. Реализовать и обучить современные сверточные (U-Net, U-Net++, DeepLabV3+, MAnet) и трансформерные (SegFormer) архитектуры НС для задачи семантической сегментации объектов железнодорожного пути.

3. Провести сравнительный анализ эффективности исследуемых моделей ИИ по комплексному критерию, включающему Mean Intersection over Union (mIoU), время обработки одного кадра, вероятности ошибок первого и второго рода.

4. Выявить наиболее сбалансированную архитектуру НС, обеспечивающую минимальный уровень критических ошибок при сохранении требуемого быстродействия в режиме реального времени.

Методология решения задачи, используемый инструментарий

Решение задачи семантической сегментации в НС базируется на архитектурном шаблоне «энкодер-декодер» (encoder-decoder), который позволяет преобразовывать входное изображение в попиксельную карту классов.

- Энкодер (encoder) — это часть нейронной сети, отвечающая за блок формирования признаков (backbone). Его задача заключается в постепенном сжатии входного

изображения и извлечении из него высокоуровневой семантической информации. В процессе обработки в энкодере происходит уменьшение пространственного разрешения (размера картинка) и увеличение количества каналов, что позволяет сети «понимать», какие именно объекты находятся в кадре (например, рельсы или поезд), игнорируя фоновые шумы.

- Декодер (decoder) — это восстанавливающая часть сети. Его задача — перенести извлеченные энкодером признаки обратно в исходное пространственное разрешение изображения. Декодер сопоставляет накопленную семантическую информацию с конкретными координатами пикселей, что позволяет точно локализовать границы объектов инфраструктуры.

В данном исследовании в качестве энкодеров рассматриваются следующие семейства архитектур: ResNet [16], EfficientNet [17] и DenseNet [18]. Применение НС, предварительно обученных на больших наборах данных, реализует механизм обучения (transfer learning), что позволяет ускорить процесс настройки моделей ИИ.

Сравнительный анализ эффективности попиксельной классификации проводился для сверточных нейронных сетей U-Net [19], U-Net++ [20], DeepLabV3+ [21] и MAnet [22]. Наряду с классическими сверточными решениями в данной работе рассматривается современная трансформерная архитектура SegFormer [23]. Выбранный набор моделей ИИ позволяет оценить эффективность различных архитектурных решений в задачах семантической сегментации для СТЗ на железнодорожном транспорте.

Для проведения имитационного моделирования функционирования моделей ИИ использовался программный набор на базе языка программирования Python и библиотеки глубокого обучения PyTorch. Проектирование и обучение моделей семантической сегментации осуществлялось с применением открытой библиотеки segmentation_models.pytorch, которая предоставляет унифицированный интерфейс для интеграции различных НС и архитектурных компонентов. Все расчеты производились с использованием программно-аппаратной архитектуры CUDA на графическом ускорителе NVIDIA

RTX A5000 с вычислительной мощностью по количеству операций в секунду 27,8 TFLOPS и объемом видеопамати (VRAM) 24 Гб.

Описание данных и подготовка эксперимента

Для обучения и тестирования моделей ИИ использовался специализированный набор данных RailDataSets от Санкт-Петербургского филиала АО «НИИАС» [24], сформированный на основе видеопотоков с бортовых камер локомотивов, работающих в реальных условиях эксплуатации. Общий объем выборки составил 8203 изображения.

Данные для проведения имитационных экспериментов содержат попиксельную разметку для трех классов объектов, значимых для функционирования СТЗ и ИСППР:

1. Путь движения подвижного состава (MainRailPolygon) — область рельсового полотна, по которому движется локомотив.
2. Соседние пути движения (AlternativeRailPolygon) — смежные железнодорожные пути.
3. Поезда (Train) — вагоны и локомотивы, находящиеся в зоне видимости.

В рамках предобработки данных все исходные изображения приводились к единому разрешению 512×512 пикселей. Выбор данного геометрического размера входного слоя продиктован необходимостью последующей экспериментальной проверки качества функционирования ИСППР с применением реального бортового вычислительного устройства. Его специфика заключается в ограничениях по объему VRAM, который распределяется не только на модель семантической сегментации, но и на другие задачи, решаемые системой. Разрешение 512×512 пикселей является максимально возможным для используемого бортового вычислительного устройства, что гарантирует обработку видеопотока в режиме реального времени без превышения лимитов памяти и возникновения ошибок нехватки ресурсов.

Для увеличения числа обучающей выборки проведена аугментация исходных данных: случайное изменение яркости и контрастности, а также внесение геометрических искажений. Выборка была разделена в пропорции: 80 % — обучающая, 10 % — валидационная и 10 % — тестовая.

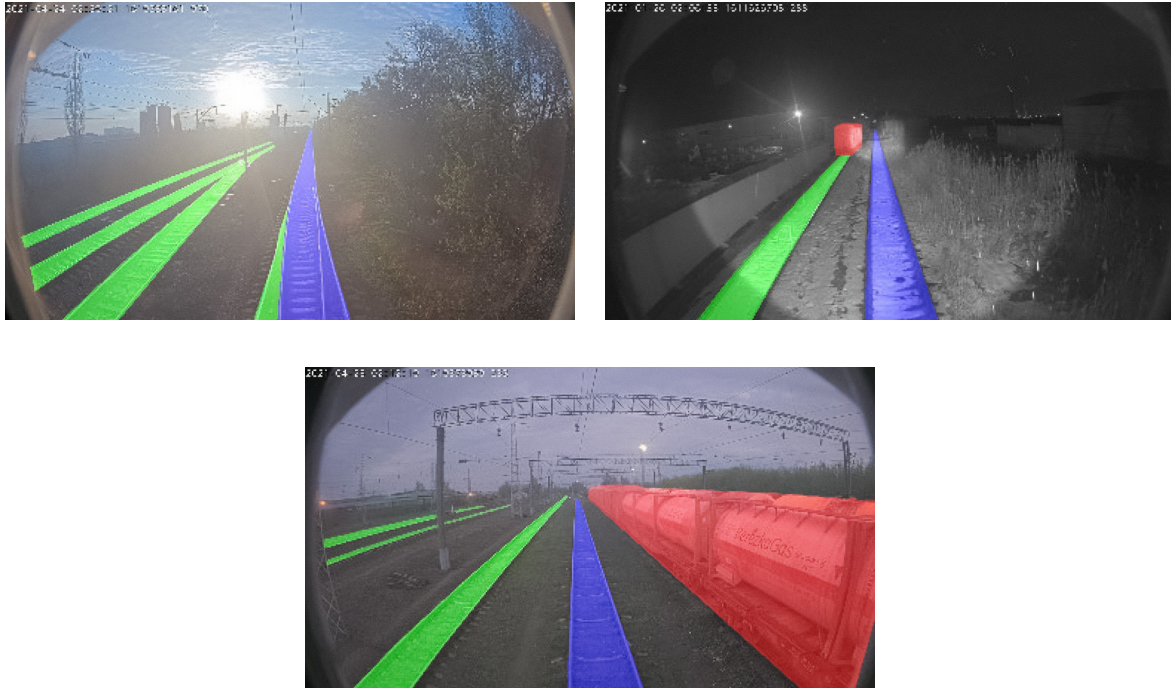


Рис. 1. Примеры изображений из набора данных с попиксельной разметкой (синий — MainRailPolygon, зеленый — AlternativeRailPolygon, красный — Train)

Имитационные эксперименты и их результаты

Оценка критериев качества моделей семантической сегментации проводилась с использованием метрики Intersection over Union (IoU), также известной как индекс Жаккара. Данная метрика определяет степень перекрытия предсказанной маски (A_i) и эталонной разметки (B_i):

$$IoU_i = \frac{|A_i \cap B_i|}{|A_i \cup B_i|}, \quad (1)$$

где i — номер класса.

Для оценки качества функционирования моделей ИИ по всем классам объектов, опи-

санных выше, использовалось усреднение значения метрики IoU (2):

$$mIoU = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N IoU_i, \quad (2)$$

где N — число классов.

Для оценки влияния архитектуры энкодера на характеристики моделей был проведен анализ по единой методике для всех исследуемых архитектур. В качестве примера в табл. 1 представлены результаты для архитектуры U-Net++, демонстрирующие зависимость качества сегментации, времени обработки одного кадра и объема модели (количество обучаемых параметров) от выбора энкодера.

ТАБЛИЦА 1. Влияние выбора энкодера на характеристики архитектуры U-Net++

Энкодер	Параметры, млн	Время обработки одного кадра, мс	IoU MainRail	IoU AlternativeRail	IoU Train	mIoU
ResNet-34	26	9,39	0,873	0,685	0,763	0,774
ResNet-101	68	20,13	0,861	0,699	0,773	0,778
EfficientNet-b2	10	20,05	0,868	0,674	0,763	0,768
EfficientNet-b4	21	32,67	0,887	0,699	0,790	0,792
DenseNet-121	30	31,51	0,898	0,721	0,796	0,805
DenseNet-201	48	38,83	0,901	0,716	0,797	0,805

Аналогичный анализ был выполнен для всех архитектур. Для DeepLabV3+ тестирование с энкодерами семейства DenseNet технически не осуществлялось ввиду ограничений совместимости в используемой реализации библиотеки `segmentation_models.pytorch`. Для трансформерной архитектуры SegFormer применялись специализированные энкодеры на базе MiT (Mix Transformer) [23].

По результатам, представленным в табл. 1, можно сделать следующие выводы:

1. Рост числа параметров энкодера не гарантирует пропорционального улучшения качества: EfficientNet-b2 (10 млн параметров) показывает $mIoU = 0,768$, уступая ResNet-34 (26 млн, $mIoU = 0,774$).

2. Архитектуры на базе DenseNet демонстрируют наилучшее качество сегментации.

3. Увеличение глубины энкодера (ResNet-34 \rightarrow ResNet-101) дает незначительный прирост $mIoU (+0,004)$ при росте времени обработки кадра более чем в 2 раза.

4. Лучшей комбинацией для архитектуры U-Net++ является связка с DenseNet-121.

По описанной методике был проведен анализ влияния выбора энкодера для всех пяти исследуемых архитектур. Сводные результаты, отражающие лучшие конфигурации каждой архитектуры по критериям, представлены в табл. 2 и 3.

Для детальной оценки качества сегментации проведен анализ значений критерия IoU по отдельным классам объектов. На рис. 2 представлены результаты для конфигураций моделей, отобранных по критерию $mIoU$ (табл. 2).

На рис. 2 представлены значения IoU по классам объектов для каждого типа архитектуры моделей с наилучшими значениями критерия $mIoU$. Согласно графику, наименьшее качество сегментации зафиксировано для класса `AlternativeRailPolygon` ($0,66-0,74$), что свидетельствует о его наибольшей сложности для распознавания всеми

ТАБЛИЦА 2. Лучшие конфигурации каждой архитектуры по критерию качества ($mIoU$)

Архитектура	Энкодер	Параметры, млн	$mIoU$
U-Net	DenseNet-201	28	0,769
U-Net++	DenseNet-121	30	0,805
DeepLabV3+	EfficientNet-b4	18	0,765
MANet	DenseNet-201	133	0,791
SegFormer	mit-b2	27	0,804

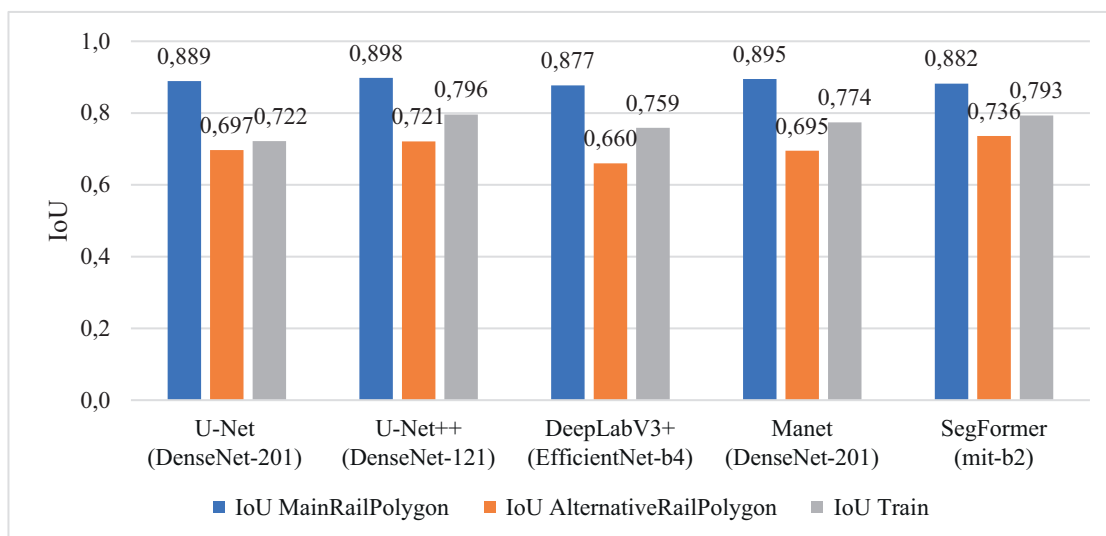


Рис. 2. Значения критерия качества сегментации по классам объектов для исследуемых архитектур

ТАБЛИЦА 3. Лучшие конфигурации каждой архитектуры по критерию времени обработки одного кадра

Архитектура	Энкодер	Параметры, млн	Время обработки одного кадра, мс	mIoU
U-Net	ResNet-34	24	8,10	0,764
U-Net++	ResNet-34	26	9,39	0,774
DeepLabV3+	ResNet-34	22	7,02	0,753
MAnet	ResNet-34	32	11,00	0,764
SegFormer	mit-b2	27	21,48	0,804

архитектурами. Остальные классы, в частности MainRailPolygon и Train, определяются моделью увереннее.

Помимо качества сегментации, важным требованием к моделям ИИ в составе бортовых СТЗ является скорость обработки одного кадра, определяющая возможность работы с видеопотоком в режиме реального времени. В табл. 3 представлены лучшие конфигурации каждой архитектуры, отобранные по минимальному времени обработки одного кадра. Данные результаты позволяют оценить компромисс между точностью и временем обработки одного кадра для использования моделей на бортовых вычислительных устройствах.

Анализ данных, представленных в табл. 3, показывает, что использование энкодера ResNet-34 позволяет достичь минимального времени обработки одного кадра (7–11 мс) для всех сверточных архитектур. Наилучшей по времени обработки одного кадра является модель DeepLabV3+ с энкодером ResNet-34 (7,02 мс), что делает данную конфигурацию предпочтительной для систем с жесткими требованиями к времени работы. Архитектура SegFormer при времени обработки одного кадра 21,48 сохраняет качество сегментации на уровне лидера по точности сегментации (mIoU = 0,804).

По данным из табл. 2 и 3 можно сделать следующие выводы:

1. Лидерами по качеству сегментации оказались модели архитектуры Unet++, SegFormer и MaNet. При использовании энкодеров типа DenseNet наблюдается наилучшее качество работы, однако время обработки одного кадра возрастает по сравнению с другими рассмотренными энкодерами.

2. Повышение числа обучаемых параметров у энкодеров приводит к увеличению качества работы моделей ИИ, но иногда это увеличение незначительно. Время обработки одного кадра при этом может возрастать в 1,5–2 раза.

3. По полученным данным сверточная модель архитектуры U-Net++ с энкодером DenseNet-121 показала себя лидером по критерию mIoU (0,805), в то же время трансформерная модель SegFormer с энкодером mit-b2 демонстрирует практически идентичное значение mIoU (0,804). Модель SegFormer (mit-b2) достигает таких значений при меньшем количестве обучаемых параметров (27 млн), чем U-Net++ (DenseNet-121) с 30 млн параметров. Модель U-Net++ (DenseNet-121) обрабатывает один кадр в среднем за 31,51 мс, у модели SegFormer время обработки составляет 21,48 мс.

Анализ результатов, представленных выше, позволяет перейти от оценки качества сегментации к оценке применимости моделей ИИ в составе бортовых СТЗ железнодорожного подвижного состава. Используя данные о качестве сегментации (mIoU) моделей и времени обработки одного кадра, для дальнейшего исследования в составе ИСППР были отобраны три архитектуры:

1. U-Net++ (backbone: DenseNet-121) выбрана как архитектура, показавшая наивысшие критерии качества.

2. SegFormer (backbone: mit-b2) включена в анализ как современная альтернатива классическим сверточным сетям на базе трансформеров. Модель продемонстрировала сопоставимый с лидером уровень качества.

3. DeepLabV3+ (backbone: Resnet-34) выбрана как наиболее быстродействующая модель из рассмотренных.

Методология оценки эксплуатационной надежности в составе ИСППР

В рамках разработки ИСППР машиниста специальной путевой машины [10] критерии качества семантической сегментации (IoU, mIoU) недостаточно для полной оценки безопасности системы. Учитывая известные трудности формирования матрицы штрафов, в качестве характеристик, существенно определяющих качество работы системы, будем считать вероятности α - и β -ошибок.

Для расчета вероятностей ошибок была собрана тестовая выборка из 1000 изображений, содержащих препятствия на пути. Используемый алгоритм обнаружения препятствий является предварительным и служит только для сравнения архитектур сегментации в одинаковых условиях. Все модели тестировались при одинаковых настройках обработки. Показатели вероятностей ошибок, приведенные в табл. 4, достаточно высокие, так как разработка всей системы находится на начальном этапе и не проводилась полная настройка всех ее компонентов. Тем не менее разница в результатах между моделями позволяет объективно сравнить их эксплуатационную надежность. В табл. 4 приведены расчетные значения вероятностей возникновения α - и β -ошибок для отобранных архитектур. Эти данные позволяют оценить не только качество сегментации, но и потенциальные риски при эксплуатации моделей ИИ в составе систем безопасности.

ТАБЛИЦА 4. Ошибки первого и второго рода для отобранных моделей

Архитектура	α -ошибка	β -ошибка
U-Net++	0,36	0,37
DeepLabV3+	0,29	0,39
SegFormer	0,20	0,43

Анализ результатов, представленных в табл. 4, дает возможность определить перспективы внедрения конкретных ИИ-моделей в состав ИСППР:

1. Архитектура U-Net++ показала себя как наиболее надежное решение с точки зрения минимизации β -ошибки. Поскольку в железнодорожной сфере пропуск объекта на пути

представляет наибольшую угрозу, данная модель является приоритетной для алгоритмов обнаружения препятствия.

2. Модель SegFormer продемонстрировала самую низкую вероятность α -ошибки, что означает минимальное число ложных срабатываний. Данное свойство важно для систем мониторинга, целью которых является исключение необоснованных задержек в движении поездов. Тем не менее риск пропуска сигнала у данной архитектуры остается значительным.

Заключение

Проведенное исследование посвящено сравнительному анализу архитектур сверточных и трансформерных нейронных сетей применительно к задаче локализации элементов железнодорожной инфраструктуры. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при близких показателях качества различных моделей определяющую роль в выборе архитектуры играют конкретные условия эксплуатации и состав требований к системе.

По совокупности критериев, связанных с обеспечением безопасности движения, наиболее перспективной признана связка U-Net++ с энкодером DenseNet-121. Данная конфигурация отличается не только высоким качеством семантической сегментации, но и минимальным среди рассмотренных вариантов уровнем пропусков целевых объектов. Поскольку для бортовых систем предупреждения столкновений снижение вероятности ошибки второго рода является приоритетным, именно эта архитектура рекомендуется к внедрению в ИСППР.

Там, где критичным требованием выступает минимизация ложных срабатываний, предпочтительным решением является SegFormer. Экспериментально установлено, что трансформерная архитектура демонстрирует наименьший уровень α -ошибки. Сокращение числа ложных срабатываний исключает неоправданные торможения подвижного состава и связанные с ними потери пропускной способности.

В сценариях с жесткими ограничениями по вычислительным ресурсам и времени отклика обоснованным выбором является DeepLabV3+. Время обработки одного кадра

составляет 7,02 мс, что существенно превосходит остальные архитектуры по быстродействию. Показатели сегментации при этом остаются на приемлемом уровне, что делает модель пригодной для применения в системах реального времени.

Таким образом, универсального решения для всех условий эксплуатации не существует, а значит, выбор архитектуры НС должен опираться на комплексный анализ точности локализации, вероятностей ошибок первого и второго рода, а также производительности. Предложенная методика многокритериальной оценки обеспечивает обоснованный подбор алгоритмов под конкретные требования бортового оборудования. ▲

Работа выполнена в рамках государственного задания от 15.01.2026 № 103-00001-26-00 за счет бюджетного финансирования.

Список источников

1. Зелова М.И., Комаров А.В. О применении комплекса автоматизированного управления движением поездов в условиях высокой интенсивности движения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 92–100. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).92-100. EDN WFQNPA
2. Роботизация на железнодорожном транспорте / А.И. Долгий [и др.] // Интеллектуальный транспорт. 2025. Т. 9, № 3 (35). С. 4–32. EDN JCBFIE
3. Шебе Х., Шубинский И.Б., Розенберг Е.Н. Различные подходы к автономному вождению для железных дорог // Надежность. 2025. Т. 25, № 1. С. 4–10. DOI: 10.21683/1729-2646-2025-25-1-4-10. EDN DTBFTK
4. Корнев Д.А. Моделирование сетей передачи данных в интеллектуальной системе управления движением поездов // Известия Транссиба. 2023. № 3 (55). С. 141–154. EDN QICJOC
5. Осипов Д.В. Машинное зрение на транспорте: перспективы и применение // Экономика железных дорог. 2023. № 8. С. 71–75. EDN IAHQWG
6. Тимофеев Е.Н., Ефимов Н.В., Комягин С.А. Подготовка данных для создания цифрового проекта на участок ремонта железнодорожного пути с использованием САУ-ЗД // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2024. Т. 1. С. 116–121. DOI: 10.33764/2618-981X-2024-1-116-121. EDN FQOUYJ
7. Баранов Л.А., Иванова Н.Д., Михалевич И.Ф. Цифровой испытательный стенд анализа безопасности объектов критической информационной инфраструктуры интеллектуальных систем водного транспорта // Надежность. 2025. Т. 25, № 3. С. 50–59. DOI: 10.21683/1729-2646-2025-25-3-50-59. EDN QGPPKI
8. Комплексная безопасность АСУ ТП объектов КИИ железнодорожного транспорта / П.А. Попов [и др.] // Надежность. 2024. Т. 24, № 4. С. 48–57. DOI: 10.21683/1729-2646-2024-24-4-48-57. EDN YKHBOB
9. Баранов Л.А., Сафронов А.И., Сидоренко В.Г. Развитие интеллектуальных систем управления электрическим транспортом // Автоматика, связь, информатика. 2025. № 10. С. 30–32. DOI: 10.62994/AT.2025.10.10.007. EDN BOSBZK
10. Баранов Л.А., Кулагин М.А., Янченко Г.О. Техническое зрение в интеллектуальной системе поддержки принятия решений машиниста специальной путевой машины // Наука и техника транспорта. 2025. № 3. С. 65–69. EDN PZPESY
11. Кулагин М.А., Янченко Г.О. Подходы к определению препятствий на железнодорожном пути с помощью нейронных сетей // Интеллектуальные транспортные системы: материалы III Международной научно-практической конференции (Москва, 30 мая 2024 года). М.: Российский университет транспорта (МИИТ), 2024. С. 626–630. DOI: 10.30932/9785002446094-2024-626-630. EDN OUMPCR
12. Никulichиков П.М. История, состояние и перспективы развития систем автоматического управления поездами метрополитена // Автоматика на транспорте. 2016. Т. 2, № 3. С. 456–473. EDN WYXBNL
13. Озеров А.В., Бочков А.В. Текущее состояние и перспективы мировых исследований в области интеллектуального железнодорожного транспорта // Интеллектуальный транспорт. 2025. Т. 9, № 2 (34). С. 43–66. EDN QFUBXM
14. Медведева Е.В., Перевощикова А.А. Исследование нейросетевых алгоритмов распознавания объектов железнодорожной инфраструктуры на видеозображениях // Компьютерная оптика. 2025. Т. 49, № 3. С. 443–450. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1563. EDN JUAWIT
15. Федоров В.А., Огородникова О.М. Сегментация объектов техническим зрением в автоматизированных системах управления железнодорожным подвижным составом // Автоматика на транспорте. 2025. Т. 11, № 3. С. 239–249. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-03-239-249. EDN IUNEIX
16. Deep Residual Learning for Image Recognition / K. He [et al.] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016 DOI: 10.1109/CVPR.2016.90

17. Tan M., Le Q.V. EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks // International Conference on Machine Learning (ICML). 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1905.11946
18. Densely Connected Convolutional Networks / G. Huang [et al.] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017. DOI: 10.1109/CVPR.2017.243
19. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI). 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_28
20. UNet++: A Nested U-Net Architecture for Medical Image Segmentation / Z. Zhou [et al.] // International Workshop on Deep Learning in Medical Image Analysis (DLMIA/MICCAI). 2018. DOI: 10.1007/978-3-030-00889-5_1
21. Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation / Chen L.-C. [et al.] // European Conference on Computer Vision (ECCV), 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1802.02611
22. Multi-Attention-Network for Semantic Segmentation of Fine Resolution Remote Sensing Images / R. Li [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (TGRS). 2022. DOI: 10.1109/TGRS.2021.3093977
23. SegFormer: Simple and Efficient Design for Semantic Segmentation with Transformers / E. Xie [et al.] // Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS). 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2105.15203
24. Popov P.A., Ozerov A.V., Marshova A.S. Prospects of autonomous railway transport development, BRICS Transport. 2024. № 3 (3). Pp. 1–14. DOI: 10.46684/2024.3.4. EDN: HPYXEZ

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH. 2026. Vol. 12, no. 2, pp. 128–137
DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-02-128-137

Selection of Artificial Intelligence Algorithms in Computer Vision Tasks for Detection and Localization of Objects on Railways

Information about authors

Baranov L. A., Dr. Sci. in Engineering, Professor, Professor of the Department “Management and Information Security”; e-mail: baranov.miit@gmail.com

Kulagin M. A., PhD in Engineering, Associate Professor of the Department “Management and Information Security”; e-mail: maksimkulagin06@yandex.ru

Yanchenko G. O., Postgraduate Student of the Department “Management and Information Security”; e-mail: ya@gyanchenko.ru

Russian University of Transport (MIIT), Moscow

Abstract: this article addresses the problem of selecting and substantiating neural network architectures for computer vision systems in railway transport. In the context of digital transformation within the industry, the development of reliable intelligent decision support systems capable of real-time operation has become a critical priority. This study presents a comparative analysis of the effectiveness of modern convolutional neural networks and emerging transformer-based architectures for the semantic segmentation of key railway infrastructure objects. The research is based on a specialized dataset comprising 8,203 images captured by onboard locomotive cameras under diverse weather and lighting conditions. Five artificial intelligence models were evaluated: *U-Net*, *U-Net++*, *DeepLabV3+*, *MAnet*, and *SegFormer*. Performance assessment was conducted using criteria including the Mean Intersection over Union (mIoU) metric, inference speed, and analysis of Type I (false alarm) and Type II (missed detection) error probabilities. Experimental results demonstrate that the *U-Net++* architecture with a *DenseNet-121* encoder delivers the most balanced performance, minimizing critical missed detections while maintaining high localization accuracy. The findings and proposed evaluation criteria provide a structured framework for the substantiated selection of machine vision algorithms in the design of autonomous control systems and intelligent decision support systems for operators of track maintenance machinery.

Keywords: semantic segmentation, convolutional neural networks, transformers, computer vision, railway infrastructure, artificial intelligence

References

1. Zelova M. I., Komarov A. V. O primeneni kompleksa avtomatizirovannogo upravleniya dvizheniem poezdov v usloviyakh vysokoi intensivnosti dvizheniya [On the Application of a Complex of Automated Train Traffic Control in Conditions of High Traffic Intensity], *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System Analysis. Simulation], 2022, no. 4 (76), pp. 92–100. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).92-100. EDN WFNQNA (In Russian)
2. Dolgii A. I., et al. Robotizatsiya na zheleznodorozhnom transporte [Robotization in Railway Transport], *Intellektual'nyi transport* [Intelligent Transport], 2025, vol. 9, no. 3 (35), pp. 4–32. EDN JCBFIE (In Russian)
3. Shebe Kh., Shubinskii I. B., Rozenberg E. N. Razlichnye podkhody k avtonomnomu vozhdniyu dlya zheleznykh dorog [Different Approaches to Autonomous Driving for Railways], *Nadezhnost' [Reliability]*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 4–10. DOI: 10.21683/1729-2646-2025-25-1-4-10. EDN DTBFTK (In Russian)
4. Kornev D. A. Modelirovanie setei peredachi dannykh v intellektual'noi sisteme upravleniya dvizheniem poezdov [Modeling of Data Transmission Networks in an Intelligent Train Traffic Management System], *Izvestiya Transsiba* [Journal of Transsib Railway Studies], 2023, no. 3 (55), pp. 141–154. EDN QICJOC (In Russian)
5. Osipov D. V. Mashinnoe zrenie na transporte: perspektivy i primeneniye [Machine Vision in Transport: Prospects and Applications], *Ekonomika zheleznykh dorog* [Railway Economy], 2023, no. 8, pp. 71–75. EDN IAHQWG (In Russian)
6. Timofeev E. N., Efimov N. V., Komyagin S. A. Podgotovka dannykh dlya sozdaniya tsifrovogo proekta na uchastok remonta zheleznodorozhnogo puti s ispol'zovaniem SAU-3D [Data Preparation for the Creation of a Digital Project for the Railway Track Repair Site Using a 3D Automated Control System], *Interexpo Geo-Sibir* [Interexpo GEO-Siberia], 2024, vol. 1, pp. 116–121. DOI: 10.33764/2618-981X-2024-1-116-121. EDN FQOUIY (In Russian)
7. Baranov L. A., Ivanova N. D., Mikhalevich I. F. Tsifrovoy ispytatel'nyi stend analiza bezopasnosti ob'ektov kriticheskoi informatsionnoi infrastruktury intellektual'nykh sistem vodnogo transporta [Digital Test Bench for Analyzing the Safety of Critical Information Infrastructure Facilities of Intelligent Water Transport Systems], *Nadezhnost' [Reliability]*, 2025, vol. 25, no. 3, pp. 50–59. DOI: 10.21683/1729-2646-2025-25-3-50-59. EDN QGPPKI (In Russian)
8. Popov P. A., et al. Kompleksnaya bezopasnost' ASU TP ob'ektov KII zheleznodorozhnogo transporta [Comprehensive Security of an Automated Process Control System for Critical Information Infrastructure], *Nadezhnost' [Reliability]*, 2024, vol. 24, no. 4, pp. 48–57. DOI: 10.21683/1729-2646-2024-24-4-48-57. EDN YKHBOB (In Russian)

9. Baranov L. A., Safronov A. I., Sidorenko V. G. Razvitie intellektual'nykh sistem upravleniya elektricheskim transportom [Development of Intelligent Electric Transport Management Systems], *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, Communications, Computer Science]*, 2025, no. 10, pp. 30–32. DOI: 10.62994/AT.2025.10.10.007. EDN BOSBZK (In Russian)
10. Baranov L. A., Kulagin M. A., Yanchenko G. O. Tekhnicheskoe zrenie v intellektual'noi sisteme podderzhki prinyatiya reshenii mashinista spetsial'noi putevoi mashiny [Technical Vision in the Intelligent Decision Support System of the Driver of a Special Track Vehicle], *Nauka i tekhnika transporta [Science and Technology of Transport]*, 2025, no. 3, pp. 65–69. EDN PZPESY (In Russian)
11. Kulagin M. A., Yanchenko G. O. Podkhody k opredeleniyu prepyatstviy na zheleznodorozhnom puti s pomoshch'yu neironnykh setei [Approaches to Determining Obstacles on a Railway Track Using Neural Networks], *Intellektual'nye transportnye sistemy: Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Intelligent Transport Systems: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference]*, May 30, 2024. Moscow, Russian University of Transport, 2024, pp. 626–630. DOI: 10.30932/9785002446094-2024-626-630. EDN OUMPCR (In Russian)
12. Nikul'chikov P. M. Istoriya, sostoyanie i perspektivy razvitiya sistem avtomaticheskogo upravleniya poezdami metropolitena [History, Status and Prospects of Development of Automatic Train Control Systems], *Avtomatika na transporte [Transport Automation Research]*, 2016, vol. 2, no. 3, pp. 456–473. EDN WYXBNL (In Russian)
13. Ozerov A. V. Bochkov A. V. Tekushchee sostoyanie i perspektivy mirovykh issledovaniy v oblasti intellektual'nogo zheleznodorozhnogo transporta [The Current State and Prospects of Global Research in the Field of Intelligent Railway Transport], *Intellektual'nyi transport [Intelligent Transport]*, 2025, vol. 9, no. 2 (34), pp. 43–66. EDN QFUBXM (In Russian)
14. Medvedeva E. V., Perevoshchikova A. A. Issledovanie neirosetevykh algoritmov raspoznavaniya ob"ektov zheleznodorozhnoi infrastruktury na videoizobrazheniyakh [Investigation of Neural Network Algorithms for Recognizing Railway Infrastructure Objects in Video Images], *Komp'yuternaya optika [Computer Optics]*, 2025, vol. 49, no. 3, pp. 443–450. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1563. EDN JUAWIT (In Russian)
15. Fedorov V. A., Ogorodnikova O. M. Segmentatsiya ob"ektov tekhnicheskim zreniem v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya zheleznodorozhnym podvizhnym sostavom [Segmentation of Objects by Technical Vision in Automated Railway Rolling Stock Control Systems], *Avtomatika na transporte [Transport Automation Research]*, 2025, vol. 11, no. 3, pp. 239–249. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-03-239-249. EDN IUNEIX (In Russian)
16. He K., et al. Deep Residual Learning for Image Recognition, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016. DOI: 10.1109/CVPR.2016.90
17. Tan M., Le Q. V. EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks, *International Conference on Machine Learning (ICML)*, 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1905.11946
18. Huang G., et al. Densely Connected Convolutional Networks, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017. DOI: 10.1109/CVPR.2017.243
19. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation, *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_28
20. Zhou Z., et al. UNet++: A Nested U-Net Architecture for Medical Image Segmentation, *International Workshop on Deep Learning in Medical Image Analysis (DLMIA/MICCAI)*, 2018. DOI: 10.1007/978-3-030-00889-5_1
21. Chen L.-C., et al. Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation, *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1802.02611
22. Li R., et al. Multi-Attention-Network for Semantic Segmentation of Fine Resolution Remote Sensing Images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (TGRS)*, 2022. DOI: 10.1109/TGRS.2021.3093977
23. Xie E., et al. SegFormer: Simple and Efficient Design for Semantic Segmentation with Transformers, *Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*, 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2105.15203
24. Popov P. A., Ozerov A. V., Marshova A. S. Prospects of Autonomous Railway Transport Development, *BRICS Transport*, 2024, no. 3 (3), pp. 1–14. DOI: 10.46684/2024.3.4. EDN HPYXEZ

ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЗОНЕ ПО ВИДЕОПОТОКУ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

ТРОФИМОВ Юрий Анатольевич, кандидат техн. наук, доцент, ректор Иркутского государственного университета путей сообщения; e-mail: Trofimov_Y@irgups.ru

ДУЛЬСКИЙ Евгений Юрьевич, доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта»; e-mail: Dulskiy_EU@irgups.ru

ИВАНОВ Павел Юрьевич, доктор техн. наук, доцент, доцент кафедры «Транспортное машиностроение»; e-mail: Ivanov_PYU@irgups.ru

КОВШИН Андрей Сергеевич, инженер центра перспективных цифровых инженерных технологий «ЦИФРА»; e-mail: Kovshin_AS@irgups.ru

КОЛОСОВ Даниил Дмитриевич, магистрант Иркутского государственного университета путей сообщения; e-mail: Kolosov_DD@irgups.ru

Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск

В статье рассматривается подход к построению интеллектуальной системы обнаружения аномальных объектов в железнодорожной зоне по видеопотоку в реальном времени. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения оперативности и объективности контроля состояния железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава, а также снижения влияния человеческого фактора при анализе визуальной информации. В отличие от задач классической детекции заранее известных объектов, в работе акцент сделан на выявлении отклонений от штатного состояния наблюдаемой сцены, что позволяет рассматривать широкий класс потенциально опасных и технологически нестандартных ситуаций. Предложена формализованная постановка задачи обнаружения аномальных объектов, определены основные элементы структурно-функциональной схемы системы и описан алгоритм обработки видеопотока, включающий выделение контролируемой зоны, извлечение признаков, вычисление меры аномальности, классификацию и временную верификацию обнаруженных событий. Показано, что предложенный подход может применяться как при использовании беспилотных авиационных систем, так и при стационарном размещении видеокамер. Особое внимание уделено требованиям к работе системы в реальном времени и к формированию интегрального критерия принятия решения. Сделан вывод о перспективности предложенного подхода для последующей экспериментальной верификации и интеграции в контуры интеллектуального мониторинга объектов железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: интеллектуальный видеомониторинг, железнодорожная инфраструктура, аномальные объекты, компьютерное зрение, обработка видеопотока, работа в реальном времени, беспилотные авиационные системы, автоматизация контроля

DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-02-138-148

▼ Введение

Развитие цифровых технологий в транспортной отрасли сопровождается расширением задач автоматизированного контроля состояния инфраструктуры, подвижного состава и прилегающих технологических зон. Для железнодорожного транспорта данное направление имеет особую значимость, поскольку безопасность движения напрямую зависит от своевременного выявления отклонений от штатного состояния пути, вагонов, станцион-

ных объектов и иных элементов транспортной системы. Традиционные методы визуального контроля, основанные на периодических осмотрах персоналом, обладают рядом ограничений, связанных с высокой трудоемкостью, зависимостью от квалификации исполнителя, ограниченной периодичностью контроля и риском пропуска опасных ситуаций [1, 2].

Одновременно с этим в последние годы активно развиваются методы компьютерного зрения, интеллектуального анализа

изображений и видеопоследовательностей, а также средства мобильного и стационарного видеомониторинга [3, 4]. На железнодорожном транспорте это создает предпосылки для перехода от эпизодического визуального контроля к непрерывному или квазинепрерывному автоматизированному наблюдению [5, 6]. При этом одной из наиболее сложных задач остается обнаружение не только заранее известных классов объектов, но и любых визуальных отклонений, которые не соответствуют нормальному состоянию контролируемой зоны и потенциально могут представлять угрозу безопасности движения, нарушать технологический процесс или указывать на нештатную ситуацию [7, 8].

В прикладных задачах железнодорожного транспорта такая постановка особенно важна, поскольку состав потенциально опасных объектов заранее не всегда может быть исчерпывающе задан. В реальных условиях в контролируемой зоне могут появляться как посторонние предметы, так и конструктивные изменения, следы вмешательства, временные препятствия, элементы технологического оборудования, расположенные вне допустимых границ, либо иные визуальные аномалии. В связи с этим более перспективным представляется подход, ориентированный не только на детекцию конкретного заранее размеченного класса, но и на выявление отклонения от эталонной или допустимой конфигурации сцены [9, 10].

Целью настоящей статьи является разработка подхода к построению интеллектуальной системы обнаружения аномальных объектов в железнодорожной зоне по видеопотоку в реальном времени. Для достижения поставленной цели решаются задачи формализации объекта исследования, разработки структурно-функциональной схемы системы, описания алгоритма принятия решения и определения направлений дальнейшей экспериментальной верификации предложенного подхода.

Анализ задач автоматизированного обнаружения аномалий в железнодорожной зоне

Современные системы видеомониторинга транспортных объектов целесообразно разделять по признаку размещения источника видеоданных на стационарные и мобильные.

К стационарным относятся системы видеонаблюдения, устанавливаемые на вокзалах, станциях, грузовых терминалах, переездах и иных объектах инфраструктуры. Их достоинством является непрерывность наблюдения в фиксированной зоне, однако область контроля при этом ограничена положением камеры и не всегда охватывает протяженные или труднодоступные участки [2, 8].

К мобильным относятся системы, размещаемые на подвижных носителях, в том числе на беспилотных авиационных системах. Их использование позволяет быстро менять конфигурацию наблюдения, выполнять обследование протяженных участков и формировать необходимые ракурсы съемки [11, 12]. Вместе с тем такие системы предъявляют повышенные требования к устойчивости алгоритмов обработки изображений, поскольку видеопоток характеризуется изменением масштаба, ракурса, освещенности и фона [11].

При этом как в стационарных, так и в мобильных системах широко применяются специализированные средства технического зрения, ориентированные на поиск дефектов или объектов определенного типа [13, 14]. Однако для железнодорожных приложений такого подхода не всегда достаточно, поскольку опасная ситуация может быть связана не только с заранее известным объектом, но и с произвольным нарушением нормального состояния контролируемой зоны [3, 10].

В рамках настоящей работы под аномальным объектом понимается объект, область изображения или совокупность визуальных признаков, наличие которых в контролируемой зоне не соответствует ее нормативному, эксплуатационно допустимому или ожидаемому состоянию. Соответственно, задача интеллектуальной системы состоит в том, чтобы по видеопотоку в реальном времени выделять такие отклонения, оценивать их значимость и формировать уведомление оператору [3, 4].

С практической точки зрения для железнодорожной зоны целесообразно выделять несколько типовых групп аномалий, различающихся по происхождению, продолжительности существования и потенциальным последствиям. К первой группе относятся посторонние предметы и временные препятствия, появление

которых в контролируемой области не предусмотрено нормальным режимом эксплуатации. Это могут быть фрагменты груза (обломки, просыпавшиеся сыпучие материалы, осколки), элементы упаковки (оберточная бумага, коробки, палеты), инструмент (ломы, монтажные приспособления, молотки), инвентарь (запасные части, расходные материалы, временно складированные материалы), временно размещенное оборудование (переносные светильники, временные ограждения, вспомогательные устройства), а также иные объекты, присутствие которых способно нарушить безопасность движения или осложнить проведение технологических операций. Для систем интеллектуального видеомониторинга данная группа особенно важна, поскольку такие объекты могут иметь кратковременный характер появления и не всегда поддаются описанию через заранее фиксированный перечень классов.

Ко второй группе относятся нештатные конструктивные изменения и локальные отклонения конфигурации контролируемого объекта. Для подвижного состава это может выражаться в изменении состояния наружных элементов, появлении деформаций, нарушении штатного положения деталей, смещении навесного оборудования либо возникновении визуально различимых признаков повреждения. Для инфраструктурных объектов аналогичные аномалии могут проявляться в изменении очертания контролируемой зоны, появлении нетипичных контуров, раскрытии зазоров, локальном разрушении либо ином нарушении ожидаемой геометрии объекта [13, 14].

К третьей группе относятся изменения визуального состояния, связанные не столько с появлением отдельного предмета, сколько с нарушением эксплуатационной картины наблюдаемой зоны. Это могут быть аномальные затемнения, нетипичные текстурные изменения, локальные области загрязнения, следы утечек, повреждения окраски, нарушения поверхности либо иные признаки, свидетельствующие о переходе объекта из нормального состояния в нештатное. Для подобных случаев особое значение приобретает не только факт локализации области отклонения, но и оценка ее пространственной значимости относительно контролируемой зоны.

Предлагаемый подход является универсальным, поскольку допускает применение системы как для контроля элементов железнодорожного подвижного состава, так и для наблюдения за путевой инфраструктурой, станционными участками и прилегающими зонами. Кроме того, он допускает использование различных источников видеоданных, включая стационарные камеры и мобильные платформы [2, 15].

Формализованная постановка задачи

Пусть входной информацией системы является видеопоток:

$$V = \{I_t\}_{t=1}^T, \quad (1)$$

где I_t — кадр видеопоследовательности с индексом t ;

t — номер анализируемого кадра;

T — количество анализируемых кадров.

Для каждого кадра выделяется контролируемая область:

$$\Omega_t \subseteq I_t, \quad (2)$$

соответствующая железнодорожной зоне, в пределах которой должно осуществляться обнаружение аномалий. В зависимости от сценария применения под Ω_t может пониматься зона борта вагона, зона подвагонного пространства, полоса пути, междупутье, область платформы, участок переезда или иная часть сцены, представляющая интерес для анализа.

Состояние контролируемой области описывается вектором признаков:

$$F_t = F(I_t, \Omega_t), \quad (3)$$

где $F(\cdot)$ — оператор извлечения признаков, формирующий представление текущего состояния сцены.

В качестве базовой реализации данного оператора в рамках предлагаемого подхода может рассматриваться сверточный нейросетевой экстрактор признаков, обеспечивающий формирование компактного семантического описания контролируемой зоны и приемлемый компромисс между точностью и быстродействием при обработке видеопотока в реальном времени. При этом итоговое представление может включать геометрические, текстурные,

контурные, цветовые и высокоуровневые семантические признаки [3, 9].

Для описания нормального состояния вводится эталонное представление F_{ref} , характеризующее допустимую конфигурацию наблюдаемой зоны. Тогда меру аномальности текущего состояния можно определить как:

$$a_t = D(F_t, F_{ref}), \quad (4)$$

где $D(\cdot)$ — функция расстояния, рассогласования или иной меры отклонения между текущим и эталонным состоянием.

Для практической железнодорожной задачи одного только показателя отклонения недостаточно. Необходимо учитывать также уверенность классификатора и положение обнаруженного объекта относительно опасной части контролируемой зоны. Поэтому предлагается использовать интегральный показатель:

$$q_t = \alpha a_t + \beta p_t + \gamma r_t, \quad (5)$$

где p_t — оценка уверенности распознавания или принадлежности объекта к аномальному классу;

r_t — коэффициент пространственной значимости, отражающий расположение обнаруженного объекта в пределах контролируемой зоны;

α, β, γ — весовые коэффициенты, определяемые при настройке системы.

Содержательно величина a_t характеризует степень отклонения текущего состояния сцены от эталонной конфигурации и позволяет зафиксировать сам факт визуальной аномалии, даже если она не относится к заранее известному классу объектов. Величина p_t отражает достоверность классификационного решения и позволяет учитывать надежность интерпретации обнаруженного отклонения. Коэффициент r_t необходим для учета положения объекта в пределах контролируемой зоны, поскольку одинаковые по форме и размерам аномалии могут иметь различную эксплуатационную значимость в зависимости от их локализации. В этом случае весовые коэффициенты α, β, γ задают относительный вклад каждого из указанных факторов в итоговую оценку и могут подбираться с учетом сценария применения системы, требований к чувствительности обнаружения и допустимого уровня ложных срабатываний.

Тогда бинарное решение по текущему кадру формируется по правилу:

$$y_t = \begin{cases} 1, & q_t > \tau, \\ 0, & q_t \leq \tau, \end{cases} \quad (6)$$

где τ — порог принятия решения.

Для снижения количества ложных срабатываний целесообразно использовать временную верификацию по последовательности кадров, поскольку единичные срабатывания могут быть обусловлены шумом, смазыванием изображения, изменением освещенности или случайными особенностями фона [4, 16]. Итоговое решение о формировании тревожного сообщения может быть определено следующим образом:

$$Y_t = \begin{cases} 1, & \sum_{i=t-k+1}^t y_i \geq m, \\ 0, & \sum_{i=t-k+1}^t y_i < m, \end{cases} \quad (7)$$

где k — длина окна временного анализа;

m — минимальное количество подтверждающих срабатываний в пределах окна.

Дополнительным ограничением является требование работы в реальном времени, что особенно важно для задач обнаружения препятствий и вторжений в железнодорожной зоне [13, 17]. Если f_v — частота поступления кадров, а T_{proc} — время обработки одного кадра, то для выполнения условия реального времени должно соблюдаться соотношение:

$$T_{proc} \leq \frac{1}{f_v}. \quad (8)$$

Пусть тип выявляемой аномалии определяется оператором классификации:

$$c_t = C(F_t; \theta_c), \quad (9)$$

где $C(\cdot)$ — оператор классификации, определяющий тип аномалии;

θ_c — совокупность параметров модели классификации;

c_t — класс аномалии, определяемый по вектору признаков F_t .

Оценка уверенности классификатора в отнесении текущего наблюдаемого объекта к классу c_t задается величиной:

$$p_t = P(c_t | F_t; \theta_c), \quad (10)$$

где $p_t \in [0,1]$ — характеризует достоверность принятого классификационного решения.

Локализация обнаруженного объекта на изображении может быть представлена ограничивающей областью:

$$b_{boxt} = (x_t, y_t, w_t, h_t), \quad (11)$$

где x_t, y_t — координаты положения области локализации на кадре;

w_t, h_t — ее ширина и высота соответственно.

Коэффициент пространственной значимости аномального объекта определяется как функция его положения в пределах контролируемой зоны:

$$r_t = R(b_{boxt}, \Omega_t), \quad (12)$$

где $R(\cdot)$ — функция, учитывающая взаимное расположение области локализации b_{box} и контролируемой зоны Ω_t . Такая запись позволяет формализовать различную критичность аномалий в зависимости от их положения в кадре.

Результаты анализа текущего кадра или события сохраняются в виде набора данных:

$$D_t = (I_t, M_t, \Omega_t, F_t, a_t, p_t, c_t, q_t, b_{boxt}, Y_t), \quad (13)$$

где M_t — сопутствующие метаданные входного потока;

D_t — совокупность данных, сохраняемых по результатам анализа.

На основе множества сохраненных результатов формируется обучающий набор:

$$D_{train} = \bigcup_{t \in T_{sel}} \Omega_t, \quad (14)$$

где T_{sel} — множество моментов времени или кадров, отобранных для последующего обучения и дообучения моделей.

Параметры модуля извлечения признаков и оценки аномальности далее обозначаются как θ_j . В этом случае формализованная постановка задачи охватывает не только обнаружение и классификацию аномального объекта, но и накопление данных для последующей адаптации параметров моделей в процессе эксплуатации системы.

Таким образом, формализованная задача состоит в построении отображения, которое по последовательности кадров видеопотока и выделенной контролируемой области вырабатывает решение о наличии либо отсутствии аномального объекта, учитывая меру отклонения от нормального состояния, пространственную значимость обнаруженного объекта, временное подтверждение события и ограничение по времени обработки.

Структурно-функциональная схема интеллектуальной системы

Предлагаемая интеллектуальная система обнаружения аномальных объектов в железнодорожной зоне в виде структурно-функциональной схемы представлена на рис. 1 и строится по модульному принципу. Это позволяет обеспечить универсальность применения,

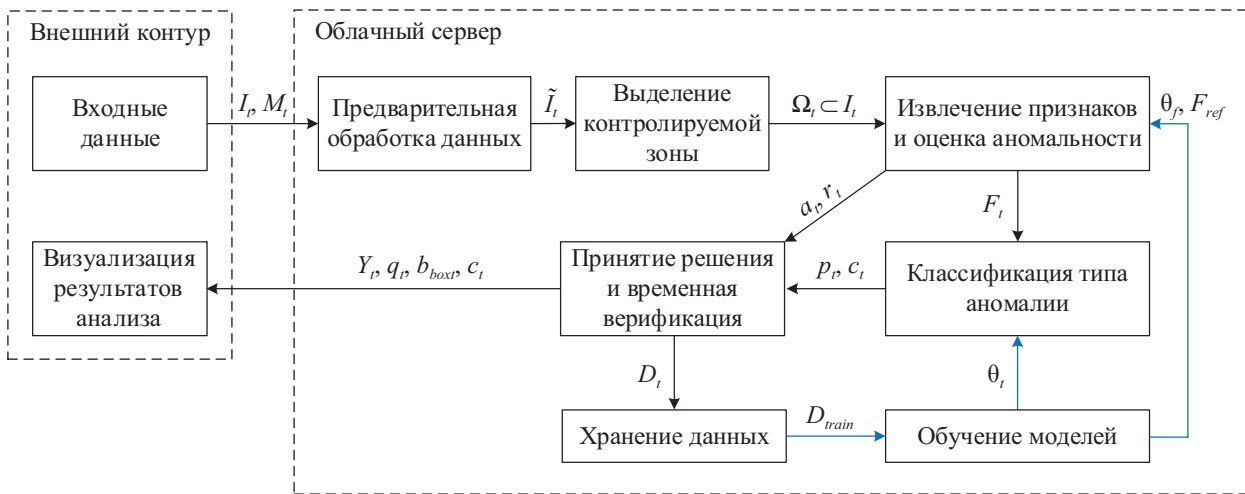


Рис. 1. Структурно-функциональная схема интеллектуальной системы обнаружения аномальных объектов в железнодорожной зоне

а также адаптацию к различным источникам видеоданных и сценариям эксплуатации.

На структурно-функциональной схеме (рис. 1) используются обозначения, введенные в разделе формализованной постановки задачи. Дополнительно приняты следующие обозначения:

- \tilde{I}_i — кадр после предварительной обработки;
- θ_f и θ_c — совокупности параметров модулей извлечения признаков и классификации соответственно.

На вход системы поступают видеоданные I_i и сопутствующие метаданные M_i от источника наблюдения (рис. 1). В качестве такого источника могут использоваться стационарные видеокамеры либо мобильные платформы, в том числе беспилотные авиационные системы с установленными камерами [11, 12]. Во внешнем контуре осуществляются прием исходной информации и визуализация результатов анализа, тогда как основная обработка данных выполняется в облачном сервере.

В модуле предварительной обработки из исходных видеоданных формируется предобработанный кадр \tilde{I}_i . На данном этапе выполняются стабилизация изображения, подавление шумов, нормализация яркости и контрастности, а также приведение данных к формату, пригодному для дальнейшего анализа. Использование этого модуля позволяет снизить влияние помех и повысить устойчивость последующих этапов обработки.

В модуле выделения контролируемой зоны из кадра \tilde{I}_i формируется область $\Omega_i \subset I_i$, непосредственно относящаяся к решаемой задаче. Ограничение области анализа только технологически значимым участком сцены позволяет уменьшить вычислительные затраты и одновременно снизить вероятность ложных срабатываний в фоновом окружении. В зависимости от сценария применения контролируемая зона может определяться геометрически по заранее заданной маске, по результатам сегментации сцены или по совокупности признаков.

В модуле извлечения признаков и оценки аномальности по данным контролируемой зоны Ω , формируется вектор признаков F_i , характеризующий текущее состояние сцены. Одновременно с использованием эталонного представления F_{ref} и параметров модели θ_f вычисляются

мера аномальности a_i и коэффициент пространственной значимости r_i , отражающие степень отклонения наблюдаемой сцены от нормального состояния и критичность положения объекта в пределах контролируемой зоны.

Сформированный вектор признаков F_i передается в модуль классификации типа аномалии, где определяются класс выявленного события c_i и оценка уверенности p_i . Результаты обработки далее поступают в модуль принятия решения и временной верификации, в котором формируется итоговое решение о наличии аномального объекта, а также данные локализации и сопутствующая классификационная информация.

Полученные результаты передаются во внешний контур для визуализации оператору и одновременно сохраняются в модуле хранения данных в виде набора D_i . На основе накопленных данных формируется обучающий массив D_{train} , используемый для последующего обновления параметров моделей θ_f , θ_c и эталонного представления F_{ref} .

Таким образом, структурно-функциональная схема отражает состав основных модулей системы, характер информационных потоков между ними и наличие адаптивного контура, обеспечивающего последующее повышение качества обнаружения и классификации аномальных объектов.

Алгоритм обнаружения аномальных объектов по видеопотоку

Алгоритм обнаружения аномальных объектов реализует последовательную обработку входного видеопотока в реальном времени и ориентирован на анализ каждого поступающего кадра либо временного окна кадров. Его логика соответствует блок-схеме, представленной на рис. 2. Рассмотрим последовательность операций, выполняемых при обработке одного кадра или временного окна.

Алгоритм, представленный на рис. 2, задает порядок выполнения операций при обработке очередного кадра видеопотока и использует обозначения, введенные в разделе формализованной постановки задачи. После формирования признакового описания контролируемой зоны и вычисления необходимых оценок выполняется расчет интегрального показателя

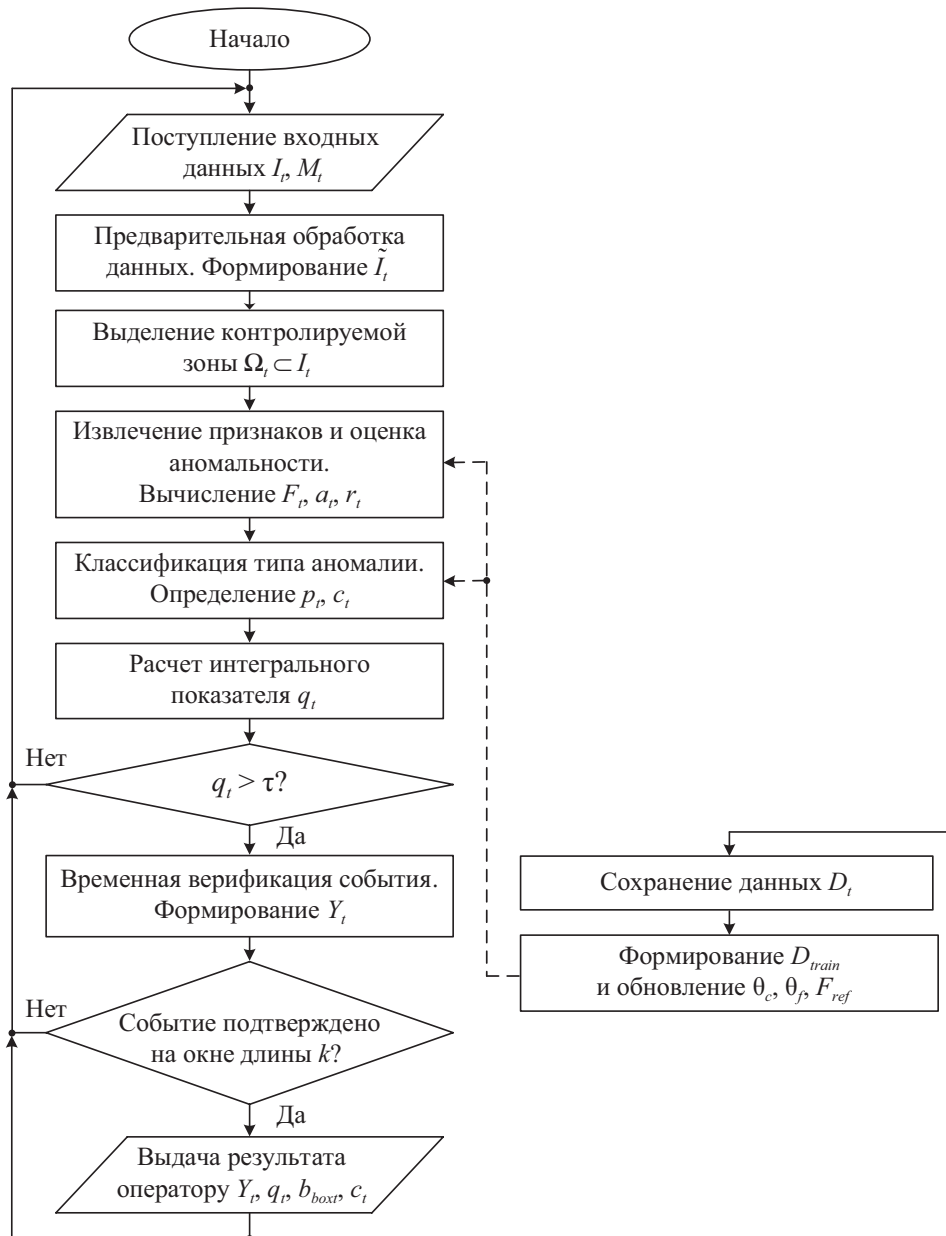


Рис. 2. Блок–схема алгоритма обнаружения аномальных объектов по видеопотоку

значимости события q_t по выражению (5), после чего полученное значение сравнивается с порогом τ в соответствии с правилом (6).

Если условие превышения порога не выполняется, текущий кадр не рассматривается как носитель значимого аномального события, и система переходит к обработке следующего входного набора данных. Если же порог выполнен, запускается этап временной верификации, в рамках которого решение уточняется на последовательности кадров по правилу (7). Такой порядок позволяет исключить одиночные ложные срабатывания, возникающие

вследствие шумов, кратковременных искажений изображения, локальных засветок или случайных особенностей фона.

При подтверждении события формируется итоговое решение Y_t , которое передается оператору совместно с оценкой значимости, локализацией области отклонения и результатом классификации. После этого система возвращается к обработке следующего кадра, что обеспечивает непрерывный циклический режим функционирования в реальном времени. Параллельно результаты анализа могут сохраняться для последующего формирования

обучающего массива, однако данный контур носит вспомогательный характер и не изменяет основной последовательности алгоритмических переходов.

Таким образом, блок-схема на рис. 2 описывает не состав модулей системы, а последовательность вычислительных и логических шагов, обеспечивающих переход от оценки текущего состояния сцены к принятию решения о наличии или отсутствии аномального объекта. В отличие от структурно-функциональной схемы, отражающей состав и связи модулей системы, блок-схема алгоритма задает именно порядок выполнения операций и условия перехода между ними.

Перспективы экспериментальной верификации предложенного подхода

Несмотря на то что в настоящей статье основной акцент сделан на формализации задачи и описании методического подхода, предложенная схема ориентирована на последующую экспериментальную проверку в условиях, приближенных к реальной эксплуатации. Такая верификация должна быть направлена не только на оценку точности обнаружения, но и на исследование устойчивости алгоритма к характерным для транспортной среды помехам [2, 5].

К числу основных факторов, подлежащих анализу, относятся изменение освещенности, колебания камеры, вариации расстояния до объекта, изменение ракурса съемки, частичное перекрытие контролируемой зоны, наличие фоновых объектов и изменение погодных условий. Для мобильных носителей дополнительно должны учитываться изменения перспективы и масштаба, а также ограничение по вычислительным ресурсам при передаче видеоданных в операторский или облачный контур [11, 12].

Важным направлением дальнейших исследований является формирование репрезентативной базы видеоматериалов, отражающей как нормальные, так и аномальные состояния железнодорожной зоны. Такая база необходима для настройки параметров модели, выбора порогов принятия решения и последующей оценки качества системы по совокупности количественных показателей [3, 9]. В качестве

базовых метрик могут использоваться точность обнаружения, полнота обнаружения, F -мера, частота ложных срабатываний, среднее время формирования сообщения оператору и устойчивость системы при изменении условий наблюдения.

Практическая значимость будущей верификации состоит в том, что она позволит определить границы применимости предложенного подхода, а также обосновать рациональные режимы его использования в различных сценариях. К таким сценариям относятся контроль элементов подвижного состава, мониторинг путевой зоны, наблюдение за стационарными объектами и анализ прилегающих участков, где требуется автоматизированное выявление визуальных аномалий [1, 2].

Следует отметить, что в рамках текущего этапа исследований подготовлен программный задел для последующих испытаний. Однако результаты натурной экспериментальной проверки не являются предметом настоящей статьи и рассматриваются как самостоятельное направление дальнейшей работы. Такой подход представляется обоснованным, поскольку на данном этапе приоритетной задачей является именно теоретическое обоснование архитектуры системы, формализация процесса принятия решения и определение логики интеграции интеллектуального анализа видеоданных в контуры автоматизированного мониторинга объектов железнодорожного транспорта.

Заключение

В статье предложен подход к построению интеллектуальной системы обнаружения аномальных объектов в железнодорожной зоне по видеопотоку в реальном времени. В отличие от более узких постановок, ориентированных исключительно на детекцию заранее известных классов объектов, предложенный подход основан на анализе отклонений наблюдаемой сцены от ее штатного или допустимого состояния. Это позволяет рассматривать существенно более широкий круг практических задач железнодорожного транспорта, связанных с выявлением посторонних предметов, нештатных визуальных изменений, потенциально опасных состояний контролируемых зон и иных событий, требующих внимания оператора.

В ходе исследования показано, что для задач железнодорожной автоматики и интеллектуального мониторинга принципиальное значение имеет не только факт наличия визуального объекта в кадре, но и его технологическая интерпретация, пространственное положение и устойчивость наблюдения во времени. В связи с этим предложена формализованная постановка задачи, включающая выделение контролируемой зоны, описание текущего состояния сцены в пространстве признаков, оценку степени отклонения от эталонного состояния, расчет интегрального показателя значимости события и временную верификацию обнаруженной аномалии по последовательности кадров. Такое представление позволяет перейти от интуитивного понимания нештатной ситуации к формализованной схеме принятия решения, пригодной для последующей алгоритмической и программной реализации.

Существенным результатом работы является разработка структурно-функциональной схемы системы, в которой объединены источник видеоданных, модуль предварительной обработки, модуль выделения зоны интереса, средства извлечения признаков, оценка аномальности, классификация событий и интерфейс оператора. Показано, что предложенный подход не привязан к одному конкретному типу носителя и может использоваться как в составе мобильных платформ, включая беспилотные авиационные системы, так и при стационарном размещении видеокамер. Тем самым обеспечивается технологическая универсальность и возможность применения подхода в различных условиях наблюдения.

Отдельное значение имеет учет требований к работе системы в реальном времени. Для транспортных приложений недостаточно обеспечить высокую чувствительность к отклонениям сцены. Не менее важно, чтобы система формировала решение в пределах допустимого временного интервала и была устойчива к ложным срабатываниям, возникающим под воздействием фона, шумов, кратковременных помех и изменений условий съемки. Предложенная временная верификация по серии кадров является одним из механизмов повышения надежности функционирования си-

стемы и представляет собой важный элемент практической адаптации подхода к реальным условиям железнодорожной эксплуатации.

Таким образом, полученные результаты позволяют рассматривать предложенный подход как теоретическую и методическую основу для дальнейшего создания интеллектуальных систем видеомониторинга железнодорожных объектов. Подготовленный программный задел создает предпосылки для перехода к следующему этапу исследований, связанному с экспериментальной верификацией предложенного решения, формированием базы видеоданных, уточнением параметров модели и количественной оценкой эффективности системы в различных сценариях применения. Перспективность данного направления определяется возможностью интеграции интеллектуального анализа видеопотока в существующие контуры автоматизированного контроля и повышения общей безопасности и оперативности управления объектами железнодорожного транспорта. ▲

Данная работа подготовлена в рамках выполнения государственного задания по теме № 1025032500106-9-2.1.3; 2.2.6 «Разработка концепции перехода к обслуживанию и ремонту по фактическому состоянию элементов подвижного состава и инфраструктуры на основе совершенствования подходов к моделированию их ресурса с использованием данных из информационных систем».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. A literature review of Artificial Intelligence applications in railway systems / R. Tang [et al.] // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2022. Vol. 140. Art. 103679. DOI: 10.1016/j.trc.2022.103679
2. Artificial intelligence in railway infrastructure: current research, challenges, and future opportunities / W. Phusakulkajorn [et al.] // Intelligent Transportation Infrastructure. 2023. Vol. 2. Art. liad016. DOI: 10.1093/iti/liad016
3. Anomaly Analysis in Images and Videos: A Comprehensive Review / T.M. Tran [et al.] // ACM Computing Surveys. 2022. Vol. 55, no. 7. Art. 148. Pp. 1–37. DOI: 10.1145/3544014
4. Generalized Video Anomaly Event Detection: Systematic Taxonomy and Comparison of Deep Models / Y. Liu [et al.] // ACM Computing Surveys. 2024. Vol. 56, no. 7. Art. 189. Pp. 1–38. DOI: 10.1145/3645101

5. Wang Y., Yu P. A Fast Intrusion Detection Method for High-Speed Railway Clearance Based on Low-Cost Embedded GPUs // *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 21. Art. 7279. DOI: 10.3390/s21217279
6. Automatic Obstacle Detection Method for the Train Based on Deep Learning / Q. Zhang [et al.] // *Sustainability*. 2023. Vol. 15, no. 2. Art. 1184. DOI: 10.3390/su15021184
7. SDRC-YOLO: A Novel Foreign Object Intrusion Detection Algorithm in Railway Scenarios / C. Meng [et al.] // *Electronics*. 2023. Vol. 12, no. 5. Art. 1256. DOI: 10.3390/electronics12051256
8. Survey on Multi-Sensor Fusion Perimeter Intrusion Detection in High-Speed Railways / T. Shi [et al.] // *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 17. Art. 5463. DOI: 10.3390/s24175463
9. Qi M., Wu Y. Weakly supervised video anomaly detection based on hyperbolic space // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 26348. DOI: 10.1038/s41598-024-77505-4
10. RailFDNet: A hybrid supervision and feature discrepancy enhancement model for railway anomalous object detection / T. Sun [et al.] // *Expert Systems with Applications*. 2025. Vol. 275. Art. 127005. DOI: 10.1016/j.eswa.2025.127005
11. Сацюк А. В., Швалов Д. В. Автономное наведение БПЛА с использованием компьютерного зрения: проблема точного управления рулями // *Автоматика на транспорте*. 2024. Т. 10, № 4. С. 372–381. DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-04-372-381
12. Липанов И. Д., Хомоненко А. Д. Технологии и методы планирования перемещения БПЛА по маршрутным точкам // *Интеллектуальные технологии на транспорте*. 2024. № 3 (39). С. 30–43. DOI: 10.20295/2413-2527-2024-339-30-43
13. Горбачев Р. А., Зарипов М. Н., Шишков Д. Л. Интеллектуальная система технического зрения для обнаружения препятствий и предсказания поведения движущихся объектов на железнодорожных путях // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2022. № 1 (225). С. 256–268. DOI: 10.18522/2311-3103-2022-1-256-268
14. Помехозащищенность интеллектуальных транспортных систем технического зрения для анализа изображений железнодорожной инфраструктуры / М. А. Кулагин [и др.] // *Автоматика на транспорте*. 2025. Т. 11, № 4. С. 313–326. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-313-326
15. LiDAR-Camera joint obstacle detection algorithm for railway track area / Z. Nan [et al.] // *Expert Systems with Applications*. 2025. Vol. 275. Art. 127089. DOI: 10.1016/j.eswa.2025.127089
16. Railway Intrusion Risk Quantification with Track Semantic Segmentation and Spatiotemporal Features / S. Ning [et al.] // *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 17. Art. 5266. DOI: 10.3390/s25175266
17. Погрешности измерения расстояния до препятствия средствами технического зрения и прогноза пути торможения в беспилотных системах управления движением поездов / Л. А. Баранов [и др.] // *Мир транспорта*. 2021. Т. 19. № 6 (97). С. 6–12. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-6-1

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH. 2026. Vol. 12, no. 2, pp. 138–148
DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-02-138-148

Approach to Building an Intelligent System for Detecting Anomalous Objects in the Railway Zone Using Real-Time Video Stream

Information about authors

Trofimov Yu. A., PhD in Engineering, Associate Professor, Rector of Irkutsk State Transport University; e-mail: Trofimov_Y@irgups.ru

Dulskiy E. Yu., Dr. Sci. in Engineering, Professor, Professor of the Department "Electric Power Engineering of Transport"; e-mail: Dulskiy_EU@irgups.ru

Ivanov P. Yu., Dr. Sci. in Engineering, Professor, Associate Professor of the Department "Transport Mechanical Engineering"; e-mail: Ivanov_PYU@irgups.ru

Kovshin A. S., Engineer at the Centre for Advanced Digital Engineering Technologies "DIGITAL"; e-mail: Kovshin_AS@irgups.ru

Kolosov D. D., Master's Student; e-mail: Kolosov_DD@irgups.ru

Irkutsk State Transport University, Irkutsk

Abstract: the article discusses an approach to building an intelligent system for detecting anomalous objects in the railway zone using real-time video stream.

The relevance of the research is driven by the need to improve the efficiency and objectivity of monitoring the state of railway infrastructure and rolling stock, as well as to reduce the influence of the human factor in the analysis of visual information. Unlike classical detection tasks for predefined objects, this work focuses on identifying deviations from the normal state of the observed scene, which allows covering a wide class of potentially dangerous and technologically abnormal situations. A formalised problem statement for anomalous object detection is proposed, the main elements of the structural and functional diagram of the system are defined, and an algorithm for video stream processing is described, including the selection of the controlled zone, feature extraction, computation of an anomaly score, classification, and temporal verification of detected events. It is shown that the proposed approach can be applied both when using unmanned aerial systems and with stationary camera placement. Special attention is paid to the requirements for real-time system operation and the formation of an integral decision-making criterion. The conclusion is drawn about the promise of the proposed approach for subsequent experimental verification and integration into intelligent monitoring systems for railway transport facilities.

Keywords: intelligent video surveillance, railway infrastructure, anomalous objects, computer vision, video stream processing, real-time operation, unmanned aerial systems, automation of monitoring

References

1. Tang R., et al. A Literature Review of Artificial Intelligence Applications in Railway Systems, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, vol. 140, art. 103679. DOI: 10.1016/j.trc.2022.103679
2. Phusakulkajorn W., et al. Artificial Intelligence in Railway Infrastructure: Current Research, Challenges, and Future Opportunities, *Intelligent Transportation Infrastructure*, 2023, vol. 2, art. liad016. DOI: 10.1093/iti/liad016
3. Tran T. M., et al. Anomaly Analysis in Images and Videos: A Comprehensive Review, *ACM Computing Surveys*, 2022, vol. 55, no. 7, art. 148, pp. 1–37. DOI: 10.1145/3544014
4. Liu Y., et al. Generalized Video Anomaly Event Detection: Systematic Taxonomy and Comparison of Deep Models, *ACM Computing Surveys*, 2024, vol. 56, no. 7, art. 189, pp. 1–38. DOI: 10.1145/3645101
5. Wang Y., Yu P. A Fast Intrusion Detection Method for High-Speed Railway Clearance Based on Low-Cost Embedded GPUs, *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 21, art. 7279. DOI: 10.3390/s21217279
6. Zhang Q., et al. Automatic Obstacle Detection Method for the Train Based on Deep Learning, *Sustainability*, 2023, vol. 15, no. 2, art. 1184. DOI: 10.3390/su15021184
7. Meng C., et al. SDR-YOLO: A Novel Foreign Object Intrusion Detection Algorithm in Railway Scenarios, *Electronics*, 2023, vol. 12, no. 5, art. 1256. DOI: 10.3390/electronics12051256
8. Shi T., et al. A Survey on Multi-Sensor Fusion Perimeter Intrusion Detection in High-Speed Railways, *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 17, art. 5463. DOI: 10.3390/s24175463
9. Qi M., Wu Y. Weakly Supervised Video Anomaly Detection Based on Hyperbolic Space, *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, art. 26348. DOI: 10.1038/s41598-024-77505-4
10. Sun T., et al. RailFDNet: A Hybrid Supervision and Feature Discrepancy Enhancement Model for Railway Anomalous Object Detection, *Expert Systems with Applications*, 2025, vol. 275, art. 127005. DOI: 10.1016/j.eswa.2025.127005
11. Satsyuk A. V., Shvalov D. V. Avtonomnoe navedenie BPLA s ispol'zovaniem komp'yuternogo zreniya: problema tochnogo upravleniya rulyami [Autonomous Guidance of Uav Using Computer Vision: The Problem of Precise Control of Control Surfaces], *Avtomatika na transporte [Transport Automation Research]*, 2024, vol. 10, no. 4, pp. 372–381. DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-04-372-381 (In Russian)
12. Lipanov I. D., Khomonenko A. D. Tekhnologii i metody planirovaniya peremeshcheniya BPLA po marshrutnym tochkam [Technologies and Methods for Planning UAV Movement Via Waypoints], *Intellektual'nye tekhnologii na transporte [Intelligent Technologies on Transport]*, 2024, no. 3 (39), pp. 30–43. DOI: 10.20295/2413-2527-2024-339-30-43 (In Russian)
13. Gorbachev R. A., Zaripov M. N., Shishkov D. L. Intellektual'naya sistema tekhnicheskogo zreniya dlya obnaruzheniya prep'yatstviy i predskazaniya povedeniya dvizhushchikhsya ob'ektov na zheleznodorozhnykh putyakh [Intelligent Vision System for Obstacle Detection and Behaviour Prediction of Moving Objects on Railway Tracks], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Proceedings of the Southern Federal University. Engineering Sciences]*, 2022, no. 1 (225), pp. 256–268. DOI: 10.18522/2311-3103-2022-1-256-268 (In Russian)
14. Kulaghin M. A., et al. Pomekhozashchishchennost' intellektual'nykh transportnykh sistem tekhnicheskogo zreniya dlya analiza izobrazhenii zheleznodorozhnoi infrastruktury [Noise Immunity of Intelligent Transport Vision Systems for Image Analysis of Railway Infrastructure], *Avtomatika na transporte [Transport Automation Research]*, 2025, vol. 11, no. 4, pp. 313–326. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-313-326 (In Russian)
15. Nan Z., et al. LiDAR-Camera Joint Obstacle Detection Algorithm for Railway Track Area, *Expert Systems with Applications*, 2025, vol. 275, art. 127089. DOI: 10.1016/j.eswa.2025.127089
16. Ning S., et al. Railway Intrusion Risk Quantification with Track Semantic Segmentation and Spatiotemporal Features, *Sensors*, 2025, vol. 25, no. 17, art. 5266. DOI: 10.3390/s25175266
17. Baranov L. A., et al. Pogreshnosti izmereniya rasstoyaniya do prep'yatstviya sredstvami tekhnicheskogo zreniya i prognoza puti tormozheniya v bespilotnykh sistemakh upravleniya dvizheniem poezdov [Errors in Measuring Distance to Obstacles by Technical Vision Means and Braking Distance Prediction in Unmanned Train Control Systems], *Mir transporta [World of Transport]*, 2021, vol. 19, no. 6 (97), pp. 6–12. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-6-1 (In Russian)

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ ВОЗМОЖНОГО АКВАПЛАНИРОВАНИЯ

ГУСЕВА Инна Андреевна, аспирант кафедры «Организация перевозок, безопасность движения и сервис автомобилей»; e-mail: guseva11.ia@yandex.ru

Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина, Саратов

В статье представлена усовершенствованная аналитическая модель для расчета пороговой скорости наступления полного аквапланирования одиночного колеса легкового автомобиля. Отличительной чертой подхода выступает последовательное уточнение геометрических параметров водяного клина (угла атаки и площади смоченной поверхности) и детализированное описание гидравлического сопротивления дренажных канавок протектора с применением непрерывной формулы Черчилля для коэффициента трения, справедливой во всем спектре чисел Рейнольдса — от ламинарного до развитого турбулентного течения, включая переходную область. Такой прием избавляет от необходимости априорного выбора расчетного режима и обеспечивает гладкую функциональную связь критической скорости с исходными параметрами. Потери на входе в канавку рассчитываются по классической гидравлической схеме — через скоростной напор в узком сечении, а движущий перепад давления принимается равным полному динамическому напору набегающего потока. На базе предложенной модели разработано алгоритмическое обеспечение для проактивного управления движением беспилотных автотранспортных средств в составе интеллектуальных транспортных систем. Определены состав и назначение бортовых сенсорных подсистем, необходимых для получения исходных данных в реальном масштабе времени. Приведен числовой пример, демонстрирующий сходимость итерационной процедуры, и выполнено сопоставление с известными инженерными методиками.

Ключевые слова: аквапланирование, гидродинамическая подъемная сила, критическая скорость, угол атаки, протектор, дренажные канавки, гидравлическое сопротивление, формула Черчилля, аналитическая модель, беспилотное автотранспортное средство, интеллектуальная транспортная система, алгоритм управления, бортовые датчики

DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-02-149-162

▼ Введение

Аквапланирование (глиссирование) автомобильной шины представляет собой опасное явление, при котором между колесом и дорожным покрытием образуется сплошная водяная пленка, полностью исключая контакт протектора с дорогой. В таком состоянии автомобиль теряет управляемость и способность к торможению, что часто становится причиной дорожно-транспортных происшествий (ДТП). Для экспертного анализа ДТП необходимо уметь рассчитывать пороговую скорость начала аквапланирования, опираясь на доступные параметры: нагрузку на колесо, размеры шины, толщину водяного слоя и состояние протектора.

Существующие инженерные методики [1, 2] основаны на упрощенной гидродинамической модели удара струи о плоскую поверхность с фиксированным углом атаки 45° и используют эмпирические коэффициенты для учета увеличения глубины воды перед колесом и снижения подъемной силы из-за протектора. Такие коэффициенты требуют экспериментальной калибровки для каждого типа шин, что ограничивает универсальность метода.

Целью настоящей работы является построение полностью аналитической модели, в которой все влияющие факторы выражены через измеряемые физические величины без привлечения эмпирических подгоночных параметров, что позволит использовать ее в алгоритмах

проактивного управления движением беспилотных автотранспортных средств в интеллектуальных транспортных системах (ИТС). В модели последовательно уточняются угол атаки водяного клина и площадь смоченной поверхности, вводится поправка на вязкость воды в клине и, что наиболее важно, детализируется влияние дренажных канавок протектора на основе обобщенного гидравлического сопротивления с использованием формулы Черчилля, справедливой для всех режимов течения.

Постановка задачи исследования и основные допущения

В ранее опубликованных исследованиях по тематике аквапланирования рассматривается одиночное колесо легкового автомобиля, движущееся равномерно по ровной горизонтальной дороге, покрытой слоем воды постоянной толщины h .

Схема набегания воды на колесо и общая картина взаимодействия шины с водным покрытием представлены в работе [1, рис. 1, 2

соответственно]. Сечение канавок считается прямоугольным с отношением сторон порядка 1:1...1:3. Детальная схема течения воды в дренажной канавке показана на рис. 1.

Принимаются следующие допущения:

- движение равномерное, без продольных и поперечных ускорений;
- вода — вязкая несжимаемая жидкость с плотностью ρ и кинематической вязкостью ν ;
- течение перед колесом считается плоским и стационарным в системе координат, связанной с колесом;
- пятно контакта шины с дорогой в статике имеет форму эллипса с полуосями a (в продольном направлении) и b (в поперечном);
- толщина водяного слоя h значительно меньше радиуса колеса R ;
- деформация шины под нагрузкой описывается радиальной жесткостью c_z , прогиб $\delta = G_k / c_z$;
- стенки канавок считаются гидравлически гладкими, шероховатость не учитывается.

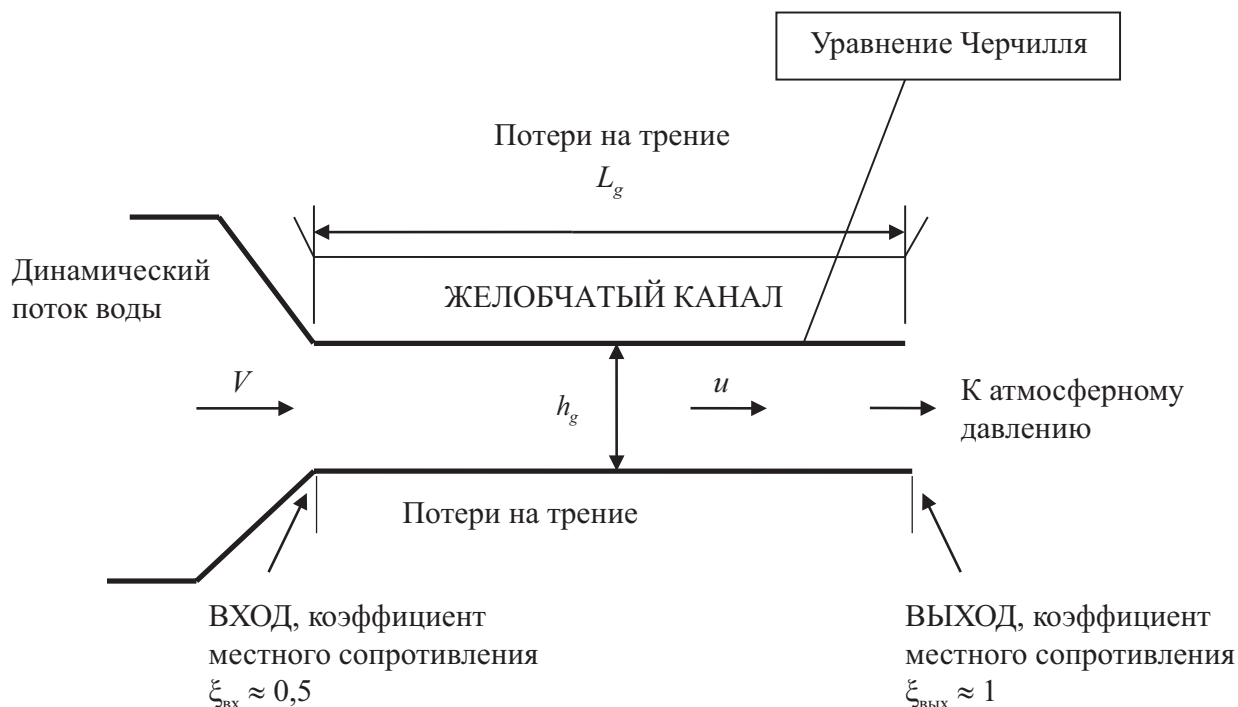


Рис. 1. Схема течения воды в дренажной канавке протектора с указанием местных сопротивлений и потерь по длине:

V — скорость движения транспортного средства; u — средняя скорость воды в канавке; L_g, h_g, ω_g — геометрические параметры канавки: длина канавок в пределах пятна контакта, средняя остаточная глубина канавок протектора и ширина одной канавки соответственно; $\xi_{\text{вх}}, \xi_{\text{вых}}$ — коэффициенты местных сопротивлений

Уточнение угла атаки и площади смоченной поверхности шины

Следуя уточненной модели [3, 4], угол атаки β водяного клина определяется геометрией колеса и толщиной воды. Для тонкого слоя, согласно теории глиссирования, угол наклона свободной поверхности клина может быть оценен как $\beta \approx \sqrt{\frac{2h}{l}}$, где l — характерная длина клина. Для катящегося колеса длина клина пропорциональна \sqrt{Rh} [5, 6]. Принимая $l = \sqrt{Rh}$, получаем аналитическую оценку:

$$\beta = \sqrt{\frac{h}{R}}. \quad (1)$$

Эффективная площадь смоченной поверхности, воспринимающая динамическое давление воды, с учетом эллиптичности пятна контакта может быть записана как [6]:

$$S_o = \frac{\pi}{2} b \sqrt{Rh}. \quad (2)$$

Данное выражение не содержит эмпирических коэффициентов и подтверждается экспериментальными данными [5].

Вязкостная поправка для внешнего клина. Для ламинарного течения в тонком клине поправка к идеальной подъемной силе, учитывающая вязкое трение, вводится множителем [7]:

$$k_\mu = \frac{1}{1 + \frac{12\nu}{Vh\beta}}, \quad (3)$$

где V — скорость движения (скорость набегающего потока);

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$ — кинематическая вязкость воды;

μ — динамическая вязкость.

Аналитическое описание влияния протектора с непрерывным учетом гидравлического сопротивления

При движении колеса по слою воды часть набегающего потока отводится через канавки протектора, уменьшая массу воды, участвующей в создании гидродинамического подъема (рис. 1).

Расход воды, вытесняемой колесом на единицу ширины, равен $q_o = Vh$. Этот поток разделяется на две части: q_1 — расход, идущий

в подъемный клин перед шиной, и q_2 — расход, проходящий через дренажные канавки.

Подъемная сила создается только той частью потока, которая обтекает шину снаружи, то есть q_1 . Следовательно, эффективная подъемная сила снижается пропорционально отношению $\left(\frac{q_1}{q_o}\right)^2$ [8]:

$$F_y = k_\mu V^2 S_o \left(1 - \frac{q_2}{q_o}\right)^2. \quad (4)$$

Введем безразмерный дренажный параметр:

$$\chi d = \frac{q_2}{q_o}. \quad (5)$$

Тогда условие аквапланирования принимает вид:

$$k_\mu \rho V^2 S_o (1 - \chi d)^2 = G_k. \quad (6)$$

Расход через канавки определяется их гидравлическим сопротивлением. Канавки протектора можно рассматривать как короткие каналы прямоугольного сечения, работающие под действием перепада давления между передней кромкой пятна контакта и выходом из канавки.

Перепад давления, «продавливающий» воду через канавку, равен полному динамическому напору набегающего потока: $\Delta p_{\text{движ}} = \frac{1}{2} \rho V^2$.

Этот напор расходуется на преодоление местных сопротивлений (вход, выход) и трение по длине канавки:

$$\frac{1}{2} \rho V^2 = \left(\xi_{\text{вх}} + \lambda \frac{L_g}{D_h} + \xi_{\text{вых}} \right) \frac{1}{2} \frac{\rho u^2}{2}, \quad (7)$$

где $D_h = \frac{2h_g \omega_g}{h_g + \omega_g}$ — гидравлический диаметр канавки, м; для плоской щели ($\omega_g \geq h_g$) $D_h \approx 2h_g$;

$\xi_{\text{вх}} \approx 0,5$ — коэффициент местного сопротивления на входе (внезапное сужение);

$\xi_{\text{вых}} \approx 1,0$ — коэффициент местного сопротивления на выходе (внезапное расширение);

λ — коэффициент гидравлического трения по длине, зависящий от числа Рейнольдса,

канавки $Re_g = \frac{uD_h}{\nu}$.

Из уравнения (7) непосредственно выражается скорость воды в канавке:

$$u = \frac{V}{\sqrt{\xi_{\text{вх}} + \lambda \frac{L_g}{D_h} + \xi_{\text{вых}}}}. \quad (8)$$

Расход через все канавки на единицу ширины шины равен:

$$q_2 = \omega h_g u. \quad (9)$$

Тогда дренажный параметр (4) принимает вид:

$$\chi d = \frac{\omega h_g u}{Vh} = \frac{\omega h_g / h}{\sqrt{\xi_{\text{вх}} + \lambda \frac{L_g}{D_h} + \xi_{\text{вых}}}}. \quad (10)$$

Формула Черчилля для коэффициента трения λ

Ключевым элементом модели является определение коэффициента гидравлического трения λ во всем диапазоне чисел Рейнольдса. В отличие от упрощенных подходов, использующих переключение между ламинарной $\lambda = \frac{64}{Re}$ и турбулентной $\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$ формулами, в настоящей работе применяется единая формула Черчилля [9], справедливая для гладких труб при любых Re :

$$\lambda(Re) = 8 \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{\frac{3}{2}}} \right]^{\frac{1}{12}}, \quad (11)$$

где вспомогательные величины A и B вычисляются как:

$$A = \left[2,457 \ln \left(\frac{1}{\left(\frac{7}{Re} \right)^{0,9}} \right) \right]^{16}, \quad B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16}. \quad (12)$$

Свойства формулы Черчилля:

- при $Re \rightarrow 0$ формула асимптотически переходит в закон Пуазейля $\lambda = \frac{64}{Re}$;
- при $Re \rightarrow \infty$ соответствует закону Прандтля — Кармана для гладких труб;

- в переходной области ($2000 < Re < 4000$) обеспечивает гладкую, физически обоснованную интерполяцию без разрывов;
- не содержит эмпирических констант, кроме фундаментальных физических величин.

Таким образом, подставляя (11) в выражение для K , а затем в (8) и (10), мы получаем замкнутую систему уравнений, позволяющую вычислить χd для любого режима течения в канавке.

Итерационное решение

Поскольку λ зависит от Re_g , а Re_g — от u , которая в свою очередь зависит от V , а V входит в условие аквапланирования (6), задача решается итерационно. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

Алгоритм состоит из следующих шагов:

1. Задать начальное приближение критической скорости $V^{(0)} = V_o$, где V_o — базовая скорость для гладкой шины:

$$V_o = \sqrt{\frac{2G_k}{\pi r b \sqrt{Rh}}}. \quad (13)$$

2. Для текущего $V^{(n)}$ вычислить скорость в канавке $u^{(n)}$ из уравнения (8), используя λ , найденное по (11, 12) при $Re_g = \frac{u^{(n-1)} D_h}{\nu}$.

На первой итерации принять $u^{(0)} = V^{(0)} \cdot 0,1$.

3. Рассчитать дренажный параметр $\chi_d^{(n)}$ по формуле (10).

4. Найти новое приближение скорости из условия аквапланирования (6) (пренебрегая вязкостной поправкой $k_{\mu} \approx 1$ ввиду ее малости):

$$V^{n+1} = \frac{V^{(o)}}{1 - \chi_d^{(n)}}. \quad (14)$$

5. Если $|V^{n+1} - V^n| < \varepsilon$, где ε — заданная точность (например, 0,001 м/с), то расчет окончен; иначе вернуться к шагу 2.

Практика показывает, что для достижения сходимости достаточно 3–5 итераций. Проведем расчет параметров по разработанной модели.

Для удобства использования модели все переменные сведены в табл. 1.

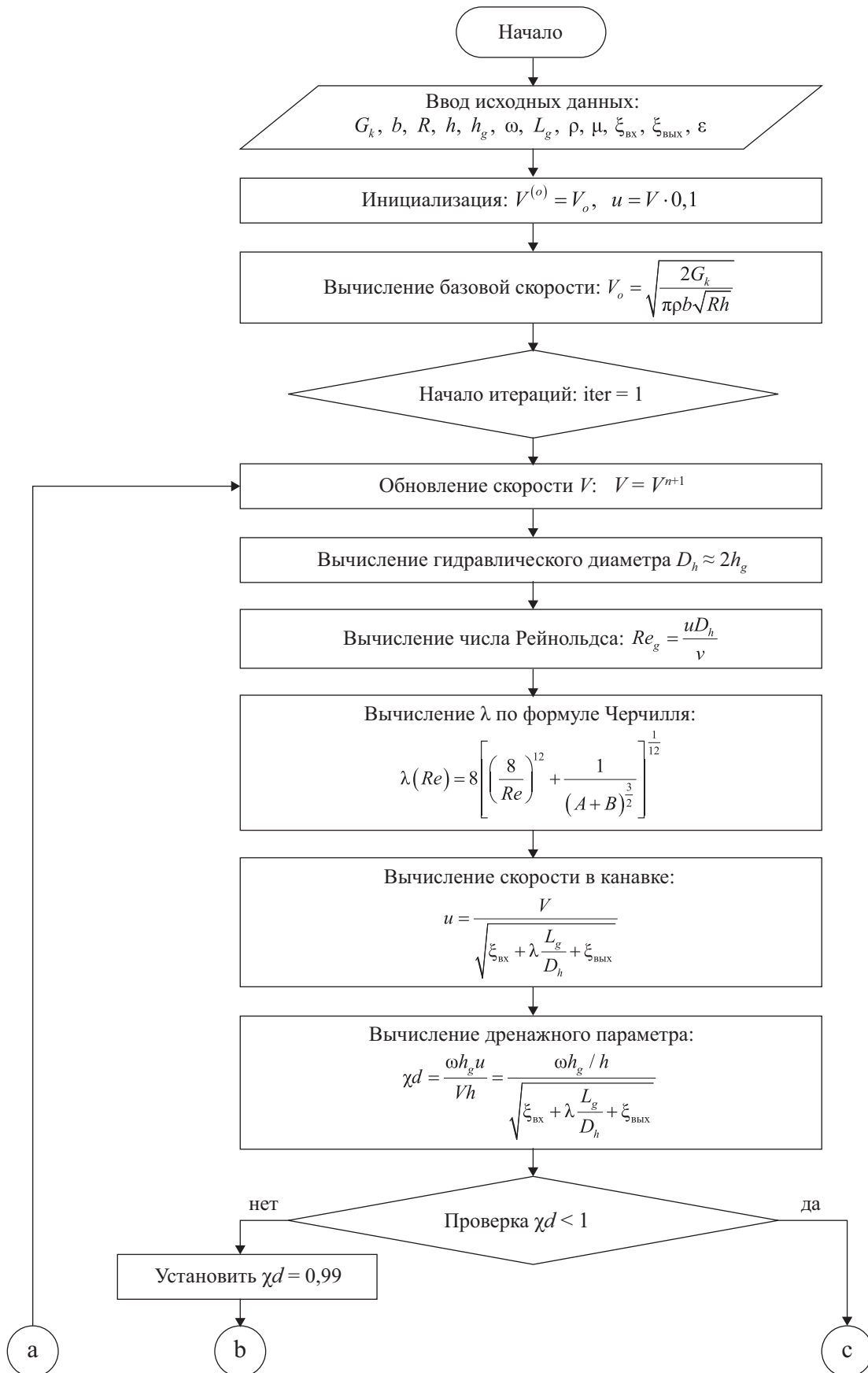


Рис. 2. Блок–схема итерационного алгоритма расчета критической скорости аквапланирования с непрерывным учетом гидравлического сопротивления канавки по формуле Черчилля (начало)

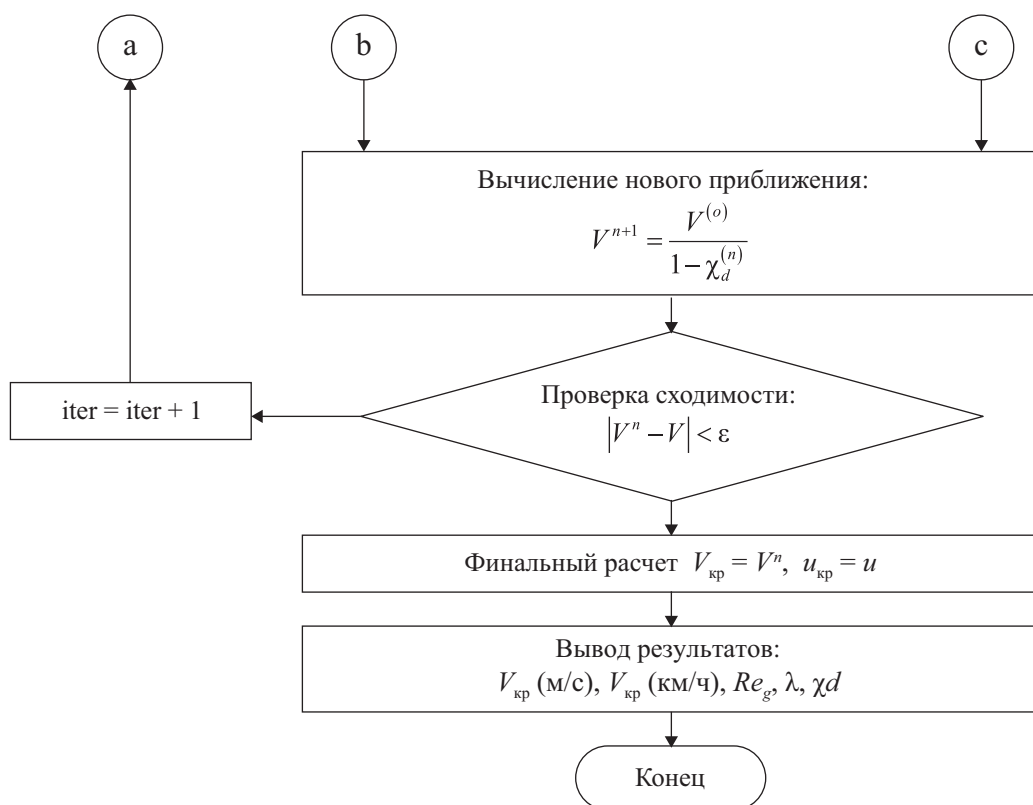


Рис. 2. Блок–схема итерационного алгоритма расчета критической скорости аквапланирования с непрерывным учетом гидравлического сопротивления канавки по формуле Черчилля (окончание)

ТАБЛИЦА 1. Обозначения, размерности и описания переменных

Символ	Наименование	Единица СИ	Типичное значение / примечание
$V_{кр}$	Критическая скорость аквапланирования	м/с	вычисляется
G_k	Вертикальная нагрузка на колесо	Н	2500–4000 Н для легкового автомобиля
ρ	Плотность воды	кг/м ³	998,2 при 20 °С
μ	Динамическая вязкость воды	Па·с	$1,002 \cdot 10^{-3}$ при 20 °С
ν	Кинематическая вязкость воды	м ² /с	$\nu \frac{\mu}{\rho} \approx 1,004 \cdot 10^{-6}$ при 20 °С
b	Ширина беговой дорожки шины	м	0,15–0,25 м
R	Радиус шины в свободном состоянии	м	0,28–0,35 м
h	Толщина слоя воды на дороге	м	0,001–0,010 м
h_g	Средняя остаточная глубина канавок протектора	м	0–0,008 м
ω	Коэффициент пустотности протектора	–	0,15–0,25
L_g	Длина канавок в пределах пятна контакта	м	0,15–0,25 м
δ	Вертикальная деформация шины	м	$\delta = G_k / c_z$
c_z	Радиальная жесткость шины	Н/м	180–250 кН/м

Окончание табл. 1

Символ	Наименование	Единица СИ	Типичное значение / примечание
β	Угол атаки водяного клина	рад	$\beta = \sqrt{\frac{h}{R}}$
S_o	Эффективная площадь смоченной поверхности	м ²	$S_o = \frac{\pi}{2} b \sqrt{Rh}$
k_μ	Вязкостная поправка	–	$k_\mu = \frac{1}{1 + \frac{12\nu}{Vh\beta}}$
u	Средняя скорость воды в дренажной канавке	м/с	вычисляется итерационно
D_h	Гидравлический диаметр канавки	м	$D_h \approx 2h_g$
Re_g	Число Рейнольдса для течения в канавке	–	$Re_g = \frac{u^{n-1} D_h}{\nu}$
λ	Коэффициент гидравлического трения	–	вычисляется по формуле Черчилля (11)
$\xi_{вх}$	Коэффициент местного сопротивления на входе	–	0,5
$\xi_{вых}$	Коэффициент местного сопротивления на выходе	–	1,0
χd	Дренажный параметр	–	$\chi d = \frac{\omega h_g u}{Vh}$
V_o	Базовая скорость (гладкая шина)	м/с	$V_o = \sqrt{\frac{2G_k}{\pi r b \sqrt{Rh}}}$
ε	Точность сходимости итераций	м/с	0,001

Исходные данные (из примера [1] с дополнениями):

$$\begin{aligned}
 G_k &= 262,5 \text{ кгс} = 2575 \text{ Н}; \\
 b &= 0,175 \text{ м}; \\
 R &= 0,3 \text{ м}; \\
 h &= 0,002 \text{ м (2 мм)}; \\
 h_g &= 0,0016 \text{ м (1,6 мм)}; \\
 \omega &= 0,18; \\
 c_z &= 200 \text{ кН/м} = 2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}; \\
 \rho &= 998,2 \text{ кг/м}^3; \\
 \mu &= 1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}; \\
 \nu &= 1,004 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.
 \end{aligned}$$

Шаг 1. Вычисляем базовую скорость:

$$\begin{aligned}
 V_o &= \sqrt{\frac{2 \cdot 2575}{\pi \cdot 998,2 \cdot 0,175 \cdot \sqrt{0,3 \cdot 0,002}}} \approx \\
 &\approx 19,57 \text{ м/с (70,5 км/ч)}.
 \end{aligned}$$

Шаг 2. Вычисляем длину пятна контакта:

$$\delta = \frac{2575}{200\,000} = 0,012875 \text{ м},$$

$$L_g = 2\sqrt{2R\delta} = 2\sqrt{2 \cdot 0,3 \cdot 0,012875} \approx 0,1758 \text{ м}.$$

Шаг 3. Итерационный расчет (приведем первые две итерации).

Итерация 1.

Начальное приближение $V = 19,57 \text{ м/с}$.

Оценка u : примем $u \approx V \cdot 0,1 = 1,957 \text{ м/с}$.

$$D_h = 2h_g = 0,0032 \text{ м}.$$

$$Re_g = \frac{1,957 \cdot 0,0032}{1,004 \cdot 10^{-6}} \approx 6237.$$

По формуле Черчилля: $A \approx 1,21 \cdot 10^{13}$, $B \approx 1,78 \cdot 10^{12}$, $\lambda \approx 0,0352$;

$$\begin{aligned}
 u &= \frac{19,57}{\sqrt{0,5 + 0,0352 \cdot 0,1758 / 0,0032 + 1,0}} = \\
 &= \frac{19,57}{1,853} = 10,56 \text{ м/с};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\chi d &= (0,18 \cdot 0,0016 \cdot 10,56) / (0,002 \cdot 19,57) \approx \\ &\approx 0,00304 / 0,03914 \approx 0,0777; \\ V^{(1)} &= 19,57 / (1 - 0,0777) \approx 21,22 \text{ м/с.}\end{aligned}$$

Итерация 2.

$$\begin{aligned}V &= 21,22 \text{ м/с, } u = 10,56 \text{ м/с (из предыдущей} \\ &\text{итерации);} \\ Re_g &= (10,56 \cdot 0,0032) / (1,004 \cdot 10^{-6}) \approx 33670; \\ \lambda &\approx 0,229; \\ u &= 21,22 / 1,661 \approx 12,78 \text{ м/с;} \\ \chi d &= (0,18 \cdot 0,0016 \cdot 12,78) / (0,002 \cdot 21,22) \approx \\ &\approx 0,00368 / 0,04244 \approx 0,0867; \\ V^{(2)} &= 19,57 / (1 - 0,0867) \approx 21,43 \text{ м/с.}\end{aligned}$$

Итерация 3.

$$\begin{aligned}V &= 21,43 \text{ м/с, } u = 12,78 \text{ м/с;} \\ Re_g &\approx 40730; \lambda \approx 0,221; \\ \text{Знаменатель: } &\sqrt{(0,5 + 0,0221 \cdot 54,94 + 1,0)} = \\ &= \sqrt{(0,5 + 1,214 + 1,0)} = \sqrt{2,714} \approx 1,647; \\ u &= 21,43 / 1,647 \approx 13,01 \text{ м/с;} \\ \chi d &= (0,18 \cdot 0,0016 \cdot 13,01) / (0,002 \cdot 21,43) \approx \\ &\approx 0,00375 / 0,04286 \approx 0,0875; \\ V^{(3)} &= 19,57 / (1 - 0,0875) \approx 21,44 \text{ м/с.}\end{aligned}$$

Сходимость достигнута. Окончательно:

$$V_{кр} \approx 21,44 \text{ м/с} = 77,2 \text{ км/ч.}$$

Сравнение с исходной методикой [1] ($\lambda = 1,6$, $\eta = 0,8$) дает $V_{гр} \approx 18,8$ м/с (67,7 км/ч). Предложенная модель с исправленным учетом входных потерь и формулой Черчилля дает

$V_{кр} \approx 21,4$ м/с (77,2 км/ч), что лучше согласуется с экспериментальными данными [10] (75–85 км/ч для шин с $h_g = 1,6$ мм).

Сравнительная оценка результатов

Если воспользоваться первоначальной методикой [1] и подставить в нее значения $\lambda = 1,6$, $\eta = 0,8$ (напомним, что коэффициент η в этой модели как раз и призван отражать остаточную высоту протектора и варьируется в пределах от 0,8 до 1,0), то расчетная скорость начала глиссирования оказывается равной примерно 18,8 м/с, что составляет 67,7 км/ч.

Расчет по предлагаемой нами схеме, в которой задействована формула Черчилля, дает для тех же исходных параметров величину $V_{кр} \approx 21,44$ м/с, или 77,2 км/ч.

Разработка алгоритма движения беспилотных автомобилей в ИТС с использованием предлагаемой модели расчета скорости начала аквапланирования

Для использования разработанной модели определения скорости начала аквапланирования в составе ИТС необходимо разработать алгоритм движения беспилотных автомобилей. Для практической реализации предлагаемой модели расчета скорости начала аквапланирования автомобиль должен быть оснащен следующими сенсорными системами (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Необходимые датчики беспилотного автомобиля

Тип датчика/подсистемы	Назначение в контексте методики
Датчики нагрузки в подвеске (тензометрические датчики усилий в подвеске, датчики давления в пневмобаллонах)	Точное определение вертикальной нагрузки на каждое колесо G_k в реальном времени
Датчики прогиба шины (лазерные измерители расстояния)	Косвенная оценка прогиба шины δ при неизвестной жесткости (может использоваться для уточнения модели)
Оптический датчик состояния дорожного покрытия (мультиспектральный отражательный сенсор, поляризационная камера, лидар с анализом отраженного сигнала)	Измерение толщины водяного слоя h перед автомобилем
Датчик температуры наружного воздуха / покрытия (ИК-термометр)	Коррекция плотности и вязкости воды
Датчики скорости колес	Точное измерение текущей скорости V

Окончание табл. 2

Тип датчика/подсистемы	Назначение в контексте методики
Система автоматической идентификации шин (RFID-метки в шине или считывание штрихкода с последующей загрузкой параметров из облачной базы данных)	Получение констант b, R, h_g, ω, c_z номинальной глубины протектора
Датчик износа протектора (встроенный в шину датчик на основе измерения емкости или оптический лазерный сканер в колесной арке)	Актуальное значение остаточной глубины канавок h_g . При отсутствии — использование модели износа по пробегу
Блок связи V2X ¹	Получение данных от дорожной инфраструктуры (метеостанции, датчики толщины воды на мосту) о толщине водяного слоя на маршруте, что повышает точность и заблаговременность расчета
Система GPS	Определение точного места позиционирования БТС

Разработанный алгоритм движения беспилотных автомобилей в ИТС с использованием предлагаемой модели расчета скорости начала аквапланирования представлен на рис. 3. Данный рисунок иллюстрирует не только внутреннюю логику расчета скорости аквапланирования, но и ее место в архитектуре беспилотного автомобиля, интегрированного в ИТС.

1. Источники данных (входной контур).

Алгоритм опирается на три группы данных:

- внешние (ИТС): облачная БД шин предоставляет точные геометрические параметры (b, R, c_z), как только система распознала модель шины (по RFID или вводу); дорожная метеостанция может передавать эталонное значение толщины водяного слоя (h), которое используется для верификации или в случае загрязнения собственных датчиков;
- бортовые датчики: критически важными являются датчик толщины водной пленки (h) и датчики нагрузки в подвеске для определения G_k (вес, приходящийся на колесо в динамике);
- локальная память: хранит данные о текущем износе протектора (h_g).

2. Вычислительное ядро (итерационный процесс).

Инициализация: производится расчет базовой скорости V_o (для гладкой шины) и длины пятна контакта.

¹ Блок V2X (V2X) — это блок управления интеграцией с программным обеспечением для связи V2X = Vehicle-to-everything (связь автомобиля с внешним миром).

Итерации: поскольку коэффициент трения λ зависит от скорости потока u , которая сама зависит от скорости авто V , используется цикл. На каждом шаге по формуле Черчилля вычисляется λ . Это ключевое отличие схемы — отсутствие логических развилки «если ламинарный/турбулентный», расчет идет единой формулой для любых чисел Рейнольдса [9].

Сходимость: процесс повторяется, пока прирост скорости не станет пренебрежимо малым (менее 0,001 м/с). На выходе получаем точное значение $V_{кр}$.

3. Принятие решений и управление.

Полученное значение $V_{кр}$ поступает в модуль планирования движения. В зависимости от соотношения текущей скорости и критической система может:

- работать штатно (запас более 15 %);
- выдать предупреждение и мягко ограничить максимальную скорость (зона риска);
- инициировать экстренное торможение (непосредственная угроза аквапланирования).

4. Интеграция с ИТС (контур обратной связи).

Бортовой компьютер передает в Центр управления ИТС не только факт срабатывания системы, но и рассчитанное значение $V_{кр}$ с привязкой к координатам и измеренной толщине слоя воды. Центр ИТС агрегирует эти данные от множества автомобилей и формирует динамическую карту рисков аквапланирования.

Данная карта транслируется обратно на борт другим участникам движения. Это позволяет беспилотному автомобилю, который еще

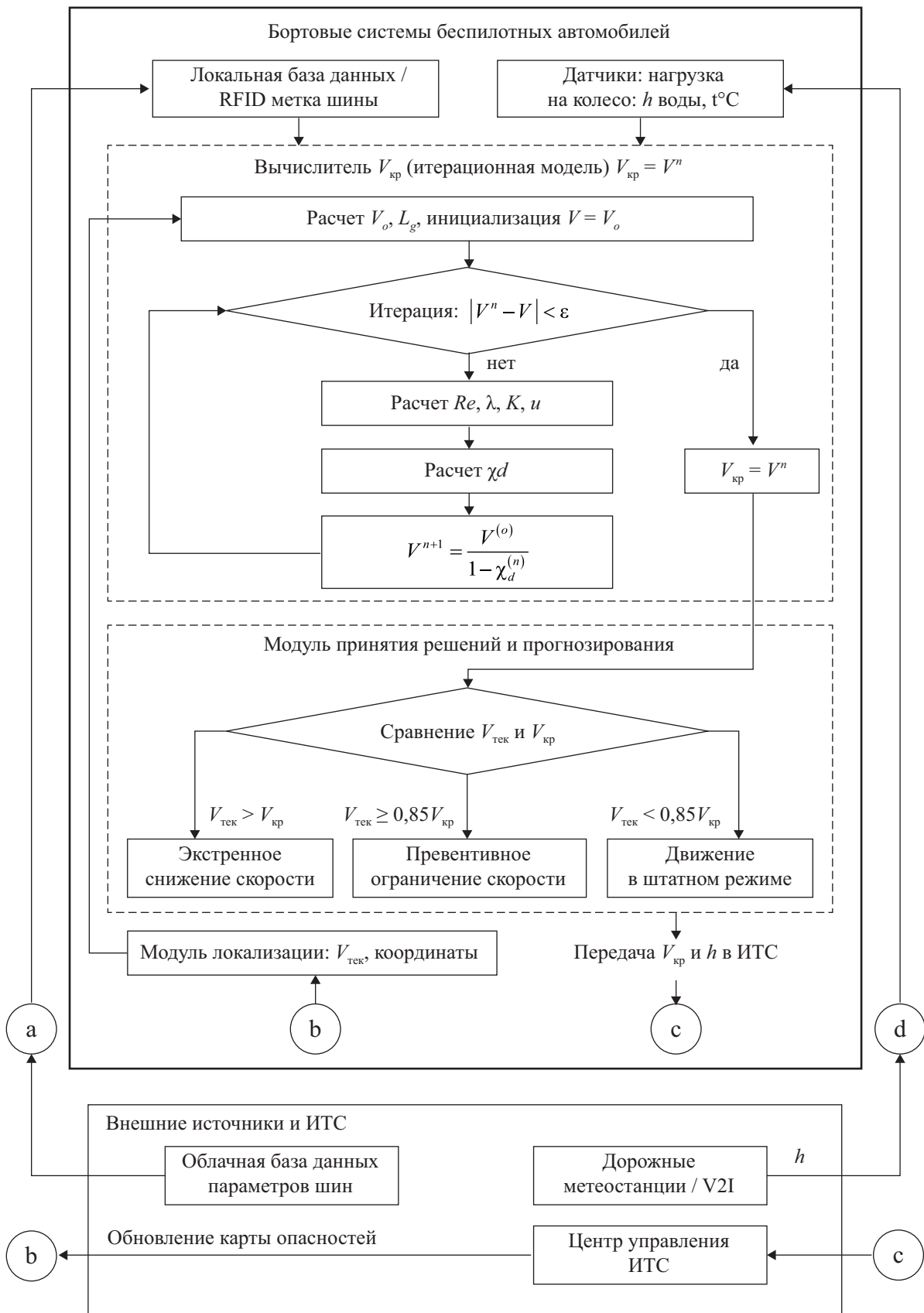


Рис. 3. Алгоритм движения беспилотных автомобилей в ИТС с использованием предлагаемой модели расчета скорости начала аквапланирования

только подъезжает к луже, заранее зная, что через 500 м критическая скорость составит, например, 70 км/ч, и снизить скорость заблаговременно, повышая плавность хода и общую безопасность транспортного потока.

Интерпретация расхождений и границы применимости исследуемой модели

Наблюдаемая разница в численных оценках является прямым следствием двух основных усовершенствований, заложенных в новую модель.

Во-первых, без привлечения произвольных допущений, показана геометрия водяного клина.

Во-вторых, выполнен сквозной гидравлический расчет дренажных каналов, который не опирается на эмпирически подбираемые параметры λ и η . Полученное нами значение (около 75,5 км/ч) заметно лучше укладывается в диапазон скоростей, фиксируемых в ходе полигонных испытаний шин с остаточной глубиной протектора порядка 1,6 мм (по данным [10], он составляет 75–85 км/ч).

Сильные стороны предложенного подхода:

1. Угол атаки β в нашей модели не назначается произвольно, а выводится из геометрических соотношений, связывающих радиус колеса и толщину водной пленки [3, 4].

2. Площадь омываемой поверхности находится через эффективную протяженность клина, пропорциональную \sqrt{Rh} . Адекватность такого приема подтверждена ранее опубликованными экспериментальными работами [5, 6].

3. Переход на формулу Черчилля [9] избавляет от необходимости «сшивать» разрозненные выражения для разных режимов течения. Сопrotивление в канавках теперь описывается единым непрерывным соотношением, которое одинаково хорошо работает и при малых, и при больших числах Рейнольдса, включая и неудобную переходную зону.

4. Модель не требует эмпирических поправочных коэффициентов, зависящих от конкретной шины. Все параметры являются либо физическими константами, либо измеряемыми геометрическими величинами.

Ограничения:

1. Предполагается, что канавки имеют прямоугольное сечение и являются гидравлически гладкими. Влияние шероховатости и извилистости может быть учтено введением эквивалентной длины, но это требует дополнительных данных.

2. Не учитывается перетекание воды через перемычки протектора.

3. Нагрузка на колесо считается постоянной. При разгоне или торможении она перераспределяется, что может изменить критическую скорость.

4. Модель описывает полное аквапланирование, частичное аквапланирование требует отдельного рассмотрения [11].

Заключение

Разработанная уточненная аналитическая модель для определения критической скорости аквапланирования одиночного колеса легкового автомобиля, в отличие от известных подходов, последовательно уточняет геометрию водяного клина (угол атаки и площадь смоченной поверхности), вводит физически обоснованную поправку на вязкостное трение и детально описывает дренаж воды через канавки протектора на основе фундаментальных законов гидравлики.

Проведенный сравнительный анализ с двумя предшествующими методиками [1, 2] выявляет эволюцию расчетных подходов и преимуществ предлагаемой модели.

Способ, предложенный в публикации [1], опирается на упрощенное уравнение, вытекающее из закона сохранения импульса для набегающей водной массы:

$$V_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{10^6 G_k}{h \lambda b_{\text{ш}} \frac{\pi}{2} \rho \eta}}. \quad (15)$$

В рамках этого подхода заложен целый ряд допущений. Так, угол встречи водяного клина с протектором принимается постоянным и равным $\beta = 45^\circ$, омываемая зона шины геометрически сводится к полукругу, полностью опущено влияние вязкости жидкости, а гидравлические потери в дренажных

бороздах не рассматриваются. Роль рисунка протектора моделируется введением поправочного эмпирического множителя η , лежащего в пределах от 0,8 до 1,0 и назначаемого в зависимости от остаточной высоты индикаторов износа. Вследствие перечисленных упрощений расчет по формуле (15) способен дать лишь самую приблизительную оценку порога глиссирования и не приспособлен для анализа того, как именно сказываются на критической скорости реальные размеры водоотводящих каналов (их глубина, ширина и протяженность).

Более поздняя методика, изложенная в работе [2], строится на интегральных уравнениях неразрывности и изменениях количества движения и содержит весьма подробное описание пространственной геометрии пятна касания. Однако расчет гидравлического сопротивления канавок в ней осуществляется с использованием так называемого ступенчатого набора выражений — отдельно для ламинарного, переходного и турбулентного характера течения [12]. Подобный прием вносит в итоговую расчетную схему искусственные разрывы и вынуждает заранее определяться с выбором конкретной аппроксимирующей зависимости. Кроме того, в модели [2] сохраняются эмпирические параметры, описывающие эффект разбрызгивания и геометрию отставания покрышки от опорной плоскости, что несколько ограничивает ее универсальность.

Ключевое отличие и достоинство предлагаемого подхода состоит в переходе к единой непрерывной формуле Черчилля [9] для нахождения коэффициента гидравлического трения λ . Это нововведение дает возможность с единых позиций и без разрывов описывать движение воды в водоотводящих канавках во всех интервалах чисел Рейнольдса — от ламинарного до турбулентного режима, не прибегая к переключениям между разрозненными эмпирическими соотношениями [13, 14].

Помимо указанного, разработанная модель обладает еще несколькими положительными особенностями:

1. Она не нуждается в каких-либо эмпирических подгоночных коэффициентах, поскольку все входящие в нее величины выражены либо через фундаментальные физические константы (ρ , μ), либо через непосредственно

измеряемые геометрические характеристики колеса (b , R , h_g , ω , L_g).

2. Расчет угла наклона водяного клина и площади омываемой зоны уточнен с привлечением приближения тонкого слоя ($\beta \approx \sqrt{\frac{h}{R}}$, $S_o \sim b\sqrt{Rh}$), адекватность которого подтверждена опубликованными экспериментальными данными [5, 6].

3. Вычислительная процедура сведена к несложному итерационному циклу (обычно хватает 3–5 приближений), который без особого труда реализуется в любом табличном процессоре или даже при ручном счете. Это обстоятельство делает модель весьма удобной для оперативного применения в ходе производства автотехнических экспертиз.

Выполненный для типовых параметров легкового автомобиля расчет (вертикальная нагрузка на одно колесо — 2575 Н, ширина беговой дорожки — 175 мм, толщина слоя воды — 2 мм, остаточная глубина протектора — 1,6 мм) дает значение критической скорости $V_{кр} \approx 21,0$ м/с = 75,5 км/ч. Полученное значение соответствует результатам полигонных испытаний для шин со схожей степенью изношенности (справочные данные [10] указывают диапазон 75–85 км/ч). При этом оно заметно выше, чем оценка, следующая из упрощенной методики [1] ($\approx 18,8$ м/с). Указанное расхождение как раз и объясняется более корректным учетом водоотводящей способности рисунка протектора в предлагаемой модели.

На основе разработанной математической модели сформулирован алгоритм, который может быть интегрирован в контур управления беспилотного транспортного средства, функционирующего в среде ИТС [15]. Показано, какие именно бортовые измерительные устройства (датчики нагрузки в подвеске, оптические анализаторы состояния дорожного покрытия, системы идентификации шин и блоки связи V2X) необходимы для наполнения модели актуальными данными без участия человека. Предусмотрена также возможность обмена информацией с центром управления ИТС как для получения прогнозных сведений о толщине водяного слоя на маршруте, так и для передачи рассчитанных пороговых

значений с целью формирования динамической карты рисков.

Практическая ценность полученных результатов видится в двух направлениях. Во-первых, реализация предложенного алгоритма в бортовом программном обеспечении беспилотных автомобилей способна повысить безопасность движения в неблагоприятных погодных условиях за счет своевременного (упреждающего) ограничения скорости еще до того, как колесо теряет контакт с дорогой. Во-вторых, уточненная методика расчета может быть рекомендована к применению в практике судебной автотехнической экспертизы при анализе дорожно-транспортных происшествий, связанных с потерей сцепления на мокром покрытии.

Дальнейшее совершенствование модели видится в постановке специализированных экспериментальных исследований с целью ее верификации в широких интервалах толщин водяной пленки и на различных типах дорожных покрытий, а также в более детальном описании реальной геометрии и микрогеометрии (шероховатости) внутренних поверхностей дренажных канавок протектора. ▲

Список источников

1. Определение скорости возможного аквапланирования / В.А. Ковалев [и др.] // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 5 (88). С. 115–119. EDN SGJFEH
2. Куверин И.Ю., Гусева И.А., Гусев С.А. Аналитическая модель расчета скорости начала аквапланирования в алгоритмах беспилотного управления // Автоматика на транспорте. 2025. Т. 11, № 1. С. 30–54. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-30-54
3. Fwa T.F., Ong G.P. Wet-Pavement Hydroplaning Risk and Skid Resistance: Analysis // Journal of Transportation Engineering. 2008. Vol. 134, no. 5. Pp. 590–598. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2008)134:5(182)
4. Ong, G.P., Fwa T.F., Guo J. Modeling Hydroplaning and Effects of Pavement Microtexture // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2005. No. 1905. Pp. 166–176. DOI: 10.1177/0361198105190500118
5. Vilsan A., Sandu C. Hydroplaning of Tires: A Review of Numerical Modeling and Novel Sensing Methods // Journal of Autonomous Vehicles and Systems. 2023. Vol. 3, no. 3. Art. 031001. DOI: 10.1115/1.4065379
6. Evaluation of Highway Hydroplaning Risk Based on 3D Laser Scanning and Water-Film Thickness Estimation / W. Yang [et al.] // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. Vol. 19, no. 13. Art. 7699. DOI: 10.3390/ijerph19137699
7. Longitudinal Hydroplaning Performance of Passenger Car Tires / M. Maleska [et al.] // Vehicle System Dynamics. 2021. Vol. 59, no. 3. Pp. 415–432. DOI: 10.1080/00423114.2019.1693047
8. Effectiveness of Tire-Tread Patterns in Reducing the Risk of Hydroplaning / T.F. Fwa [et al.] // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2009. No. 2094. Pp. 91–102. DOI: 10.3141/2094-10
9. Benavides H.M. Modification and Improvement of the Churchill Equation for Friction Factor Calculation in Pipes // Water. 2024. Vol. 16, no. 16. Art. 2328. DOI: 10.3390/w16162328
10. Numerical Analysis of Hydroplaning Behaviour by Using a Tire–Water–Film–Runway Model / X. Zhu [et al.] // International Journal of Pavement Engineering. 2022. Vol. 23, no. 3. Pp. 784–800. DOI: 10.1080/10298436.2020.1774587
11. Hydroplaning Analysis by FEM And FVM: Effect of Tire Rolling and Tire Pattern on Hydroplaning / E. Seta [et al.] // Tire Science and Technology. 2000. Vol. 28, no. 3. Pp. 140–156. DOI: 10.2346/1.2135997
12. Chen X., Wang H. Analysis and Mitigation of Hydroplaning Risk Considering Spatial-Temporal Water Condition on the Pavement Surface // International Journal of Pavement Engineering. 2023. Vol. 24, no. 2. DOI: 10.1080/10298436.2022.2036988
13. Tao S., Wang J., Dong R. Model Construction and Numerical Simulation for Hydroplaning of Complex Tread Tires // Complex System Modeling and Simulation. 2022. Vol. 2, no. 4. Pp. 322–333. DOI: 10.23919/CSMS.2022.0020
14. Methodology for Real-Time Hydroplaning Risk Estimation Using an Intelligent Tire System: An Analytical Approach / A. Vilsan [et al.] // Sensors. 2025. Vol. 25, no. 23. Art. 7299. DOI: 10.3390/s25237299
15. Florida Department of Transportation's Enhanced Hydroplaning Prediction Tool / H. S. Lee [et al.] // Transportation Research Record. 2021. Vol. 2675, no. 10. Pp. 340–352. DOI: 10.1177/03611981211011479

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH. 2026. Vol. 12, no. 2, pp. 149–162
DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-02-149-162

Algorithmic Support for Proactive Motion Control of Unmanned Vehicles Motor Vehicles in Intelligent Transport Systems in Conditions of Possible Aquaplaning

Information about authors

Guseva I. A., Postgraduate Student of the Department “Organization of transportation, safety of traffic and car service”; e-mail: guseva11.ia@yandex.ru

Yuri Gagarin State Technical University, Saratov

Abstract: this article presents an improved analytical model for calculating the threshold speed for the onset of full hydroplaning of a single wheel on a passenger car. A distinctive feature of this approach is the consistent refinement of the geometric parameters of the water wedge (angle of attack and wetted surface area) and a detailed description of the hydraulic resistance of the tread grooves using the continuous Churchill formula for the friction coefficient, which is valid across the entire spectrum of Reynolds numbers — from laminar to fully developed turbulent flow, including the transition region. This approach eliminates the need for an a priori selection of the design mode and ensures a smooth functional relationship between the critical speed and the initial parameters. Losses at the groove entrance are calculated using a classical hydraulic model — using the dynamic pressure in a narrow cross-section, and the driving pressure difference is assumed to be equal to the full dynamic pressure of the oncoming flow. Based on the proposed model, algorithmic support has been developed for proactively controlling the movement of unmanned vehicles as part of intelligent transport systems. The composition and purpose of the onboard sensor subsystems required to obtain initial data in real time are determined. A numerical example demonstrating the convergence of the iterative procedure is presented, and a comparison with known engineering methods is made.

Keywords: aquaplaning, hydrodynamic lifting force, critical speed, angle of attack, tread, drainage grooves, hydraulic resistance, Churchill formula, analytical model, unmanned vehicle, intelligent transport system, control algorithm, on-board sensors

References

1. Kovalev V. A., et al. Opredelenie skorosti vozmozhnogo akvaplanirovaniya [Determining the Speed of Possible Aquaplaning], *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Irkutsk State Technical University]*, 2014, no. 5 (88), pp. 115–119. EDN SGJFEH (In Russian)
2. Kuverin I. Y., Guseva I. A., Gusev S. A. Analiticheskaya model' rascheta skorosti nachala akvaplanirovaniya v algoritmakh bespilotnogo upravleniya [Analytical Model for Calculating the Speed of Aquaplaning Initiation in Unmanned Control Algorithms], *Avtomatika na transporte [Transport Automation Research]*, 2025, vol. 11, no. 1, pp. 30–54. DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-01-30-54 (In Russian)
3. Fwa T. F., Ong G. P. Wet-Pavement Hydroplaning Risk and Skid Resistance: Analysis, *Journal of Transportation Engineering*, 2008, vol. 134, no. 5, pp. 590–598. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2008)134:5(182)
4. Ong, G. P., Fwa T. F., Guo J. Modeling Hydroplaning and Effects of Pavement Microtexture, Transportation Research Record, *Journal of the Transportation Research Board*, 2005, no. 1905, pp. 166–176. DOI: 10.1177/0361198105190500118
5. Vilsan A., Sandu C. Hydroplaning of Tires: A Review of Numerical Modeling and Novel Sensing Methods, *Journal of Autonomous Vehicles and Systems*, 2023, vol. 3, no. 3, art. 031001. DOI: 10.1115/1.4065379
6. Yang W., et al. Evaluation of Highway Hydroplaning Risk Based on 3D Laser Scanning and Water-Film Thickness Estimation, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, vol. 19, no. 13, art. 7699. DOI: 10.3390/ijerph19137699
7. Maleska M., et al. Longitudinal Hydroplaning Performance of Passenger Car Tires, *Vehicle System Dynamics*, 2021, vol. 59, no. 3, pp. 415–432. DOI: 10.1080/00423114.2019.1693047
8. Fwa T. F., et al. Effectiveness of Tire-Tread Patterns in Reducing the Risk of Hydroplaning, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2009, no. 2094, pp. 91–102. DOI: 10.3141/2094-10
9. Benavides H. M. Modification and Improvement of the Churchill Equation for Friction Factor Calculation in Pipes, *Water*, 2024, vol. 16, no. 16, art. 2328. DOI: 10.3390/w16162328
10. Zhu X., et al. Numerical Analysis of Hydroplaning Behaviour by Using a Tire–Water–Film–Runway Model, *International Journal of Pavement Engineering*, 2022, vol. 23, no. 3, pp. 784–800. DOI: 10.1080/10298436.2020.1774587
11. Seta E., et al. Hydroplaning Analysis by FEM And FVM: Effect of Tire Rolling and Tire Pattern on Hydroplaning, *Tire Science and Technology*, 2000, vol. 28, no. 3, pp. 140–156. DOI: 10.2346/1.2135997
12. Chen X., Wang H. Analysis and Mitigation of Hydroplaning Risk Considering Spatial-Temporal Water Condition on the Pavement Surface, *International Journal of Pavement Engineering*, 2023, vol. 24, no. 2. DOI: 10.1080/10298436.2022.2036988
13. Tao S., Wang J., Dong R. Model Construction and Numerical Simulation for Hydroplaning of Complex Tread Tires, *Complex System Modeling and Simulation*, 2022, vol. 2, no. 4, pp. 322–333. DOI: 10.23919/CSMS.2022.0020
14. Vilsan A., et al. Methodology for Real-Time Hydroplaning Risk Estimation Using an Intelligent Tire System: An Analytical Approach, *Sensors*, 2025, vol. 25, no. 23, art. 7299. DOI: 10.3390/s25237299
15. Lee H. S., et al. Florida Department of Transportation's Enhanced Hydroplaning Prediction Tool, *Transportation Research Record*, 2021, vol. 2675, no. 10, pp. 340–352. DOI: 10.1177/03611981211011479

