



Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

АВТОМАТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH

Том 9 Декабрь 2023 № 4



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

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

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

Подписано в печать 08.12.2023. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 10,37. Тираж 200 экз. Заказ 0000.

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

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Александр Никитин	д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, главный редактор журнала «Автоматика на транспорте», Санкт-Петербург, Россия
Константин Бочков	д-р техн. наук, профессор, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Белоруссия
Марек Мезитис	д-р наук, доцент, Рижский технический университет, Рига, Латвия
Раймунд Убар	д-р техн. наук, академик Эстонской академии наук, Таллинский технический университет, Таллин, Эстония
Владимир Хаханов	д-р техн. наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина
Фуниан Ху	д-р наук, профессор, Школа электротехники педагогического университета Цзянсу, 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
Никищенко Сергей Алексеевич	д-р техн. наук, профессор, СамГУПС, Самара
Розенберг Ефим Наумович	д-р техн. наук, профессор, НИИАС, Москва
Ходаковский Валентин Аветикович	д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург
Хомоненко Анатолий Дмитриевич	д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург

INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL

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

EDITORIAL BOARD

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

Научно-технический журнал «Автоматика на транспорте»	СОДЕРЖАНИЕ
Учредитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС), Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»	ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ <i>Менакер К. В., Пультяков А. В., Востриков М. В., Орлов А. В.</i> Усовершенствование схемы блока управления электродвигателя малогабаритного стрелочного универсального.....313
Издатель ООО «Издательский Центр «РИОР» по договору № ЭА94514 от 19.12.2022	СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ <i>Розенберг Е. Н., Марков А. В., Озеров А. В.</i> Цифровые технологии пропуска по перегонам и станциям — основа организации движения на Московских центральных диаметрах324
Главный редактор А. Б. Никитин, д-р техн. наук, профессор ПГУПС, заведующий кафедрой	<i>Никитин А. Б., Журавлева Н. А., Корниенко А. А., Кушпиль И. В., Копытов Д. В.</i> Организация перевозочного процесса на участке с интегрированной распределенной архитектурой системы управления для полигонных технологий333
Редакция журнала Научный редактор — И. В. Кушпиль, канд. техн. наук Перевод — А.А. Лобанова Литературный редактор и корректор — Н. В. Юдина Верстка — И. Г. Иваньшина	ЭЛЕКТРОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ <i>Панков А. А., Нечаев Г. И., Мирошников В. В., Захарчук А. С., Будиков Л. Я., Коробейников Д. С., Михайлова И. Г.</i> Моделирование и экспериментальные исследования элементов пневмоники для систем управления транспортом342
Адрес учредителя 190031, РФ, Санкт-Петербург, Московский пр., 9, кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Телефон: +7(812)457-85-79 E-mail: ait.automatika@yandex.ru Сайт: www.atjournal.ru	<i>Митрохин М. А., Аляев А. О., Лобанов Р. И., Кирьянов В. Е.</i> Моделирование локальных транспортных потоков в условиях неполноты исходных данных.....355
Адрес издателя 127214, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1, оф. 402	<i>Белишклина Т. А., Константинова Т. Ю., Лыков А. А., Марков Д. С., Микадо Е. Н., Соколов В. Б.</i> Логико-временная формализация имитационных моделей систем железнодорожной автоматики и телемеханики368
Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-61375 от 10.04.2015, выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий 18 декабря 2017 года ISSN 2412-9186 Индекс подписки Агентство «Книга-Сервис» 33316	ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ СИСТЕМЫ <i>Ефанов Д. В., Тимошенков М. В., Сиваченко Л. А., Лесковец И. В.</i> Исследование двухмодульных взвешенных кодов с суммированием с произвольными разбиениями множества информационных символов377
© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2023	

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	OPERATION OF TRANSPORT SYSTEMS <i>Menaker K. V., Pul'tyakov A. V., Vostrikov M. V., Orlov A. V.,</i> Improvement of the Control Block Scheme for a Compact Universal Point Motor.....322
PUBLISHER "Publishing Center "RIOR", LLC № ЭА94514, 19.12.2022	TRANSPORT CONTROL SYSTEMS <i>Rozenberg E. N., Markov A. V., Ozerov A. V.</i> Digital Technologies for Train Passage through Sections and Stations — the Basis for Organizing Traffic on Moscow Central Diameters331
EDITOR-IN-CHIEF Nikitin A. B., Doctor in Engineering, Professor, Head of Department	<i>Nikitin A. B., Zhuravleva N. A., Korniyenko A. A., Kushpil I. V., Kopytov D. V.</i> Organization of the Transportation Process on a Section with an Integrated Distributed Architecture of the Control System for Polygon Technologies.....341
JOURNAL STAFF Science editor: Igor V. Kushpil, Ph. D. English translation: Anastasiya A. Lobanova Editing and proofreading: Nadezhda V. Yudina Layout: Irina G. Ivanshina	ELECTRONIC SIMULATION <i>Pankov A. A., Nechaev G. I., Miroshnikov V. V., Zaharchuk A. S., Budikov L. Ya., Korobejnikov D. S., Mihajlova I. G.</i> Modeling and Experimental Research of Pneumatic Elements for Transportation Control Systems.....353
FOUNDER'S ADDRESS 190031, Russia, St. Petersburg, Moskovskiy ave., 9, "Automation and Remote control on Railways" department +7(812) 457-85-79 ait.automatika@yandex.ru www.atjournal.ru	<i>Mitrokhin M. A., Alyaev A. O., Lobanov R. I., Kiryanov V. E.</i> Modeling of Local Traffic Flows under Conditions of Incomplete Initial Data366
PUBLISHER'S ADDRESS 127214, Russia, Moscow, Polyarnaya str., 31Bc1, of. 402	<i>Belishkina T. A., Konstantinova T. Yu., Lykov A. A., Markov D. S., Mikado E. N., Sokolov V. B.</i> Logical Time Formalization of Simulation Models for Railway Automation and Remote Control Systems375
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 "Kniga-Service" 33316 © PGUPS, 2023	TECHNICAL DIAGNOSTICS AND CONTROLLABLE SYSTEMS <i>Efanov D. V., Timoshenkov M. V., Sivachenko L. A., Leskovets I. V.</i> Research of Two-Modulus Weighted Codes with Summation Involving Arbitrary Partitions of Several Data Symbols387

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СХЕМЫ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ МАЛОГАБАРИТНОГО СТРЕЛОЧНОГО УНИВЕРСАЛЬНОГО

МЕНАКЕР Константин Владимирович, канд. техн. наук, доцент¹; e-mail: menkot@mail.ru
ПУЛЬТЯКОВ Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доцент²; e-mail: pultyakov@irgups.ru
ВОСТРИКОВ Максим Викторович, старший преподаватель¹; e-mail: aspirin1979@mail.ru
ОРЛОВ Александр Валерьевич, канд. техн. наук, доцент³; e-mail: suti.orlov@gmail.com

¹Забайкальский институт железнодорожного транспорта, кафедра «Электроснабжение», Чита

²Иркутский государственный университет путей сообщения, кафедра «Автоматика, телемеханика и связь», Иркутск

³Российский университет транспорта (МИИТ), кафедра «Системы управления транспортной инфраструктурой», Москва

Статья посвящена исследованию и усовершенствованию конструкции электродвигателя малогабаритного стрелочного универсального (ЭМСУ) и принципиальной схемы блока управления электродвигателем. Универсальный по питающему напряжению и частоте вращения ротора ЭМСУ был разработан взамен широко применяемых электродвигателей постоянного и переменного тока типов МСП, ДПС, МСТ и МСА. Универсальность ЭМСУ приводит к его массовому внедрению на сети железных дорог Российской Федерации. Отсутствие в свободном доступе информации об особенностях конструкции электродвигателя и принципиальной схемы блока его управления привело к необходимости проведения самостоятельного анализа его конструктива. В ходе работы была проведена разборка ЭМСУ с последующим анализом его механической и электрической частей, сбор и анализ статистической информации по его отказам различного вида, разработаны предложения по усовершенствованию конструктива электродвигателя.

Ключевые слова: электродвигатель; микропроцессорная система управления; выпрямитель; автономный инвертор напряжения; электронный ключ.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-04-313-323

▼ Введение

Разработка конструкций универсальных электродвигателей, имеющих возможность электропитания от различного рода тока, ведется как в нашей стране, так и за рубежом [1–5]. Электродвигатель малогабаритный стрелочный универсальный был разработан для применения с различными схемами управления стрелкой и замены электродвигателей постоянного и переменного тока типов МСП, ДПС, МСТ и МСА [6–8]. ЭМСУ является вентильно-индукторным двигателем с самовозбуждением (ВИД). Для электропитания от любого рода тока имеет встроенный трехфазный выпрямитель, инвертор и микропроцессорную систему управления (МСУ). Несмотря на повсеместное распространение ЭМСУ, кроме руководства по эксплуатации [9], информации в общем доступе по его техническому устройству крайне мало. Вопросам исследования надежности работы

электродвигателей, анализа причин отказов и разработки предложений по усовершенствованию их работы посвящено достаточно много научных трудов, в частности [10–13]. Данная работа посвящена исследованию конструктива и принципиальной схемы системы управления ЭМСУ, выявлению недостатков электродвигателя и выработке технических решений по его усовершенствованию.

1. Анализ конструктива ЭМСУ

Конструктивно ЭМСУ, как и любой вентильно-индукторный двигатель с самовозбуждением, по принципу действия прост и похож на шаговый двигатель. Ротор представляет собой зубчатую металлическую конструкцию, набранную из профильных листов электротехнической стали (рис. 1). Статор также представляет зубчатую конструкцию, но с другим числом зубьев и полюсов. Постоянный ток подается на



Рис. 1. Электродвигатель ЭМСУ в разобранном состоянии

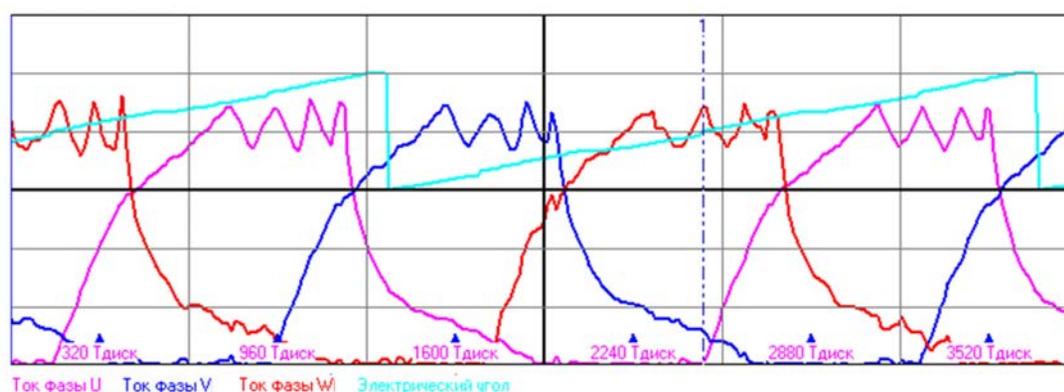


Рис. 2. Форма тока реального ВРД для трех фаз

обмотки статора в соответствии с текущим положением ротора. Фаз может быть разное количество. Фиксация текущего положения ротора может осуществляться различными способами (в ЭМСУ используются три оптических датчика по числу пар полюсов статора, перекрываемых специальным диском, расположенным на валу ротора (рис. 1). Форма тока реального ВРД для трех фаз показана на рис. 2.

Простота вентильно-индукторного двигателя является и его главным недостатком. Двигатель питается однополярными импульсами тока, требует схему многофазного преобразователя напряжения и датчиков положения ротора. Импульсный характер питающего тока зачастую приводит к выходу из строя обмоток статора и коммутационных элементов преобразователя вследствие действия ЭДС самоиндукции обмоток и к пульсациям вращающегося момента. В исследуемом образце ЭМСУ как раз были диагностированы сгоревшие обмотки одного из трех полюсов по причине импульсного характера питающего тока (рис. 3).



Рис. 3. Вышедшие из строя обмотки одного из полюсов ЭМСУ

Импульсный характер работы ВРД также приводит к неравномерности скорости перевода стрелки и уменьшению ресурса подшипников ротора. Данная проблема решается специальным профилированием формы питающего тока, что усложняет схему преобразователя напряжения, а также увеличением количества фаз, что приводит к усложнению конструктива электродвигателя.

2. Анализ принципиальной схемы микропроцессорной системы управления ЭМСУ

В руководстве по эксплуатации ЭМСУ представлены данные по типам его исполнения, отличительным особенностям, приведены основные технические характеристики. В данной работе при рассмотрении и анализе принципиальной схемы блока управления ЭМСУ, представленной на рис. 4, был взят за основу ее базовый вариант, применяемый в модификациях ЭМСУ-СП, ЭМСУ-ВСП и ЭМСУ-Ф. В других исполнениях электродвигателя принципиальная схема системы управления незначительно отличается, и на это будет сделан соответствующий акцент.

Электропитание ЭМСУ и блока его управления обеспечивается через разъем Х2. Диапазон рабочих напряжений от 160 В до 350 В постоянного тока и от 190 В до 250 В трехфазного переменного тока. Контакты клеммной колодки Х2 («1», «2» и «3») соответствуют обозначению токопроводящих проводов «С1», «С2» и «С3» в случае питания переменным трехфазным током и «С1», «Я» и «С2» в случае питания постоянным током. Конденсаторы С1–С3 и индуктивности L1–L3 образуют сетевые фильтры по каждой фазе для подавления кондуктивных помех на первичной стороне, образующихся в результате работы трехфазного инвертора. Одновременно индуктивности L1–L3 выполняют функцию ограничения пусковых токов при коммутации рабочей цепи схемы управления стрелкой. Подобные общетехнические решения подробно описаны в [14–17].

Блок коммутации цепи электропитания, включающий в себя два реле Р1 и Р2 и выпрямители D1 и D2, предназначен для гальванического снятия напряжения с выпрямителя и трехфазного инвертора в период действия контрольного режима.

При появлении трехфазного напряжения на клеммах «1», «2» и «3» клеммной колодки Х2 или постоянного напряжения на клеммах «1» и «2» или «3» и «2» (в зависимости от направления вращения электродвигателя) посредством выпрямителей D1 и (или) D2 напряжение подается на обмотку реле Р1 через тыловой

контакт реле Р2.1 и сопротивление R3. При срабатывании реле Р1 посредством его фронтального контакта Р1.3 коммутируется цепь питания обмотки реле Р2 через сопротивление R4. В результате реле Р1 встает под ток через собственный фронтальный контакт Р1.1 и фронтальный контакт Р2.2. Реле Р2 встает на самоблокировку через собственный контакт Р2.3. Реле Р1 и Р2 остаются под током до момента снятия напряжения в рабочей цепи и обеспечивают своими фронтальными контактами Р1.4, Р2.4, Р1.5 и Р2.5 коммутацию выпрямителя и трехфазного инвертора от цепи питания.

Варисторы U1–U3 обеспечивают защиту схемы выпрямителя и инвертора от возможных перенапряжений. Схема выпрямителя состоит из двух мостов D3 и D4, соединенных общей точкой. Схема позволяет обеспечить выпрямление как трехфазного напряжения, подаваемого на клеммы «1», «2» и «3» клеммной колодки Х2, так и однополярный пропуск тока в случае питания электродвигателя постоянным током при обоих направлениях его вращения.

Схема, построенная на сопротивлениях R5, R6, выпрямителях D5, D6 и оптронах BL1, BL2, обеспечивает определение рода питающего тока и направление вращения электродвигателя. При наличии трехфазного напряжения на клеммах колодки Х2 на выходах оптронов BL1 и BL2 появляются импульсы напряжения, начальные фазы которых соответствуют фазам питающего напряжения и зависят от направления вращения электродвигателя. При переводе стрелки и питании электродвигателя постоянным током в зависимости от направления его вращения на выходе одного из оптронов BL1 или BL2 появляется постоянное напряжение и сигналы с оптронов подаются на вход МСУ.

МСУ генерирует управляющие импульсы на затворы IGBT транзисторов VT1–VT6, которые обеспечивают пропуск тока через обмотки Fa, Fb и Fc электродвигателя в соответствии с сигналами датчика положения ротора (ДПР) и заданным направлением вращения. Ротор начинает вращаться с заданной частотой и в заданном направлении.

В ЭМСУ предусмотрены дополнительные аппаратно-программные средства защиты от

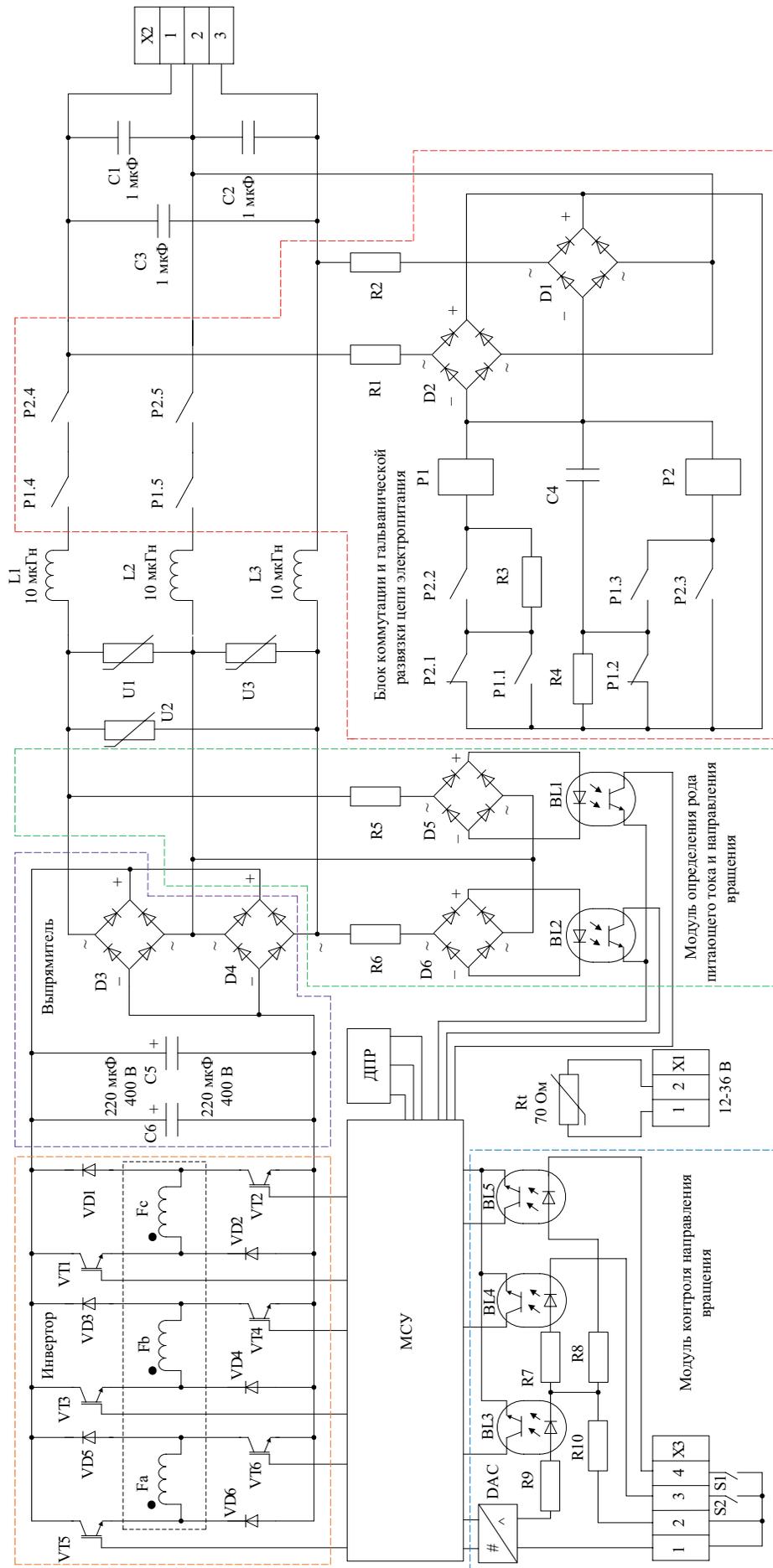


Рис. 4. Принципиальная схема блока управления ЭМСУ

несанкционированной работы. Ключи в цепях контактов «3» и «4» клеммной колодки ХЗ при замкнутых контактах «1» и «2» разрешают или запрещают вращение электродвигателя в ту или другую сторону соответственно.

Данная проверка осуществляется путем пропуска тока, полученного с цифро-аналогового преобразователя DAC через делители напряжения R7–R10, оптроны BL3–BL5 и контакты S1, S2. При замкнутом контакте S2 срабатывают оптроны BL3, BL4 и МСУ логически разрешает «правое» вращение вала электродвигателя. Замкнутый контакт S1 приводит в рабочее состояние оптроны BL3, BL5 и МСУ логически разрешает «левое» вращение вала электродвигателя. При разомкнутых контактах S1 и S2 срабатывает один оптрон BL3 и МСУ логически запрещает вращение вала электродвигателя.

В модификациях ЭМСУ типа ЭМСУ-СПГ, ЭМСУ-ФГ и ЭМСУ-ВСП разъем ХЗ отсутствует. В модификациях ЭМСУ типа ЭМСУ-СПГ, ЭМСУ-ФГ, ЭМСУ-СПМ, ЭМСУ-ВСПМ схема коммутации цепи электропитания, включающая в себя два реле P1 и P2 и два выпрямителя D1 и D2, отсутствует [9].

При пробое или обрыве любого транзистора или диода в схеме инвертора вращение электродвигателя становится невозможным вследствие действия постоянной составляющей тока на обмотке. Пробой двух транзисторных ключей в одном плече приводит к перегоранию предохранителя в линейном питающем проводе (на посту электрической централизации) и остановке электродвигателя. Дополнительно обрыв любой линии диагностируется МСУ. В случае неисправности схемы определения рода питающего тока и направления вращения электродвигателя его работа также прекращается.

Для обеспечения работы электродвигателя при отрицательных температурах в электронном блоке управления установлено сопротивление номиналом 70 Ом, подключенное к клеммной колодке Х1, на которую подается напряжение от 12 до 36 В.

Наличие микропроцессорного управления ЭМСУ дает дополнительные возможности, в частности программным способом устанавливать требуемое число оборотов в пределах от 500

об/мин до 2850 об/мин. На сегодняшний день такая опция предусмотрена только в заводских условиях. В качестве предложений по усовершенствованию можно предложить аппаратные или программные способы изменения числа оборотов ЭМСУ в условиях ремонтно-технологических участков дистанций сигнализации, централизации и блокировки. Кроме этого, обеспечивается плавность подхода остряка к рамному рельсу, реализуются функции «электронной фрикции» и диспетчерского контроля широкого ряда электрических параметров.

Несмотря на множество преимуществ новых электродвигателей перед их предшественниками, отметим выявленные в ходе их эксплуатации проблемы: перегорание обмоток статора и транзисторных ключей в результате импульсного характера питающего тока, нестабильная работа при низких температурах; отказ электронных компонентов схемы управления; нестабильная работа программного обеспечения; ослабление крепления блока управления в результате нестабильности оборотов вращения ротора.

3. Исследование действующей схемы преобразователя напряжения на базе автономного инвертора

Для проведения исследований работы электродвигателей широко применяется их моделирование [18–21], которое позволяет выявить недостатки и подтвердить правильность и корректность предлагаемых решений.

Трехфазный регулируемый преобразователь постоянного напряжения (ППН) в блоке управления ЭМСУ выполнен на базе автономного инвертора напряжения (АИН) по однотактной мостовой схеме с прямым включением диода, как показано на рис. 4. Каждая фаза (плечо) трехфазного инвертора представлена двумя транзисторами и двумя диодами в соответствующих диагоналях обмотки электродвигателя (рис. 5).

При одновременном включении транзисторов VT1 и VT2 на соответствующей обмотке электродвигателя появляется напряжение положительной полярности. При закрытии транзисторов VT1 и VT2 за счет энергии, запасенной в индуктивности, возникает ЭДС самоиндукции обратной полярности, диоды VD1

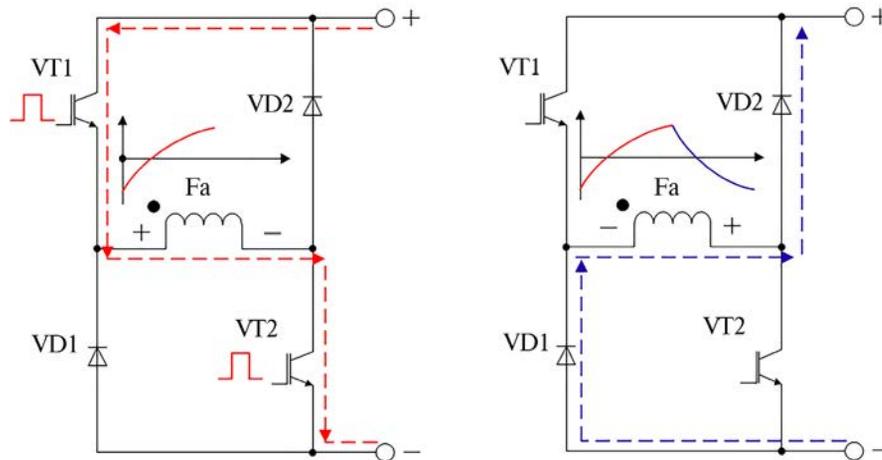


Рис. 5. ППН на базе АИН по одноконтурной мостовой схеме с прямым включением диода

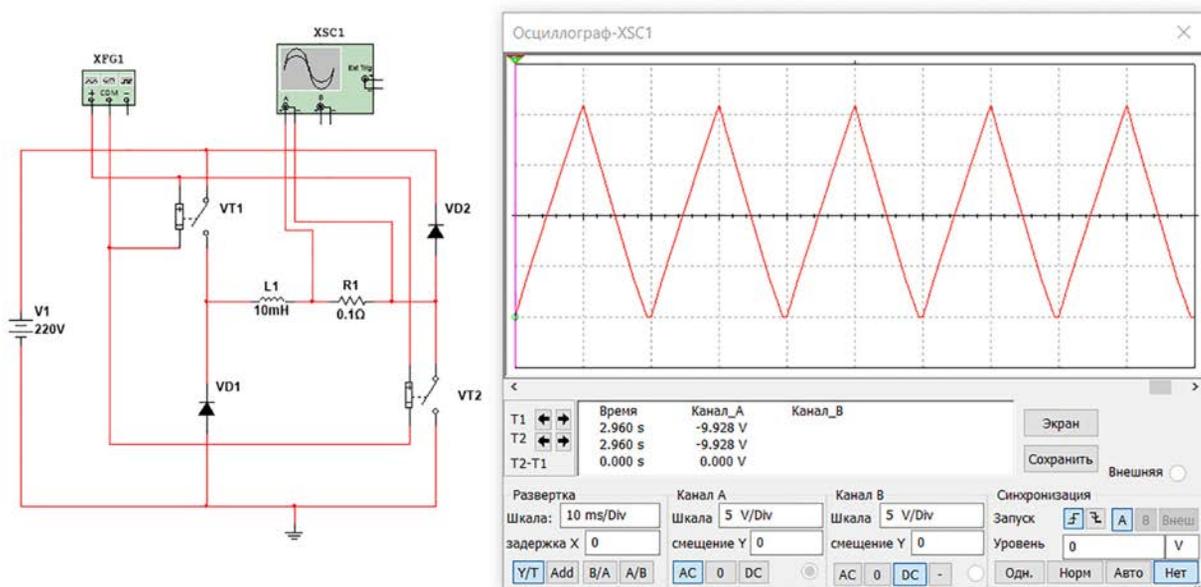


Рис. 6. Имитационная модель ППН на базе АИН по одноконтурной мостовой схеме с прямым включением диода

и VD2 открываются и энергия, накопленная в обмотке, отдается в источник электропитания. Работа транзисторных плеч во времени сдвинута на 120° . Данная схема применяется в источниках питания мощностью до нескольких сот ватт и не отличается высоким качеством преобразованного сигнала. Этот факт был подтвержден в ходе испытаний имитационной модели схемы инвертора, представленной на рис. 6, созданной в программном комплексе Multisim 14.0 [22].

Преобразованный сигнал на выходе применяемого в ЭМСУ инвертора далек от синусоидальной формы и изменяется по экспоненциальному закону во время насыщения индуктивности обмотки электродвигателя и

во время действия ЭДС самоиндукции при закрытых транзисторах. Данный факт приводит к действию высших гармонических составляющих, ускоренному старению изоляции обмоток электродвигателя, интенсивному выходу из строя обмоток статора и транзисторных ключей, на которые приходится до 20 % от всех отказов, согласно результатам исследований, представленным в работах [11, 13].

В связи с этим авторами предлагается усовершенствовать действующую схему преобразователя напряжения путем незначительного изменения соединений элементов и корректировки программного обеспечения с целью перепрофилирования формы питающего тока до синусоидального.

3. Предложения по усовершенствованию действующей схемы преобразователя напряжения

Авторами предлагается на имеющейся элементной базе реализовать трехфазную мостовую схему АИН на полностью управляемых вентилях, представленную на рис. 7.

В данной схеме АИН транзисторы каждого плеча управляются от схемы управления противофазными, широтно-импульсными модулированными сигналами (ШИМ). Работа транзисторных плеч во времени сдвинута на 120°. ШИМ-сигнал предлагается генерировать программным способом в МСУ электродвигателя.

С целью предварительного изучения аналогового способа получения ШИМ-сигнала была разработана соответствующая имитационная модель одного плеча, представленная на рис. 8.

Получение ШИМ-сигнала осуществляется путем сравнения синусоидального и пилообразного сигналов на компараторе. Частота синусоидального сигнала выбирается равной частоте сигнала на выходе инвертора, а амплитуда — чуть менее амплитуды пилообразного сигнала. Длительность пилообразного сигнала в классических схемах составляет 50 %, а его частота зависит от качества желаемого сигнала на выходе инвертора.

При частоте сигнала на выходе инвертора 50 Гц частота пилообразного сигнала должна быть не менее 500 Гц, а в качественных схемах доходить до нескольких десятков кГц. Длительность полученных на выходе компаратора импульсов определяется моментами времени пересечения синусоидального и пилообразного сигналов. При действии амплитудного

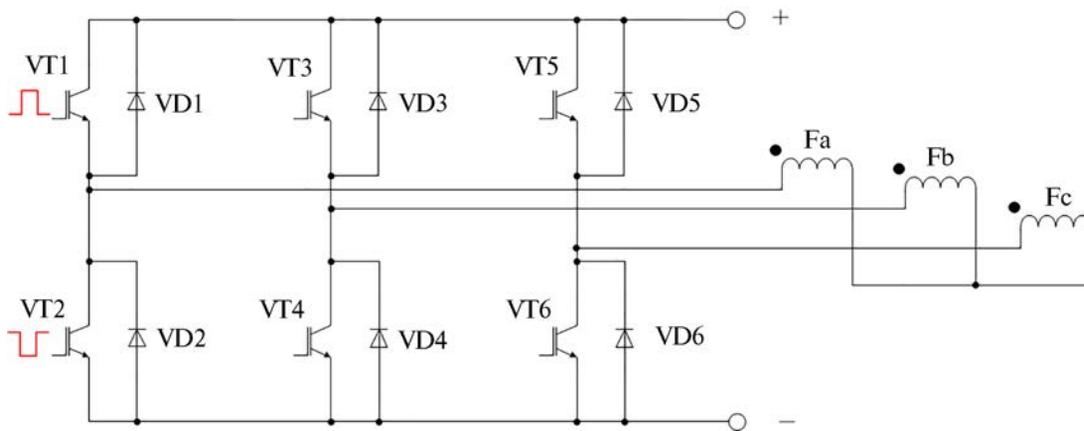


Рис. 7. Принципиальная схема трехфазного мостового АИН при соединении нагрузки звездой

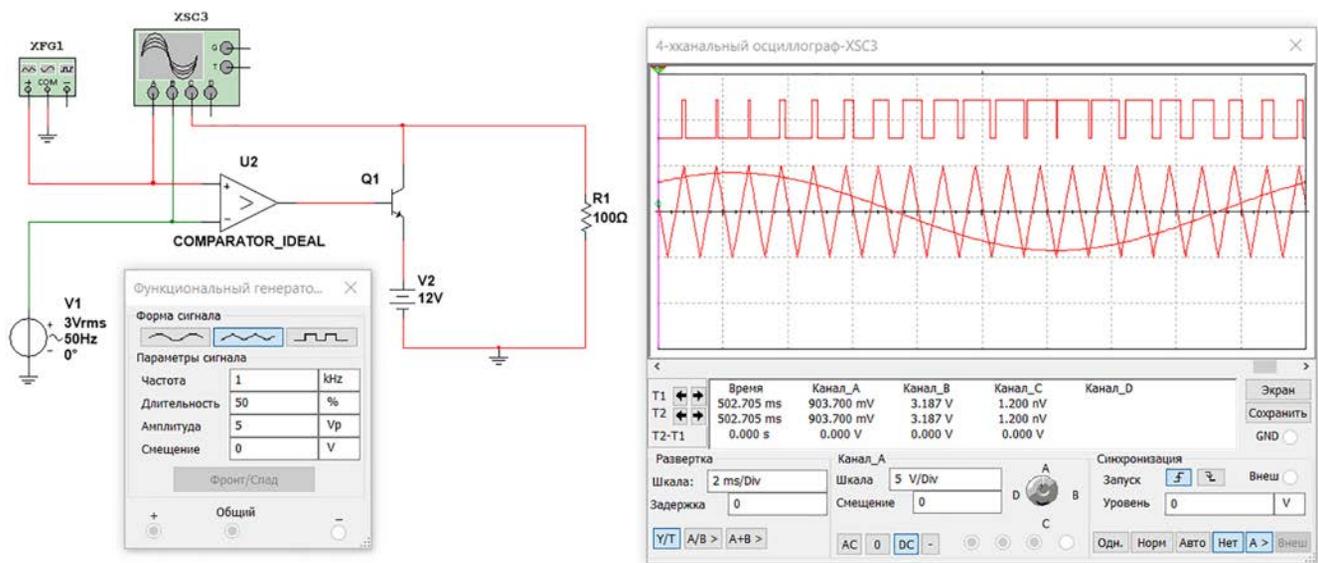


Рис. 8. Аналоговая схема получения ШИМ-сигнала

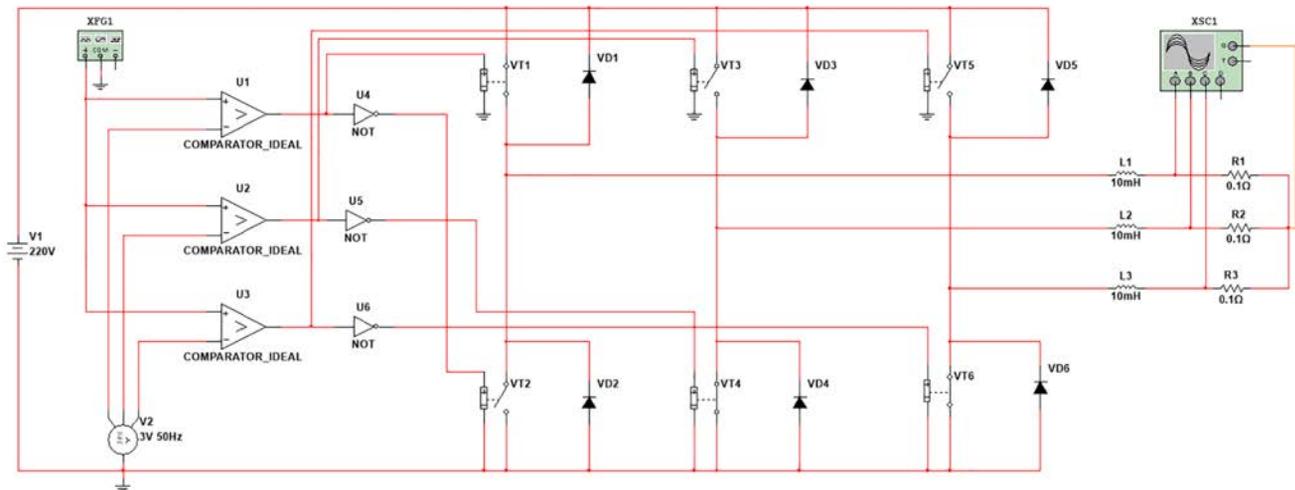


Рис. 9. Имитационная модель трехфазного мостового АИН

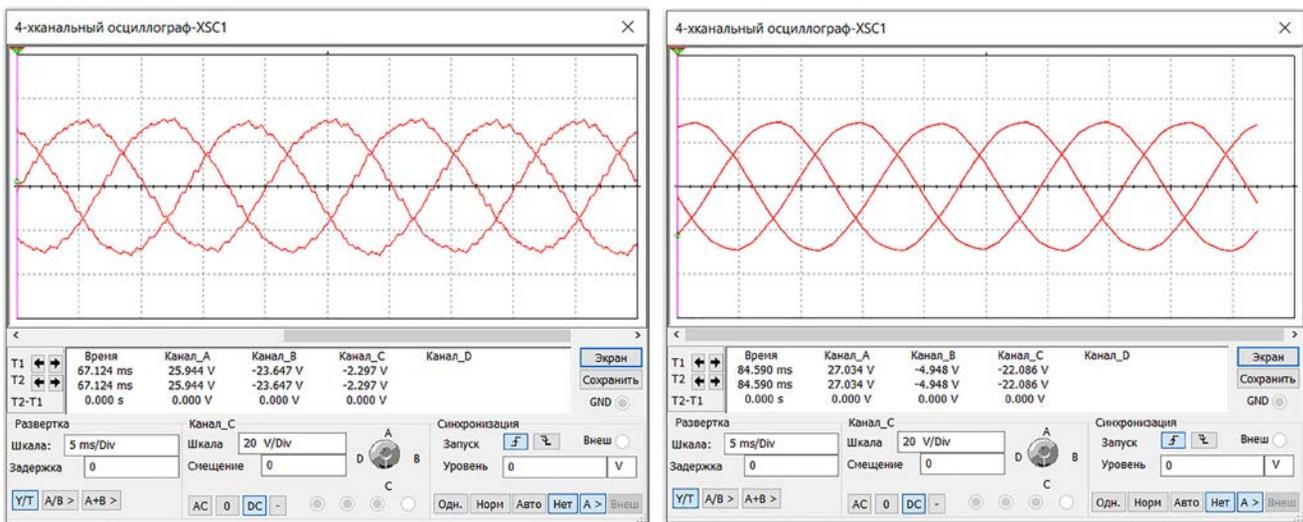


Рис. 10. Оциллограммы напряжения на обмотках электродвигателя при частоте пилообразного сигнала 1 и 10 кГц соответственно

значения положительной полуволны синусоидального сигнала на выходе компаратора действуют импульсы малой длительности. По мере уменьшения амплитуды синусоидального сигнала длительность импульсов увеличивается, достигая максимальной величины в момент времени действия амплитудного значения отрицательной полуволны.

С целью изучения качества выходного сигнала в схеме трехфазного мостового АИН была разработана имитационная модель в программном комплексе Multisim 14.0, которая представлена на рис. 9.

Оциллограммы напряжения, полученные в имитационной модели на активных составляющих сопротивлений R1, R2, R3 обмоток электродвигателя L1, L2, L3 при частоте

пилообразного сигнала 1 и 10 кГц соответственно представлены на рис. 10.

Анализ оциллограмм подтверждает высокое качество сигналов, полученных при работе трехфазного мостового АИН даже при частоте пилообразного сигнала в 1 кГц. При увеличении частоты данного сигнала до 10 кГц на выходе инвертора наблюдается чистый синусоидальный сигнал.

Таким образом, предложение по усовершенствованию схемы инвертора ЭМСУ не коснется изменения перечня элементов и их количества, а также размещения элементов на печатной плате. Изменению подвергнется лишь топология соединения транзисторных ключей с их заменой на транзисторы с защитными диодами. Возможно также применение

внешних защитных диодов из числа уже имеющихся в действующей схеме.

При этом усовершенствованная схема трехфазного инвертора позволит перепрофилировать форму питающего тока с импульсно-экспоненциального до синусоидального, что обеспечит стабильность оборотов электродвигателя, повысит надежность работы его обмоток и электронных ключей, уменьшит старение изоляции обмоток за счет уменьшения спектра высших гармоник, повысит ресурс подшипников.

Заключение

В данной работе проведен полный анализ конструктива ЭМСУ и схемы его управления. Выявлено, что ЭМСУ относится к вентильно-индукторным двигателям со всеми присущими этому типу двигателей достоинствами и недостатками. Микропроцессорная схема управления электродвигателя выполнена на базе автономного трехфазного инвертора напряжения (АИН) по однотактной мостовой схеме с прямым включением диода. Вследствие импульсного характера выходных сигналов указанная схема обладает рядом существенных недостатков, которые проявляются в виде:

- значительного числа пробоев обмоток статора и ключевых элементов вследствие действия обратной электродвижущей силы;
- неравномерности вращения вала электродвигателя;
- вибраций, связанных с действием высших гармоник;
- интенсивного износа изоляции и подшипниковых узлов.

С целью повышения надежности ЭМСУ авторами предложено провести модернизацию схемы инвертора МСУ путем ее трансформации в трехфазную мостовую схему на полностью управляемых вентилях с ШИМ-управлением. ШИМ-управление предложено организовать программным путем без существенных схемотехнических изменений. Данные аппаратно-программные изменения позволят осуществить профилирование формы питающего тока к синусоидальной форме и исключить указанные недостатки МСУ.

В целом предложенные схемотехнические решения по усовершенствованию МСУ позволят значительно повысить ресурс электродвигателя без значительных и дорогостоящих технологических изменений процесса его изготовления. ▲

Библиографический список

1. Abdeljawed H. B. Simulation and rapid control prototyping of DC powered universal motors speed control: Towards an efficient operation in future DC homes / H. B. Abdeljawed, L. E. Amraoui // *Engineering Science and Technology*. — 2022. — Pp. 2–7.
2. Syrigos S. P. An alternative universal motor drive with unity power factor operating in DC and AC modes / S. P. Syrigos, E. C. Tatakis // *XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. — Lausanne, 2016. — Pp. 962–968.
3. Stal'naya M. I. To the question of development of the universal model of a three-phase electric motor with the use of computer simulation tools / M. I. Stal'naya, S. Yu. Eremochkin // *Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) — proceedings APEIE-2018: 14th international scientific-technical conference*. — Novosibirsk: NSTU, 2018. — Pp. 439–444. — DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545924.
4. Lee T.-W. Control of c-dump converters fed switched reluctance motor on an automotive application / T.-W. Lee et al. // *Electric Power Systems Research*. — 2007. — Vol. 77. — Iss. 7. — Pp. 804–812.
5. Nakamura K. Electromagnetic and motion-coupled analysis for switched reluctance motor — based on reluctance network analysis / K. Nakamura, K. Kimura, O. Ichinokura // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. — 2005. — Vol. 290–291. — Part 2. — Pp. 1309–1312.
6. Ганеев Э. А. Универсальный стрелочный электродвигатель / Э. А. Ганеев, А. Ю. Грайфер // *Автоматика, связь, информатика*. — 2013. — № 1. — С. 16–17.
7. Кондратюк Т. В. О внедрении новых электродвигателей для стрелочных горочных приводов / Т. В. Кондратюк, М. В. Копанев, О. И. Монида // *Молодая наука Сибири*. — 2021. — № 1(11). — С. 277–282.
8. Янин, А. О. Перспектива замены стрелочных электродвигателей на железной дороге / А. О. Янин, Д. В. Трофимчук, Е. П. Епифанова // *Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке*. — 2022. — Т. 1. — С. 163–168.
9. Электродвигатель малогабаритный стрелочный универсальный ЭМСУ-СП и его модификации. Руководство по эксплуатации 22381-00-00 РЭ. — ООО ЭТЗ «ГЭКСПАР». — 2022. — 34 с.
10. Pulyakov A. V. Universal control method of auxiliary electric motors / A. V. Pulyakov, M. P. Dunaev, G. O. Arsentyev // *Proceedings of the International Conference "Aviamechanical engineering and transport" (AVENT 2018)*. — Irkutsk: Atlantis Press. — 2018. — Pp. 109–113. — DOI: 10.2991/avent-18.2018.21.
11. Копанев М. В. Управление надежностью асинхронных двигателей путем введения контроля их параметров /

- М. В. Копанев, М. О. Арсентьев // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. — Иркутск: ИрНИТУ. — 2016. — С. 36–39.
12. Бондарчук А. П. Система управления приводом на основе бесколлекторного электродвигателя постоянного тока / А. П. Бондарчук // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А. А. Вавилова. — 2021. — Т. 1. — С. 30–33.
 13. Копанев М. В. Выявление причин отказов стрелочных электроприводов с использованием экспертной системы / М. В. Копанев, Л. Я. Кучера // Транссиб: на острие реформ. — 2016. — С. 230–234.
 14. Бурков А. Т. Электроника и преобразовательная техника / А. Т. Бурков. — М.: УМЦ по обр. на ЖДТ. — 2015. — 308 с.
 15. Кулинич Ю. М. Электронная преобразовательная техника / Ю. М. Кулинич. — М.: УМЦ по обр. на ЖДТ. — 2015. — 204 с.
 16. Бабакин В. И. Силовая преобразовательная техника в электроприводах / В. И. Бабакин, О. В. Кабаргина; ГОУ ВПО УГНТУ. — Уфа: УГНТУ. — 2010. — 52 с.
 17. Муфаздалов И. Р. Силовые электронные преобразователи и их элементы / И. Р. Муфаздалов // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакос-

мической отрасли. — Казань: КГТУ им. А. Н. Туполева, 2018. — С. 226–229.

18. Копанев М. В. Моделирование режимов работы двигателя ЭМСУ в среде MATLAB / М. В. Копанев, В. А. Алексеев, М. В. Кузин // Цифровые инфокоммуникационные технологии: сб. науч. тр. — Ростов-на-Дону: РГУПС. — 2021. — С. 157–161.
19. Беляев В. П. Моделирование асинхронного электропривода с ШИМ-управлением и упругими связями / В. П. Беляев // Энергия и менеджмент. — 2014. — № 1(76). — С. 30–33.
20. Федоров С. В. Разработка имитационной модели трехканального ШИМ-контроллера в Multisim / С. В. Федоров // Шаг в науку. — 2022. — № 2. — С. 16–22.
21. Юрченко О. Н. Математическая модель резонансного транзисторного инвертора напряжения с низкочастотной импульсной модуляцией / О. Н. Юрченко, В. Я. Гуцалюк, П. Ю. Герасименко, И. О. Слесаревский // Техническая электродинамика. — 2011. — № 1. — С. 24–30.
22. Колесникова Т. Multisim 14.0 — новые возможности и их практическое применение / Т. Колесникова // Компоненты и технологии. — 2016. — № 2(175). — С. 98–108.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 4, pp. 313–323
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-04-313-323

Improvement of the Control Block Scheme for a Compact Universal Point Motor

Information about authors

Menaker K. V., PhD in Engineering, Associate professor¹. E-mail: menkot@mail.ru
Pul'tyakov A. V., PhD in Engineering, Associate professor². E-mail: pultyakov@irgups.ru
Vostrikov M. V., Senior lecturer¹. E-mail: aspirin1979@mail.ru
Orlov A. V., PhD in Engineering, Associate professor³. E-mail: suti.orlov@gmail.com

¹Zabaikalsk Rail Transport Institute — branch of Irkutsk State Transport University, Department “Electricity Supply”, Chita

²Irkutsk State Transport University, Department “Automation, Telemechanics and Communications”, Irkutsk

³Russian University of Transport (MIIT), Department “Transport Infrastructure Management Systems”, Moscow

Abstract: The article is dedicated to the research and improvement of the design of a compact universal point motor (EMSU) and the fundamental control block scheme of the electric motor. The universal voltage and rotor rotation frequency motor EMSU has been developed as a replacement for commonly used direct current and alternating current motors, such as MSP, DPS, MST, and MSA types. The universality of EMSU leads to its widespread implementation in the railway networks of the Russian Federation. The lack of publicly available information on the construction features of the electric motor and the fundamental control block scheme has led to the necessity of conducting an independent analysis of its design. In the process of work, the EMSU has been disassembled, followed by an analysis of its mechanical and electrical components. Assembly and analysis of statistical information on its various types of failures have been performed, and suggestions for improving the design of the electric motor have been developed.

Keywords: electric motor; microprocessor control system; rectifier; stand-alone voltage inverter; electronic switch.

References

1. Abdeljawed H. B., Amraoui L. E. Simulation and rapid control prototyping of DC powered universal motors speed control: Towards an efficient operation in future DC homes. *Engineering Science and Technology*, 2022, pp. 2–7.
2. Syrigos S. P., Tatakis E. C. An alternative universal motor drive with unity power factor operating in DC and AC modes. XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM). Lausanne, 2016, pp. 962–968.
3. Stal'naya M. I., Eremochkin S. Yu. To the question of development of the universal model of a three-phase electric motor with the use of computer simulation tools. Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) — proceedings APEIE-2018: 14th international scientific-technical conference. Novosibirsk: NSTU Publ., 2018. Pp. 439–444. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545924.
4. Lee T.-W. et al. Control of c-dump converters fed switched reluctance motor on an automotive application. *Electric Power Systems Research*, 2007, vol. 77, Iss. 7, pp. 804–812.
5. Nakamura K., Kimura K., Ichinokura O. Electromagnetic and motion-coupled analysis for switched reluctance motor — based on reluctance network analysis. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2005, vol. 290–291, part 2, pp. 1309–1312.
6. Ganeev E. A., Graifer A. Yu. Universal'nyy strochnyy elektrodvigatel' [Universal switch motor]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2013, Iss. 1, pp. 16–17. (In Russian)
7. Kondratyuk T. V., Kopanев M. V., Monid O. I. O vnedrenii novykh elektrodvigateley dlya strochnykh gorochnykh privodov [On the introduction of new electric motors for switch hump drives]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia]. 2021, Iss. 1(11), pp. 277–282. (In Russian)
8. Yanin, A. O., Trofimchuk D. V., Epifanova E. P. Perspektiva zameny strochnykh elektrodvigateley na zheleznoy doroge [Prospects for replacing switch electric motors on the railway]. *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke* [Scientific, technical and economic cooperation of Asia-Pacific countries in the 21st century]. 2022, vol. 1, pp. 163–168. (In Russian)
9. *Elektrodvigatel' malogabaritnyy strochnyy universal'nyy EMSU-SP i ego modifikatsii. Rukovodstvo po ekspluatatsii 22381-00-00 RE* [Small-sized universal pointer electric motor EMSU-SP and its modifications. Operating manual 22381-00-00 RE]. 000 ETZ “GEKSAR” Publ., 2022, 34 p. (In Russian)

10. Pulyakov A. V., Dunaev M. P., Arsenyev G. O. Universal control method of auxiliary electric motors. Proceedings of the International Conference "Aviamechanical engineering and transport" (AVENT 2018). Irkutsk: Atlantis Press Publ., 2018, pp. 109–113. DOI: 10.2991/avent-18.2018.21.
11. Kopanov M. V., Arsen'ev M. O. Upravlenie nadezhnost'yu asinkhronnykh dvigateley putem vvedeniya kontrolya ikh parametrov [Managing the reliability of asynchronous motors by introducing control of their parameters]. *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri* [Improving the efficiency of production and use of energy in Siberia]. Irkutsk: IrNITU Publ., 2016, pp. 36–39. (In Russian)
12. Bondarchuk A. P. Sistema upravleniya privodom na osnove beskollektornogo elektrodvigatelya postoyannogo toka [Drive control system based on a brushless DC electric motor]. *Molodezhnaya shkola-seminar po problemam upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh imeni A. A. Vavilova* [Youth school-seminar on control problems in technical systems named after A. A. Vavilov]. 2021, vol. 1, pp. 30–33. (In Russian)
13. Kopanov M. V., Kuchera L. Ya. Vyyavlenie prichin otkazov strelochnykh elektroprivodov s ispol'zovaniem ekspertnoy sistemy [Identification of the causes of failures of switch electric drives using an expert system]. *Transsib: na ostriye reform* [Transsib: at the forefront of reform]. 2016, pp. 230–234. (In Russian)
14. Burkov A. T. *Elektronika i preobrazovatel'naya tekhnika* [Electronics and converter technology]. Moscow: UMTs po obr. na ZhDT Publ., 2015, 308 p. (In Russian)
15. Kulinich Yu. M. *Elektronnaya preobrazovatel'naya tekhnika* [Electronic converter technology]. Moscow: UMTs po obr. na ZhDT Publ., 2015, 204 p. (In Russian)
16. Babakin V. I., Kabargina O. V. *Silovaya preobrazovatel'naya tekhnika v elektroprivodakh* [Power converter technology in electric drives]. Ufa: UGNTU Publ., 2010, 52 p. (In Russian)
17. Mufazdalov I. R. Silovye elektronnye preobrazovateli i ikh elementy [Power electronic converters and their elements]. *Novye tekhnologii, materialy i oborudovanie rossiyskoy aviakosmicheskoy otrasli* [New technologies, materials and equipment of the Russian aerospace industry]. Kazan': KGTU im. A. N. Tupoleva Publ., 2018, pp. 226–229. (In Russian)
18. Kopanov M. V., Alekseenko V. A., Kuzin M. V. *Modelirovanie rezhimov raboty dvigatelya EMSU v srede MATLAB. Tsifrovyye infokommunikatsionnye tekhnologii: sb. nauch. tr.* [Modeling the operating modes of the EMSU engine in the MATLAB environment. Digital infocommunication technologies: collection of scientific tr.]. Rostov-on-Don: RGUPS Publ., 2021, pp. 157–161. (In Russian)
19. Belyaev V. P. Modelirovanie asinkhronnogo elektroprivoda s ShIM-upravleniem i uprugimi svyaziyami [Modeling of an asynchronous electric drive with PWM control and elastic connections]. *Energiya i menedzhment* [Energy and management]. 2014, pp. 1(76), pp. 30–33. (In Russian)
20. Fedorov S. V. Razrabotka imitatsionnoy modeli trekhkanal'nogo ShIM-kontrollera v Multisim [Development of a simulation model of a three-channel PWM controller in Multisim]. *Shag v nauku* [Step into science]. 2022, Iss. 2, pp. 16–22. (In Russian)
21. Yurchenko O. N., Gutsalyuk V. Ya., Gerasimenko P. Yu. et al. Matematicheskaya model' rezonansnogo tranzistornogo invertora napryazheniya s nizkochastotnoy impul'snoy modulyatsiyey [Mathematical model of a resonant transistor voltage inverter with low-frequency pulse modulation]. *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical electrodynamics]. 2011, Iss. 1, pp. 24–30. (In Russian)
22. Kolesnikova T. Multisim 14.0 — novye vozmozhnosti i ikh prakticheskoe primeneniye [Multisim 14.0 — new opportunities and their practical application]. *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies]. 2016, Iss. 2(175), pp. 98–108. (In Russian)

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОПУСКА ПО ПЕРЕГОНАМ И СТАНЦИЯМ — ОСНОВА ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ НА МОСКОВСКИХ ЦЕНТРАЛЬНЫХ ДИАМЕТРАХ

РОЗЕНБЕРГ Ефим Наумович, д-р техн. наук, профессор, первый заместитель генерального директора; e-mail: info@vniias.ru

МАРКОВ Алексей Валерьевич, начальник НТК систем управления и обеспечения безопасности движения поездов; e-mail: a.markov@vniias.ru

ОЗЕРОВ Алексей Валерьевич, начальник Международного управления; e-mail: a.ozеров@vniias.ru

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

В статье рассмотрено развитие систем автоблокировки, являющихся основой системы интервального регулирования движения поездов, указаны ключевые факторы, лимитирующие пропускную способность на перегоне, и пути их решения. Дан краткий обзор опыта организации интервального регулирования с использованием автоблокировки на базе рельсовых цепей в других странах. Представлены возможности и роль микропроцессорной системы автоблокировки с централизованным размещением аппаратуры, тональными рельсовыми цепями и дублирующими каналами передачи информации в качестве важнейшего элемента организации движения поездов на участках Московских центральных диаметров. Показано значение реализованного принципа безостановочного пропуска поездов по главным путям станций, обеспечивающего значительное увеличение пропускной способности участка. Описано построение цифровой системы пропуска поездов, позволяющей реализовать в пределах станции технологию «подвижных» блок-участков, которая обеспечивает движение попутно следующих поездов по перегонам и станциям с одинаковым межпоездным интервалом. Указаны преимущества микропроцессорной системы автоблокировки нового типа как базового элемента перспективной российской системы управления движением поездов и положительные эффекты от ее внедрения на сети железных дорог России. Указано направление развития технических средств интервального регулирования в сторону дальнейшей цифровизации.

Ключевые слова: интервальное регулирование; микропроцессорная автоблокировка; система АБТЦ-МШ; подвижный блок-участок; электрическая централизация; автоматическая локомотивная сигнализация; система управления движением поездов.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-04-324-332

▼ Введение

Интенсивное развитие микропроцессорной техники, волоконно-оптических технологий и цифровых методов передачи информации создало условия для появления современных высокотехнологичных систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ), на основе которых реализуются принципы интервального регулирования движения поездов (ИРДП). ИРДП — это технология, обеспечивающая возможность пропуска потока поездов с минимальным интервалом между поездами как в правильном, так и в неправильном направлениях. В качестве технических средств ИРДП традиционно выступают системы автоматической блокировки,

в частных случаях — системы полуавтоматической блокировки. Наиболее широко на сети железных дорог распространены системы числовой кодовой автоблокировки, которые в основном рассчитаны на движение по сигналам светофорной сигнализации в правильном направлении с интервалом 8–10 минут [1, 2].

Более полувека при проектировании систем автоблокировки традиционно использовался критерий максимальной протяженности блок-участка. Исходя из наибольшей длины обрабатываемых на линии подвижных составов и наихудших тормозных характеристик, длина блок-участка может достигать 2,6 км и является фактически ограничивающим фактором при сближении поездов [3].

Данный подход нуждается в пересмотре, поскольку при существующем увеличении интенсивности движения поездов, особенно в пригородных зонах, ключевым фактором становится возможность организации практически равноценного движения как в правильном, так и в неправильном направлениях по сигналам локомотивной сигнализации.

В этой связи при проектировании централизованной системы автоблокировки нового типа на основе тональных рельсовых цепей (АБТЦ) стали исходить из длины блок-участка около 1 км, а в зонах пригородного сообщения — менее 500 м. Это позволяет обеспечить возможность движения поездов с меньшими интервалами, а также при наличии многозначной локомотивной сигнализации АЛС-ЕН организовать режим движения по данным локомотивной сигнализации как самостоятельного средства сигнализации и связи (АЛСО) с подвижными блок-участками (ПБУ) [4].

Результаты проводимой в АО «НИИАС» многолетней комплексной работы в области оценки различных технических средств ЖАТ на основе имитационного моделирования движения поездов по различным участкам железных дорог с учетом лимитирующих факторов показывают, что внедрение режима АЛСО с ПБУ на основе микропроцессорной системы автоблокировки с централизованным размещением аппаратуры, тональными рельсовыми цепями и дублирующими каналами передачи информации (АБТЦ-МШ) обеспечивает увеличение скоростей движения и существенное повышение пропускной способности по сравнению с традиционными системами автоблокировки [5, 6].

1. Обзор мирового опыта

Мировой опыт показывает, что, несмотря на широкое распространение систем ИРДП на базе радиоканала, на железнодорожном транспорте отсутствует эффективная альтернатива конвенциональным методам контроля свободности пути и целостности поездов. В большинстве стран с развитым железнодорожным сообщением в этих целях по-прежнему применяются рельсовые цепи, в особенности на основных линиях и высокоскоростных магистралях.

К числу таких стран относятся Бельгия, Франция, Италия, Нидерланды, Китай, Южная Корея, Япония и др. [7–9].

К примеру, на ВСМ Бельгии и Франции применяется система автоблокировки на основе рельсовых цепей TVM 300/430, в Италии — ВАСС, в Нидерландах — АТВ, в Китае — СТС-2, СТС-3, в Южной Корее — КТКС, в Японии — АТС, DS-АТС. В данных системах автоблокировки используется увеличенная рельсовая цепь, длина которой варьируется от 1350 до 2000 м в зависимости от технического решения (таблица) [10, 11].

Кроме того, в целях повышения пропускной способности в странах Западной Европы активно тестируются решения по интеграции информации от устройств рельсовых цепей в систему ETCS/ERTMS¹ уровень 2 для организации виртуальных блок-участков. В этом случае центр радиоблокировки RBC (Radio Block Center) использует информацию от электрической централизации и/или автоблокировки о последовательном занятии/освобождении рельсовой цепи блок-участка поездом, оснащенным бортовым оборудованием ETCS, для расчета доверительного интервала координаты хвостового вагона. В случае потери связи с RBC такие поезда продолжают двигаться в соответствии с полученными ранее разрешениями на проследование до восстановления связи. При этом поезда, не оснащенные бортовым оборудованием ETCS, следуют в обычном режиме по кодам национальной автоматической локомотивной сигнализации. Такое решение принято называть «гибридной системой ETCS/ERTMS уровень 3» [12, 13].

2. Интервальное регулирование движения поездов на Московском центральном кольце и Московских центральных диаметрах

Цифровая система АБТЦ-МШ предназначена для интервального регулирования движения на перегонах с обращением грузовых, пассажирских и высокоскоростных поездов

¹ ETCS/ERTMS — Европейская система управления движением поездов (ETCS) разработана для замены многих несовместимых систем, используемых европейскими железными дорогами и железными дорогами за пределами Европы. ETCS является компонентом сигнализации и управления в составе Европейской системы управления железнодорожным движением (ERTMS).

Сравнение систем автоблокировки

Показатель	TVM 300; TVM 430 (Франция)	ВАСС (Италия)	АТС (Япония)	АБТЦ-М(Ш) (Россия)
Род тягового тока и параметры тяговой сети	1,5–3 кВ постоянного тока; 25 кВ, 50 Гц, 15 кВ, 16,7 Гц	3 кВ постоянного тока; 25 кВ, 50 Гц	25 кВ, 60 Гц	3 кВ постоянного тока; 25 кВ, 50 Гц
Длина блок-участка, м	~2000	1350	~3000	от 780 до 1700 или подвижный блок-участок
Средства обнаружения поезда на блок-участке	Одна рельсовая цепь на блок-участок с конденсаторами через каждые 100 м	Одна рельсовая цепь на блок-участок	Две рельсовые цепи на блок-участок	Три-четыре рельсовые цепи на блок-участок
Частоты, используемые рельсовыми цепями для обнаружения поезда	1700 и 2300 Гц для одного пути; 2000 и 2600 Гц для второго пути	50 и 178 Гц	720 и 900 Гц для одного пути; 840 и 1020 Гц для второго пути	475, 525, 575, 625, 675, 725, 775, 825, 875, 925 Гц с кодовыми признаками от K1 до K12
Необходимость в изолирующих стыках	Не требуются	Требуются	Не требуются	Не требуются
Средства передачи данных между сигнальными точками	Кабель	Рельсовая цепь	Кабель	Кабель
Централизация систем блокировки	Да	Нет	Да	Да
Возможность у диспетчера экстренно остановить поезд	Нет	Нет	Да	Да

и может применяться на участках различной интенсивности движения, в том числе на высоконагруженных участках в пригородных зонах. Поэтому система была принята в качестве ключевого элемента при реконструкции участков Московских центральных диаметров.

Система позволяет организовать бесцветное движение поездов с динамическим интервалом попутного следования (ПБУ) при использовании тональных рельсовых цепей.

На перегонах, оборудованных АБТЦ-МШ с АЛСО и ПБУ, отсутствуют проходные светофоры автоблокировки и знаки «Граница блок-участка». Движение поездов осуществляется по кодам АЛСН и АЛС-ЕН, сигнальное значение которых, в зависимости от поездной ситуации, определяется графиком сигнализации.

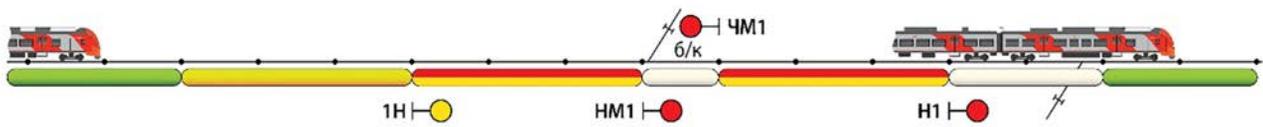
В АБТЦ-МШ используется бесстыковая рельсовая цепь с увеличенным объемом передаваемой информации автоматической локомотивной сигнализации (передаются сигналы как АЛСН, так и АЛС-ЕН, а в перспективе будет реализована передача сигналов двухчастотной АЛС-ЕН). За счет централизованного расположения аппаратных технических средств и применения современных устройств защиты от импульсных перенапряжений обеспечена

надежная система молниезащиты, при этом значительно сокращено количество технологических операций по обслуживанию системы за счет встроенной самодиагностики, внутреннего резервирования и возможности реконфигурации при отказах отдельных элементов системы. Система имеет надежный алгоритм формирования модели поездной ситуации по сигналам от рельсовых цепей и/или по информации о координатах поездов, передаваемой по радиоканалу. Еще одним достоинством АБТЦ-МШ является высокая живучесть и защищенность от кибератак.

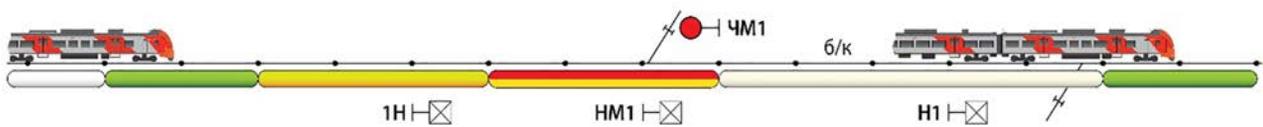
Как показывает практика, внедрение современной системы интервального регулирования движения поездов — АБТЦ-МШ с АЛСО и ПБУ — позволяет сократить межпоездные интервалы до 4 минут.

Технические решения АБТЦ-МШ с АЛСО и ПБУ были ранее применены на Московском центральном кольце, Восточном полигоне, обходе Украины, БАМе и позволяют осуществлять движение в правильном и неправильном направлениях с минимальными интервалами попутного следования поездов на участках интенсивного движения. К настоящему времени накоплен большой опыт внедрения и

■ Межпоездной интервал при задании маршрутов в режиме оператора



■ Межпоездной интервал при автоматическом режиме пропуска по станции



■ Межпоездной интервал при автоматическом режиме пропуска по станции при кодировании сигналами многозначной АЛС

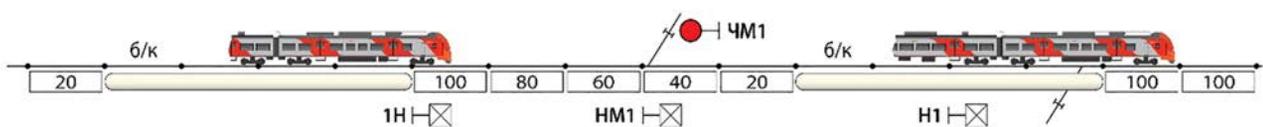


Рис. 1. Сравнение возможностей сближения попутно следующих поездов при разных вариантах сигнализации

эксплуатации АБТЦ-МШ, которой оснащено уже более 2,5 тыс. км сети железных дорог России, что служит дополнительным аргументом в пользу ее применения на всех участках Московских центральных диаметров.

Следует отметить, что благодаря внедрению системы АБТЦ-МШ обеспечивается возможность реализации безостановочного пропуска поездов по главным путям станций участка по сигналам автоматической локомотивной сигнализации, при задании маршрутов в ручном режиме либо в режиме автоматического управления с переводом напольных светофоров в недействующее состояние (по аналогии с техническими решениями, применяемыми на Московском центральном кольце). Это обеспечивает увеличение пропускной способности участка на 10–15 %, а при кодировании сигналами многозначной автоматической локомотивной сигнализации (АЛС-ЕН) — на 20–25 % (рис. 1).

Кроме того, за счет технологии автоматического пропуска поездов по главным путям станций участка по сигналам автоматической локомотивной сигнализации, отработанной на Московском центральном кольце, в отдельных случаях появляется возможность компенсировать неисправности электрической централизации средствами цифровой автоблокировки.

В этом случае движение поездов на станции осуществляется по показаниям локомотивного светофора (блока индикации КЛУБ-У/БЛОК), а на путевых светофорах (входных, маршрутных, выходных) сигнальные показания выключаются. Станционный путь (участок пути), переведенный при отказе электрической централизации в режим автоматического управления от устройств АБТЦ-МШ, образует единый участок совместно с прилегающими перегонами, и движение поездов на нем осуществляется в режиме АЛСО [14].

Функциональные возможности АБТЦ-МШ позволяют осуществлять увязку не только с микропроцессорной, но и с релейной централизацией всех типов. В случае необходимости режим автоматического пропуска поездов по станции может быть реализован с применением путевых устройств кодирования АЛС-ЕН при временной увязке с действующей аппаратурой рельсовых цепей до замены электрической централизации на микропроцессорную. Разумеется, в дальнейшем целесообразна модернизация существующей электрической централизации с переводом ее на цифру и обеспечением интеллектуального взаимодействия с цифровой системой АБТЦ-МШ, чтобы обеспечить максимальный эффект от внедрения технологии интервального регулирования

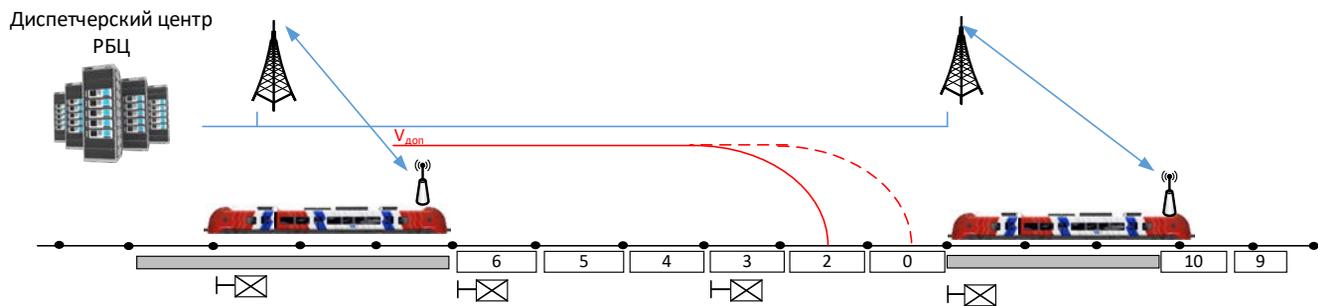


Рис. 2. Схема ИРДП в рамках РСУДП

движения поездов. При этом итоговое решение позволяет сделать реконструируемую станцию элементом сквозной цифровой технологии пропуска поездов по перегонам и станциям благодаря реализации в пределах станции технологии «подвижных» или «плавающих» блок-участков за хвостом движущегося поезда, которая обеспечивает движение попутно следующих поездов с перегона на станцию и далее на следующий перегон с одинаковым межпоездным интервалом.

Только такое комплексное развитие систем ЖАТ на перегонах и станциях на основе идеологии сквозной цифровой технологии интервального регулирования способно обеспечить текущие и перспективные требования к пропуску пассажирских и грузовых поездов на участках с растущей интенсивностью движения и одновременно удовлетворяет запрос отрасли на применение современных цифровых систем ЖАТ как важнейшего элемента цифровой трансформации всей парадигмы управления перевозочным процессом на сети железных дорог России. По этой причине АБТЦ-МШ является базовым компонентом перспективной российской системы управления движением поездов (РСУДП), в настоящее время разрабатываемой по заказу ОАО «РЖД» для линий высокоскоростного движения [15].

Структурно РСУДП является гибридной и, как и в гибридной системе ETCS/ERTMS уровня 3, предполагает управление по радиоканалу с опорой на информацию, получаемую от рельсовых цепей (рис. 2).

Внедряемая на Московских центральных диаметрах цифровая технология пропуска поездов на основе системы АБТЦ-МШ отвечает всем современным требованиям,

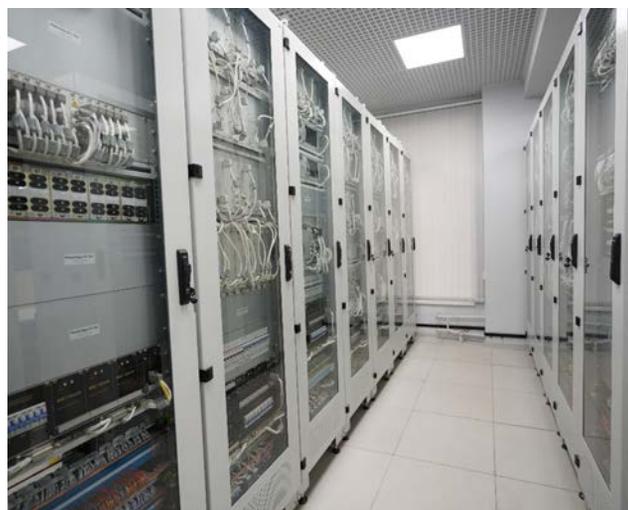


Рис. 3. Аппаратура АБТЦ-МШ, размещаемая в шкафах на станции



Рис. 4. Мониторы автоматизированного рабочего места сервисного терминала и электромеханика

предъявляемым к ответственным программно-аппаратным комплексам такого рода (рис. 3, 4). АБТЦ-МШ выполнена на российской элементной базе, использует в своем составе инновационные решения, оформленные в виде более десяти патентов ОАО «РЖД». Разработка программных продуктов и технических средств системы проведена в соответствии с действующими нормативными документами в области

функциональной и информационной безопасности. Система получила все необходимые сертификаты и заключения по безопасности, что является немаловажным фактором при выборе системы для организации движения поездов на таких интенсивных участках, как Московские центральные диаметры.

Внедрение АБТЦ-МШ на сети железных дорог России дополнительно несет с собой ряд положительных эффектов:

- уменьшение количества напольного оборудования (светофоров и кабеля) при строительстве по сравнению с типовой автоблокировкой и сокращение капитальных затрат на оборудование перегонов;
- снижение эксплуатационных затрат благодаря модульному построению системы и централизованной структуре;
- уменьшение сроков проведения проектных и монтажных работ;
- сокращение производственной площади в релейном помещении поста централизации или в контейнерном модуле электрической централизации;
- повышение надежности за счет применения микропроцессорной элементной базы и резервирования аппаратуры;
- повышение помехоустойчивости передачи информации за счет применения двойной относительной фазовой манипуляции сигналов и помехоустойчивых кодов.

3. Структура системы АБТЦ-МШ

С технологической точки зрения АБТЦ-МШ является структурно крупной и логически сложной динамически развивающейся системой, состоящей из большого набора функциональных модулей (рис. 5). При внедрении системы на объектах инфраструктуры требуется проведение целого комплекса мероприятий по ее адаптации. Благодаря использованию сертифицированной кроссплатформенной графической среды разработки удастся максимально автоматизировать этот процесс и в оперативном режиме выполнять такие проектные процедуры, как интеграция новых функциональных возможностей, конфигурирование системы, адаптация логики работы под конкретные объекты и т.д.

Специализированная графическая среда осуществляет генерацию исходного кода, подлежащего исполнению на ряде аппаратных платформ и операционных систем, в автоматическом режиме. Полученный с помощью данной среды исходный код удовлетворяет требованиям безопасности как российских (ГОСТ 61508-3—2012), так и международных стандартов (EN 50128), фактически является сертифицированным на уровне полноты обеспечения безопасности SIL 3/4. Среда разработки позволяет также выполнять симуляцию и отладку разработанного программного обеспечения для системы с верификацией программного обеспечения, что предоставляет широкий спектр возможностей для поиска и устранения ошибок при полном покрытии исходного кода. Благодаря встроенным средствам генерирования отчетных документов графическая среда разработки позволяет также формировать необходимую отчетную документацию по разработанному программному обеспечению.

Таким образом, за счет автоматизации ряда трудоемких процессов, таких как генерация исходного кода, исполнение текстовых сценариев, генерация отчетов о тестировании, анализ полноты покрытия требований, удастся значительно повысить скорость разработки и адаптации программного обеспечения системы АБТЦ-МШ, а также сократить количество ошибок, вносимых человеком.

Заключение

В статье рассмотрено развитие систем автоблокировки, являющихся основой систем ИРДП, и переход к новому типу организации бессветофорного движения поездов с ПБУ на базе системы АБТЦ-МШ. Данное технологическое решение является итогом эволюции микропроцессорных систем ЖАТ в условиях повышения интенсивности движения на железных дорогах ОАО «РЖД», особенно в пригородных зонах таких мегаполисов, как Москва.

Логика развития таких систем и опыт их применения на участках Московского центрального кольца и Московских центральных диаметров свидетельствуют о том, что в перспективе будет обеспечена возможность

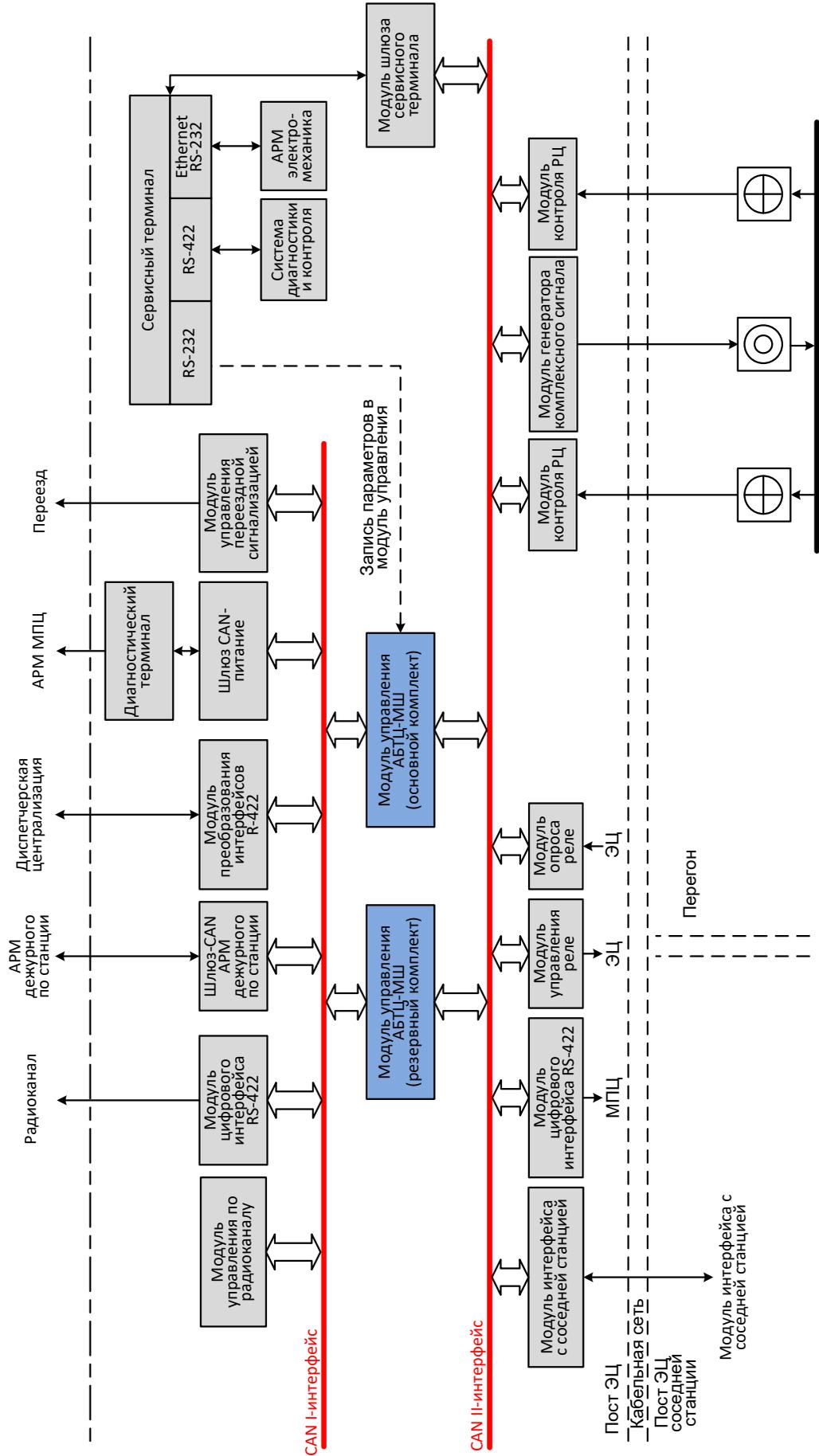


Рис. 5. Структурная схема системы АБТЦ-МШ:

АРМ — автоматизированное рабочее место; ЭЦ — электрическая централизация; МПЦ — микропроцессорная централизация; РЦ — рельсовая цепь

перехода на единую цифровую платформу централизованного управления движением поездов на перегонах и станциях с использованием безопасной облачной платформы. Такая работа уже ведется в рамках создания перспективной РСУДП, в которой интегрируются программная и аппаратная части микропроцессорных систем централизации стрелок и сигналов, автоблокировки и центра радиоблокировки. Дополнительным стимулирующим фактором ускорения работ в этом направлении может стать требование обеспечения импортонезависимости и использования отечественных программных продуктов с подтверждением их соответствия требованиям Федеральной службы по техническому и экспортному контролю. ▲

Библиографический список

1. Розенберг Е. Н. Комплексный подход к решению задачи повышения пропускной способности / Е. Н. Розенберг, А. В. Озеров, И. А. Панферов // Автоматика, связь, информатика. — 2022. — № 8. — С. 2–6. — DOI: 10.34649/AT.2022.8.8.001.
2. Воронин В. А. Комплексная технология интервального регулирования движения поездов / В. А. Воронин, И. Р. Гургенидзе, М. А. Дежков и др. — М.: АО «Т8 Издательские технологии», 2023. — 216 с.
3. Баранов А. Г. Современные решения по повышению пропускной способности участков железных дорог с инфраструктурными ограничениями / А. Г. Баранов, А. В. Озеров // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта: межвузовский сборник научных трудов. — М.: Российский университет транспорта, 2022. — С. 72–76.
4. Воронин В. А. Обеспечение минимального интервала попутного отправления поездов на перегон АЛСО и подвижными блок-участками / В. А. Воронин, В. С. Лобанова // Автоматика, связь, информатика. — 2021. — № 11. — С. 25–27.
5. Гургенидзе И. Р. Комплекс имитационного моделирования работы железнодорожных станций и участков / И. Р. Гургенидзе, С. В. Калинин, Д. Ю. Халевин и др. // Железнодорожный транспорт. — 2021. — № 12. — С. 38–42.
6. Бочков А. В. Об актуальных задачах и направлениях научно-технологического развития АО «НИИАС». Январь — май 2023 г. / А. В. Бочков // Наука и технологии железных дорог. — 2023. — Т. 7. — № 2(26). — С. 3–16.
7. Никитин А. Б. Управление движением поездов на высокоскоростных магистралях: общесистемные требования / А. Б. Никитин // Транспорт Российской Федерации. — 2017. — № 1. — С. 12–16.
8. Розенберг Е. Н. Современные системы управления движением поездов: отечественный и зарубежный опыт / Е. Н. Розенберг, Е. Е. Шухина, А. В. Озеров и т.д. — М.: ООО «Издательские решения», 2020. — 210 с.
9. Theeg G. Railway Signalling and Interlocking / G. Theeg, S. Vlasenko (Eds.). — 3rd Edition. — GmbH: PMC Media House, 2020. — 553 p.
10. Розенберг Е. Н. Построение систем управления и обеспечения безопасности движения поездов на ВСМ / Е. Н. Розенберг, А. В. Озеров // Железнодорожный транспорт. — 2018. — № 3. — С. 34–41.
11. Озеров А. В. Система управления и обеспечения безопасности движения высокоскоростных поездов / А. В. Озеров, А. П. Куроптева // Интеллектуальные транспортные системы: материалы II Международной научно-практической конференции, Москва, 25 мая 2023 года. — Москва: Российский университет транспорта, 2023. — С. 614–619. — DOI: 10.30932/9785002182794-2023-614-619.
12. Озеров А. В. Мировые тренды развития систем управления движением поездов / А. В. Озеров // Наука и технологии железных дорог. — 2022. — Т. 6. — № 4(24). — С. 10–14.
13. Озеров А. В. Зарубежные системы интервального регулирования движения поездов / А. В. Озеров, В. М. Малинов // Автоматика, связь, информатика. — 2022. — № 3. — С. 31–34. — DOI: 10.34649/AT.2022.3.3.005.
14. Шухина Е. Е. Этапы реализации гибридной технологии интервального регулирования движения поездов / Е. Е. Шухина, И. А. Панферов, А. И. Кузьмин // Железнодорожный транспорт. — 2022. — № 10. — С. 28–30.
15. Долгий А. И. Автономное движение — отечественный и зарубежный опыт / А. И. Долгий, Е. Н. Розенберг, А. В. Озеров и др. // Автоматика, связь, информатика. — 2022. — № 12. — С. 14–16. — DOI: 10.34649/AT.2022.12.12.002.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 4, pp. 324–332
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-04-324-332

Digital Technologies for Train Passage through Sections and Stations — the Basis for Organizing Traffic on Moscow Central Diameters

Information about authors

Rozenberg E. N., Doctor in Engineering, Professor, First Deputy Director General.

E-mail: info@vniias.ru

Markov A. V., Head of Scientific and Technical Complex of Control Systems and Ensuring the Safety of Train Traffic. E-mail: a.markov@vniias.ru

Ozerov A. V., Head of International Department. E-mail: a.ozerov@vniias.ru

Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport (JSC NIIS), Moscow

Abstract: The article discusses the development of automatic block systems, which form the basis of separation systems. It also highlights the key factors limiting the capacity on open lines, and ways to solve them. A brief overview of the foreign experience of the organization of train separation using automatic block system based on track circuits is given. The article shows the capabilities and role of the computer-based automatic block signalling system with a centralized placement of equipment, audio frequency track circuits and duplicating information transmission channels as an important element of the train traffic management at the sections of Moscow Central Diameters. The significance of the implemented non-stop passage of trains along the

main station tracks providing substantial section capacity increase is demonstrated. The necessity of building a digital system for train spacing is shown, which makes it possible to implement the moving block technology with-in the station ensuring the movement of trains on open lines and at stations with the same headway. The advantages of a new type of the computer-based automatic block signalling system as a basic element of a promising Russian train traffic control system and the positive effects of its implementation on the Russian railway network are indicated. The direction of development of train separation systems is outlined within the framework of further digitalization.

Keywords: train separation; automatic block system; ABTC-MSh system; moving block; interlocking; automatic cab signalling; train control system.

References

1. Rozenberg E. N. Kompleksnyj podhod k resheniyu zadachi povysheniya propusknnoj sposobnosti [Integrated approach to increase railway capacity]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2022, Iss. 8, pp. 2–6. (In Russian)
2. Voronin V. A., Gurgenidze I. P., Dezhkov M. A. *Kompleksnaya tekhnologiya interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov* [Integrated train separation technology]. Moscow: AO "T8 Izdatel'skie Tekhnologii" Publ., 2023, 216 p. (In Russian)
3. Baranov A. G., Ozerov A. V. Sovremennye resheniya po povysheniyu propusknnoj sposobnosti uchastkov zheleznih dorog s infrastrukturnymi ogranicheniyami [Modern solutions to increase the capacity of railways with infrastructure restrictions]. *Sovremennye problemy sovershenstvovaniya raboty zheleznodorozhnogo transporta: mezhdunarodnyy sbornik nauchnyh trudov* [Modern problems of improving railway transport: Interuniversity collection of scientific works]. Moscow: Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Rossijskij universitet transporta" Publ., 2022, pp. 72–76. (In Russian)
4. Voronin V. A., Lobanova V. S. Obespechenie minimal'nogo intervala poputnogo otpravleniya poezdov na peregon ALSO i podvizhnymi blok-uchastkami [Ensuring a minimum interval for passing trains to the ALSO section and moving block sections]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communications, informatics]. 2021, Iss. 11, pp. 25–27. (In Russian)
5. Gurgenidze I. R., Kalinin S. V., Halevin D. Yu. et al. Kompleks imitacionnogo modelirovaniya raboty zheleznodorozhnyh stancij i uchastkov [Complex of simulation modeling of the operation of railway stations and sections]. *Zheleznodorozhnyj transport* [Railway Transport]. 2021, Iss. 12, pp. 38–42. (In Russian)
6. Bochkov A. V. Ob aktual'nyh zadachah i napravleniyah nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya AO "NIAS". Yanvar' — maj 2023 [On current tasks and directions of scientific and technological development of JSC "NIAS". January — May 2023]. *Nauka i tekhnologii zheleznih dorog* [Railway Science and Technology]. 2023, vol. 7, Iss. 2(26), pp. 3–16. (In Russian)
7. Nikitin A. B. Upravlenie dvizheniem poezdov na vysokoskorostnyh magistralyah: obshchestvennye trebovaniya [Train control on high-speed lines: system-wide requirements]. *Transport Rossijskoj Federacii* [Transport of the Russian Federation]. 2017, Iss. 1, pp. 12–16. (In Russian)
8. Rozenberg E. N., Shukhina E. E., Ozerov A. V. et al. *Sovremennye sistemy upravleniya dvizheniem poezdov: Otechestvennyj i zarubezhnyj opyt* [Modern train traffic control systems: Domestic and foreign experience]. Moscow: OOO "Izdatel'skie resheniya" Publ., 2020, 210 p. (In Russian)
9. Theeg G., Vlasenko S. (Eds.) *Railway Signalling and Interlocking*. 3rd Edition. GmbH: PMC Media House, 2020, 553 p.
10. Rozenberg E. N., Ozerov A. V. Postroenie sistem upravleniya i obespecheniya bezopasnosti dvizheniya poezdov na VSM [Design of train control systems and ensuring the safety of trains on the high-speed line]. *Zheleznodorozhnyj transport* [Railway Transport]. 2018, Iss. 3, pp. 34–41. (In Russian)
11. Ozerov A. V., Kuropteva A. P. *Sistema upravleniya i obespecheniya bezopasnosti dvizheniya vysokoskorostnyh poezdov. Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy II Mezhunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Moskva, 25 Maya 2023 goda* [Train control and safety system for high-speed trains. Intelligent transport systems: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference, Moscow, May 25, 2023]. Moscow: Rossijskij universitet transporta Publ., 2023, pp. 614–619. DOI: 10.30932/9785002182794-2023-614-619. (In Russian)
12. Ozerov A. V. Mirovye trendy razvitiya sistem upravleniya dvizheniem poezdov [Global trends in the development of train control systems]. *Nauka i tekhnologii zheleznih dorog* [Railway Science and Technology]. 2022, vol. 6, Iss. 4(24), pp. 10–14. (In Russian)
13. Ozerov A. V., Malinov V. M. Zarubezhnye sistemy interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov [Foreign train separation systems]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communications, informatics]. 2022, Iss. 3, pp. 31–34. DOI: 10.34649/AT.2022.3.3.005. (In Russian)
14. Shukhina E. E., Panferov I. A., Kuz'min A. I. Etapy realizacii gibridnoj tekhnologii interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poezdov [Stages of Implementation of the Hybrid Technology of Interval Train Traffic Control]. *Zheleznodorozhnyj transport* [Railway transport]. 2022, Iss. 10, pp. 28–30. (In Russian)
15. Dolgy A. I., Rozenberg E. N., Ozerov A. V. Avtonomnoe dvizhenie — otechestvennyj i zarubezhnyj opyt [Autonomous operation — domestic and foreign experience]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2022, Iss. 12, pp. 14–16. DOI: 10.34649/AT.2022.12.12.002. (In Russian)

УДК 656.257+004.89

ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА НА УЧАСТКЕ С ИНТЕГРИРОВАННОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ АРХИТЕКТУРОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОЛИГОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

НИКИТИН Александр Борисович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой¹;
e-mail: nikitin@crtc.spb.ru

ЖУРАВЛЕВА Наталья Александровна, д-р экон. наук, профессор, заведующий кафедрой²;
e-mail: zhuravleva_na@mail.ru

КОРНИЕНКО Анатолий Адамович, д-р техн. наук, профессор, профессор³; e-mail: kaa.pgups@yandex.ru

КУШПИЛЬ Игорь Васильевич, канд. техн. наук, доцент¹; e-mail: i_kushpil@mail.ru

КОПЫТОВ Дмитрий Викторович, аспирант¹; e-mail: dmitry9786@gmail.com

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Кафедра «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте», Санкт-Петербург

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Кафедра «Экономика транспорта», Санкт-Петербург

³ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Кафедра «Информатика и информационная безопасность», Санкт-Петербург

Внедрение систем железнодорожной автоматики и телемеханики на микропроцессорной элементной базе связано со значительными капитальными вложениями по сравнению с их релейными аналогами. В связи с чем целесообразным является использование интегрированной системы комплексной распределенной архитектуры для автоматизации управления движением поездов на расширенной зоне с опорных станций, что, в свою очередь, требует разработки технологии организации перевозочного процесса. В статье рассмотрена технология централизации управления на опорных станциях, а также обоснован перечень ответственных команд, реализуемых в безопасном управляющем вычислительном комплексе с учетом исключения части проверок взаимозависимостей при распределенном варианте размещения аппаратуры объектных контроллеров и нарушения функционирования систем и устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. Рассмотрена эффективность предлагаемой технологической схемы расширенной зоны управления полигона.

Ключевые слова: системы железнодорожной автоматики и телемеханики; микропроцессорная централизация; автоматизированное рабочее место; опорная станция; управляющий вычислительный комплекс; объектный контроллер; устройство сопряжения; дежурный опорной станции; поездной диспетчер; ответственная команда; полигонные технологии управления.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-04-333-341

▼ Введение

Инновационные подходы в работе железнодорожного транспорта определяют изменения в технологии перевозочного процесса. В начале нового века по ряду направлений хозяйственной деятельности железнодорожного транспорта на Октябрьской железной дороге стали применяться полигонные технологии. Полигоном управления перевозочным процессом называют объединение участков сети, обладающих единой технологией тягового подвижного состава, в границах зарождения и окончания производственных циклов [1]. Выделение на сети технологически обоснованных полигонов послужило началом создания новой структуры управления

локомотивным парком — центров управления тяговыми ресурсами. Высокая эффективность полигонных технологий в центрах управления тяговыми ресурсами была достигнута при объединении локомотивных диспетчеров четырех дорог Восточного полигона. Переход на полигонные технологии по дирекции управления движением обусловлен изменением структуры грузопотоков — увеличился объем перевозок в междорожном сообщении, снизился внутридорожный объем [2]. С учетом изложенного одной из целей внедрения полигонных технологий является минимизация стыков в перевозочном процессе. Переход на полигонные технологии выявил противоречие между границами

существующих участков управления поездных диспетчеров (в пределах железных дорог) и экстерриториальной системой управления поездопотоками и локомотивным парком [3]. Это противоречие предлагается разрешить использованием современных технических средств автоматизации.

1. Мультистанционная структура системы управления для полигонных технологий

Существующая технология диспетчерского управления движением поездов сформировалась в 90-е годы прошлого века путем организации на каждой дороге центров управления перевозками ЦУП. К сожалению, в том числе из-за «жестких» границ диспетчерских участков вследствие сохранения в большинстве случаев эксплуатирующихся систем диспетчерской централизации с ограничениями аппаратной логики (системы ЧДЦ, «Нева», «Луч»), существенного сокращения диспетчерского персонала, а следовательно, и стыков, не было достигнуто. Вместе с тем в задачах оптимизации тяговых ресурсов получили свое развитие полигонные технологии [1, 2].

В сложившихся условиях на плече оборота локомотивов и бригад перевозочный процесс организуется несколькими поездными диспетчерами (ДНЦ). А основными ограничениями продвижения поездопотоков по-прежнему является наличие стыков диспетчерских участков. Вследствие несогласованности действий из-за различных целевых функций каждого участка возникают задержки в движении поездов, поскольку решения принимаются в пользу локальных приоритетов каждого ДНЦ. Сложившаяся технология обусловлена также ограничениями эксплуатируемых технических средств и применяемых на участке видов систем управления.

На рисунке представлена техническая структура построения интегрированной системы комплексной распределенной архитектуры, где требуемые показатели надежности достигаются резервированием со 100 % избыточностью аппаратных средств [4], а безопасности — специализированными аппаратными средствами с дублированной структурой вычислительных модулей.

Предложенная структура не только интегрирует функции автономных систем

железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ), но и позволяет организовать новую технологию организации движения поездов на участке.

Использование распределенной архитектуры микропроцессорной централизации [5] открывает перспективу реализации полигонных технологий на технологически выделенных направлениях.

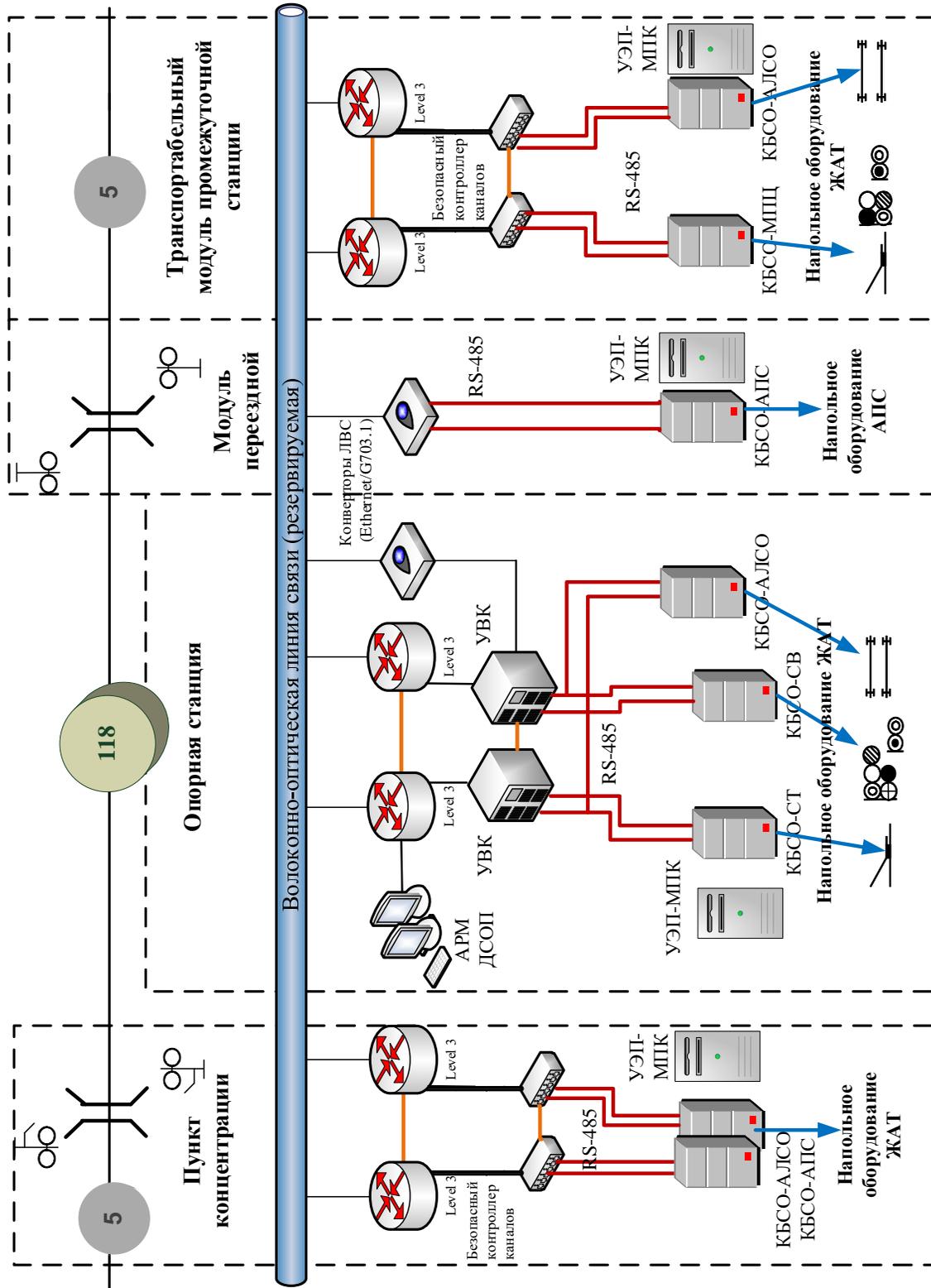
На отдельных пунктах с распределенной архитектурой системы нормально отсутствует персонал дежурных по станциям, а все управление станциями зоны безопасного управляющего вычислительного комплекса (УВК) осуществляется с опорной станции. Это позволяет принципиально по-другому организовывать технологический процесс, который теперь охватывает не одну станцию, а группу станций с инфраструктурой, интегрирующей все многообразие применяемых технических средств ЖАТ станций и перегонов (рис.).

При этом подлежит исследованию реализация полигонных технологий применительно к деятельности поездного диспетчера и его взаимодействие с дежурными опорных станций. Отдельного рассмотрения требует организация взаимодействия дежурного персонала опорной станции с обслуживающим персоналом при производстве работ на отдельном пункте, организации технологических окон, в том числе при отправлении хозяйственного поезда на перегон. Требуют разработки вопросы, связанные с организацией движения в нормальных условиях функционирования и при возникновении отказов устройств ЖАТ и внештатных ситуаций.

2. Особенности структуры оперативного управления интегрированной системы комплексной распределенной архитектуры

Ранее при диспетчеризации ограничением выступала загрузка поездного диспетчера, а его участок управления составлял порядка 100–150 км [6, 7].

В предлагаемом варианте рутинная работа по выполнению местной работы, установке маршрутов, взаимодействию с обслуживающим персоналом и т. п. возлагается на руководителя зоны управления (ЗУ) — дежурного опорной станции



Структура технических средств интегрированной системы комплексной распределенной архитектуры: КБСО — контроллер безопасного сопряжения; АЛСО — автоматическая локомотивная сигнализация как самостоятельное средство сигнализации и связи; АПС — автоматическая пересезная сигнализация; СТ — стрелка; СВ — светофор; МПЦ — микропроцессорная централизация; УЭП-МПМК — система электропитания микропроцессорных комплексов; ЛВС — локальная вычислительная сеть; АРМ ДСОП — автоматизированное рабочее место дежурного опорной станции

(ДСОП). При этом появляется возможность увеличения района управления поездного диспетчера на технологически обоснованных полигонах протяженностью 500 км и более путем объединения нескольких участков с опорными станциями и возможностью стратегического планирования работы полигона.

Прорывную технологию для работы движущего персонала можно предложить, реализовав распределенную архитектуру интегрированной системы управления для протяженного полигона — зоны управления УВК. В этом случае УВК, располагающийся на опорной станции, выполняет задачи традиционной автоматики и телемеханики всей инфраструктуры: станционных, перегонных, заградительных устройств с полным функционалом вспомогательных и обеспечивающих подсистем. Основными задачами УВК опорной станции являются:

1. Для станций в пределах ЗУ:

- обеспечение традиционного набора функций электрической централизации с взаимозависимостями стрелок, сигналов и маршрутов;
- увязка с системами интервального регулирования движения поездов для маршрутов приема и отправления;
- диагностика напольных устройств, самодиагностика вычислительных средств, устройств электропитания, электронных модулей управления и контроля, а также сети передачи данных в распределенной архитектуре;
- телеизмерение параметров аналоговых сигналов в устройствах ЖАТ (уровни напряжений и потребляемых токов на нагрузках питающих устройств, сигналов в рельсовых цепях, включая параметры токов кодирования автоматической локомотивной сигнализации, потребляемого тока при переводе стрелок, сопротивления изоляции кабелей и др.);
- архивация и протоколирование технологических событий, сбоев и отказов устройств, а также команд управления в системе;
- реализация функций логического контроля с формированием текстовых и речевых сообщений;
- выполнение программной автоматической установки маршрутов на заданный период

для полной топологии каждого отдельного пункта;

- передача на отдельные пункты команд телеуправления ЖАТ, включая ответственные команды, и обработка пакетов телеизмерения и телесигнализации состояния объектов контроля;
- передача на отдельные пункты специализированных команд телеуправления, обусловленных безлюдной технологией (дистанционная выдача ключа-жезла машинисту хозяйственного поезда, двукратный перевод стрелок, последовательный перевод в случаях ограничений питающих устройств и др.);
- выполнение дополнительных функций по управлению на отдельных пунктах (электрообогрев стрелочных переводов, пневмоочистка стрелок, речевое информирование пассажиров и оповещение работающих на путях, освещение платформ и др.).

2. Для перегонных устройств интервального регулирования движения поездов в пределах ЗУ:

- функции автоблокировки с возможностями реализации современных технологий регулирования движения поездов на основе автоматической локомотивной сигнализации, применяемой как самостоятельное средство сигнализации и связи, подвижных блокучастков, виртуальной сцепки;
- функции полуавтоматической блокировки;
- удаленная диагностика и мониторинг состояния объектов ЖАТ;
- телеизмерения аналоговых параметров сигналов в рельсовых цепях и кодов автоматической локомотивной сигнализации;
- реализация ответственных команд, таких как сброс счетчиков осей, смена направления движения на перегоне, принудительное открытие переезда и др.

Этот подход позволяет повысить производительность труда за счет оптимального использования малолюдной технологии управления процессом перевозок.

Таким образом, предлагается организация централизованного управления зонами с опорных станций и включение их в расширенный диспетчерский полигон с доведением протяженности ЗУ до 500–600 км. При этом дистанционное управление организуется по

принципам мини-диспетчерской централизации [7, 8], а реализация технологии управления должна соответствовать требованиям Правил технической эксплуатации¹.

3. Обеспечение непрерывности перевозочного процесса при полигонных технологиях

В организации оперативного управления можно выделить три режима: основной, вспомогательный и аварийный [8].

Перевозочный процесс в *основном режиме* обеспечивает ДСОП или ДНЦ. Основной режим работы должен обеспечивать в ЗУ:

- контроль состояния объектов ЖАТ;
- индивидуальное управление объектами ЖАТ;
- управление маршрутами (поездными и маневровыми) — установка, разделка;
- местное управление объектами ЖАТ;
- ведение графиков движения поездов;
- ведение электронных журналов.

Вспомогательный режим реализуется в системе при возникновении отказов в устройствах ЖАТ путем передачи ответственных команд, исполняемых без проверки условий безопасности устройствами электрической централизации и посылаемых с соблюдением определенного регламента.

К таким командам относятся:

- вспомогательная смена направления движения на перегоне, оборудованном двухсторонней автоблокировкой;
- вспомогательное разблокирование перегона на участках с полуавтоматической блокировкой, оборудованного устройствами контроля свободности (искусственная дача прибытия поезда в полном составе);
- вспомогательный перевод стрелок при ложной занятости стрелочного участка;
- искусственное размыкание замкнутых в маршруте путевых и стрелочных участков;
- вспомогательное управление устройствами переездной сигнализации;

- искусственное размыкание при ложном срабатывании устройств контроля схода подвижного состава (УКСПС) и контрольно-габаритных устройств (КГУ).

Пользование ответственными командами допускается после проверки на месте состояния объектов (стрелочного перевода, подвижного состава, путевых стрелочных участков, станционных путей и др.). Эти проверки должны выполняться железнодорожными работниками, находящимися на отдельных пунктах, а при отсутствии привлекаются локомотивные бригады.

В *аварийном режиме* (при выходе из строя канала связи, других повреждениях устройств ЖАТ и связи, не указанных в предыдущем пункте) на станциях осуществляется резервное управление с мобильного АРМ ДСП, подключаемого посредством межстанционной волоконно-оптической сети к УВК опорной станции по обеспечению блокировочных взаимозависимостей безопасности движения поездов. При этом может сохраняться централизованный контроль как у ДНЦ, так и у ДСОП.

Отдельного рассмотрения требует вопрос обеспечения непрерывности перевозочного процесса при отказах, производстве технологического процесса по обслуживанию и ремонтных работ, а также при возникновении нештатных ситуаций. Для обеспечения непрерывности перевозочного процесса во вспомогательных и аварийных режимах, а также при нештатных ситуациях на каждом отдельном пункте монтируется выносной щиток управления (ВЩУ), в котором располагаются:

- курбельный аппарат с курбельной рукояткой;
- ключи жезлы примыкающих перегонов;
- кнопка экстренного снятия напряжения в электропитающей установке при необходимости тушения пожара;
- навесные замки для запираания стрелок на закладку.

При отказах в системах электрической централизации, связанных с невозможностью открытия светофоров, ДСОП принимает решение о продолжении передвижения, руководствуясь индикацией на мониторе. При этом выполняется проверка соответствия положения стрелок по трассе и свободности пути при приеме поезда,

¹ Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Утверждены Приказом Минтранса России от 23 июня 2022 г. № 250. — Екатеринбург: ТД «УралЮрИздат», 2022. — 528 с.

а при неисправности выходного светофора — свободу участка удаления и отсутствие поездов встречного направления. После чего поезд принимается на станцию по регистрационному приказу, передаваемому машинисту локомотива. Приказ фиксируется в электронном журнале (возможно использование типовых форм для сокращения затрат времени на записи). Кроме того, все переговоры ДСОП записываются в компьютерном цифровом речевом регистраторе.

При выполнении передвижения по приказу машинист должен вести поезд со скоростью не более 20 км/ч с особой бдительностью и готовностью немедленно остановиться при возникновении препятствий для дальнейшего движения. В маршрутах отправления это требование должно выполняться до проследования первого проходного светофора и далее машинисту следует руководствоваться проходными светофорами автоблокировки.

При невозможности перевода стрелки ДСОП, для того чтобы убедиться в фактическом состоянии стрелочного перевода, должен привлечь для визуального осмотра железнодорожного работника, например хозяйства пути, производящего очистку стрелок, дежурного ближайшего охраняемого переезда или другого работника станции, который устранит причину нарушения. Например, уберет посторонний предмет или напесовку снега между остряком и рамным рельсом. Если внешним осмотром не удастся обнаружить причину отказа, прекращается пропуск поездов по маршрутам, для которых требуется перевод стрелок в другое положение, вызывается электромеханик для ремонта. Если же и в этом случае стрелка не переводится, она передается на ручное управление (курбельной рукояткой). На отдельных пунктах, в случае отсутствия дежурного персонала для осмотра, а при необходимости и перевода стрелок курбелем, могут привлекаться локомотивные бригады поездов.

При ложной занятости стрелочно-путевой секции, как и в предыдущем случае, выполняется визуальный осмотр рельсового участка. После доклада о фактической ложной занятости дежурный переводит стрелки, входящие в эту рельсовую цепь с передачей ответственных команд.

Если по индикации приемоотправочный путь имеет ложную занятость, дежурный по возможности не должен принимать поезда на этот путь до устранения отказа. В случае необходимости использования данного пути прием поезда осуществляется по пригласительному сигналу или по запрещающему сигналу с передачей локомотивной бригаде регистрируемого приказа после проверки через работников станции (или локомотивную бригаду) фактической свободы пути.

Для разделки неразомкнувшихся секций при нарушениях алгоритма размыкания маршрута или ложной занятости одной из секций после прохода поезда передаются ответственные команды искусственного размыкания. Восприятие этих команд устройствами электрической централизации на станции и запуск комплекта выдержки времени контролируется по индикации на мониторе на опорной станции.

В случае нарушений условий работы переездных устройств (например, при выполнении передвижений по запрещающим показаниям светофоров), руководствуясь индикацией на мониторах, дежурный формирует ответственные команды для вспомогательного открытия переезда. При ложной занятости переездных рельсовых цепей пользование ответственными командами осуществляется после доклада дежурного персонала (локомотивной бригады) о фактической свободе переезда.

При отказах автоблокировки на станциях, ограничивающих перегон, действие автоблокировки прекращается, а движение поездов осуществляется передачей регистрируемых приказов локомотивным бригадам.

При наличии у ДСОП контроля состояния путей и положения стрелок поезд может быть отправлен на свободный перегон по регистрируемому приказу, передаваемому машинисту.

В случае ложной занятости блок-участка двухсторонней автоблокировки, при возникновении необходимости, выполняется вспомогательная смена направления с проверкой фактической свободы перегона. При невозможности изменить направление пользование автоблокировкой прекращается.

На малоинтенсивных линиях при нарушениях автоматического разблокирования

перегонов вследствие сбоя в системе счета осей, дополняющей полуавтоматическую блокировку, дежурный после получения доклада работников станции (дежурного по переезду или локомотивной бригады) о проследовании поезда в полном составе передает ответственную команду для приведения устройств в исходное состояние (сброс счетчиков).

В случае срабатывания УКСПС или КГУ и переключения входного (проходного) светофора на запрещающий огонь ДСОП информирует машиниста о срабатывании этих устройств для остановки поезда. На многопутном перегоне дополнительно ДСОП об этом информирует машиниста поезда встречного или попутного направления, движущегося по соседнему пути для снижения скорости до 20 км/ч с готовностью остановиться при обнаружении препятствия.

При неисправностях дистанционного управления и телеконтроля объектов станции ДСОП может перевести ее на резервное управление, для чего на каждом раздельном пункте предусматривается возможность подключения мобильного АРМ. В этих случаях ДСОП запрещается руководствоваться индикацией поездного положения на этих станциях (состояния путей, стрелок, сигналов). Поэтому на центральном посту по истечении 1-2 минут после прекращения поступления известительных сигналов системой прекращается индикация положения контролируемых объектов с целью исключения ошибок при принятии управленческих решений из-за отображения неправильной информации.

В случае ремонта, устранения отказа или выполнения регламентных работ по техническому обслуживанию порядок взаимодействия не изменяется.

В случае необходимости отправления на перегон с одной из станций ЗУ хозяйственного поезда или поезда с подталкивающим локомотивом, для возвращения на станцию отправления выдается ключ-жезл из ВЩУ. Лицо, ответственное за выполнение работ, или машинист локомотива изымает ключ-жезл из ВЩУ после разблокировки электрозащелки, осуществляемой посредством передачи ответственной команды от ДСОП.

В том случае, если стрелка одной из станций ЗУ не переводится, то после внешнего осмотра

и до устранения неисправности осуществляется аварийный перевод курбелем. Разблокирование и выдача курбельной рукоятки из курбельного аппарата, располагаемого в ВЩУ, выполняется путем передачи ответственной команды от ДСОП. Получение контроля положения стрелки обеспечивается цифровым датчиком сразу при достижении крайнего положения стрелки после ручного перевода. Если электрический контроль положения стрелки не получен, то стрелка в крайнем положении запирается работником на закладку и навесной замок, а на АРМ ДСОП осуществляется индивидуальная блокировка стрелки, исключая возможность последующего управления.

При отсутствии контроля положения стрелки, ее исправность и правильность установки определяется на месте железнодорожным работником. Стрелка должна быть заперта на закладку и навесной замок, а в электроприводе выключен курбельный блок-контакт. Ключ от запертой стрелки хранится в ВЩУ. Движение поездов по такой стрелке осуществляется по запрещающим сигнальным показаниям.

Однако находящаяся в крайнем положении стрелка и запертая на закладку и навесной замок может быть установлена ДСОП на макет (после доклада железнодорожного работника о ее фактическом состоянии). Полученный программно контроль ее положения дает возможность пропуска поездов по разрешающим показаниям светофоров в маршрутах, в которые стрелка входит в установленном положении.

Также в системе, при возникновении пожара, необходимо предусмотреть аварийное снятие напряжения на фидерах со срабатыванием расцепителей с видимым разрывом. Это обеспечивается передачей ответственной команды в схему управления моторным расцепителем для дистанционного отключения напряжения фидеров во вводных устройствах.

4. Техничко-экономическая эффективность интегрированной распределенной структуры системы управления движением поездов

Переход к системам микропроцессорной централизации стрелок и сигналов с распределенной архитектурой позволяет:

- повысить производительность труда оперативного персонала дежурных по станции;

- эффективно использовать вычислительные ресурсы аппаратных средств;
- применять единую аппаратную платформу на полигоне железных дорог;
- минимизировать традиционную кабельную сеть и исключив необходимость дублирования жил (или применения большего сечения жил) для управления удаленными объектами ЖАТ.

Программируемая элементная база в этом смысле обладает существенными преимуществами — без дополнительных схем и устройств программным путем выполняются встроенные опции, ранее требовавшие отдельных узлов и приборов (контролируемый пункт диспетчерской централизации, контроллер и концентратор систем технической диагностики, постовое оборудование последовательного перевода стрелок в маршруте при ограничениях мощности фидеров, штативы и реле для автоматической установки маршрутов и т. п.) [9].

Кроме этого, достигается существенная экономия энергоресурсов благодаря усложнению алгоритмов. Например, станция переводится в ждущий режим индикации сигнальных показаний светофоров при отсутствии поездов, снимается кодирование занятых приемоотправочных путей при отсутствии локомотива.

На двухпутных линиях в случае включения автодействия станционных светофоров (когда станционные светофоры работают как проходные перегонные сигналы) все другие светофоры (выходные, маневровые) отключаются. Аналогично при отсутствии маневровых работ. Только при необходимости производства местной работы происходит включение маневровой сигнализации на раздельном пункте. При этом контроль состояния и диагностика объектов железнодорожной автоматики и телемеханики осуществляется в режиме периодического сканирования путем подачи тестовых диагностических сигналов в выходные цепи управления.

Использование на раздельных пунктах только модулей управления и контроля и отсутствие персонала позволяет снизить эксплуатационные расходы на содержание помещений, электрообогрев — при безлюдных технологиях для работы аппаратуры требуется поддержание температуры 5 °С вместо 20 °С.

Заключение

1. Преимуществами предлагаемой технологии управления являются:

- повышение производительности труда и рациональное использование оперативного персонала промежуточных станций с доведением загрузки до нормативного значения у ДСОП на опорной станции;
- работа ДСОП на участке с выполнением планового графика ДНЦ и возможностями расширенного контроля поездного положения для принятия оптимальных решений;
- возможность реализации полигонных технологий стратегического планирования с уровня центра управления перевозками дороги;
- ликвидация «мертвых» зон и «узких» мест у ДНЦ (малоинтенсивных участков и тупиковых ответвлений) за счет дополнения работой ДСОП;
- эффективная реализация авторежимов на основе достоверного прогноза на актуальном информационном пространстве.

2. Вместе с тем предлагаемая технология предполагает изменение организационной структуры управления перевозками и требует научного обоснования границ зон оперативного управления для ДСПО и полигонов для ДНЦ с задачами стратегического планирования, что является целью дальнейших исследований. ▲

Библиографический список

1. Каутц В. Э. Инновации в перевозочном процессе на примере ВСЖД и Восточного полигона транссибирской железнодорожной магистрали / В. Э. Каутц, Е. В. Нефедьева // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы Десятой Международной научно-практической конференции, 21–24 мая 2019 г. Иркутск: в 2 т. — Иркутск: ИрГУПС, 2019. — Т. 2. — 402 с.
2. Фролова А. В. Полигонные технологии управления перевозками в РФ / А. В. Фролова, В. А. Мишустин, Е. В. Нефедьева // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. — 2019. — № 1. — URL: <http://mnv.irgups.ru/toma/11-2019>.
3. Осьминин А. Т. Научные подходы к расчету границ полигонов управления перевозочным процессом и реализации полигонных технологий / А. Т. Осьминин // Бюллетень ОУС ОАО «РЖД». — 2017. — № 2. — С. 42–56.
4. Сапожников Вл. В. Анализ компьютерных систем оперативного управления устройствами ЭЦ / Вл. В. Сапожников, А. Б. Никитин // Автоматика, связь, информатика. — 2006. — № 6. — С. 6–8.

5. Никитин А. Б. Построение распределенных микропроцессорных систем управления движением поездов / А. Б. Никитин, О. А. Наседкин, А. А. Лыков и др. // Автоматика на транспорте. — 2023. — Т. 9. — № 2. — С. 153–161. — DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-153-161.
6. Гавзов Д. В. Автоматизированные системы диспетчерского управления движением поездов / Д. В. Гавзов, А. Б. Никитин // Транспорт: наука, техника, управление: сборник обзорной информации. — М.: ВИНТИ, 1993. — Вып. 2. — С. 2–12.
7. Сапожников Вл. В. Концентрация и централизация оперативного управления движением поездов / Вл. В. Сапожников, Д. В. Гавзов, А. Б. Никитин. — М.: Транспорт, 2002. — 102 с.
8. Никитин А. Б. Автоматизация оперативного управления на станциях диспетчерского управления / А. Б. Никитин // Конструирование, сертификация и техническая диагностика устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики: сб. науч. трудов. — СПб.: ПГУПС, 2003. — С. 99–106.
9. Никитин А. Б. Интеллектуальные функции управления в микропроцессорных системах централизации / А. Б. Никитин, О. А. Наседкин, А. А. Лыков и др. // Автоматика на транспорте. — 2023. — Т. 9. — № 1. — С. 63–71. — DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-63-71.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 4, pp. 333–341
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-04-333-341

Organization of the Transportation Process on a Section with an Integrated Distributed Architecture of the Control System for Polygon Technologies

Information about authors

Nikitin A. B., Doctor in Engineering, Professor, Head of the Department¹.

E-mail: nikitin@crtc.spb.ru

Zhuravleva N. A., Doctor in Economics, Professor, Head of the Department².

E-mail: zhuravleva_na@mail.ru

Korniyenko A. A., Doctor in Engineering, Professor³. E-mail: kaa.pgups@yandex.ru

Kushpil I. V., PhD in Engineering, Associate Professor¹. E-mail: i_kushpil@mail.ru

Kopytov D. V., Postgraduate Student¹. E-mail: dmitry9786@gmail.com

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University "Automation and Remote Control on Railways" Department, St. Petersburg

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University "Transport Economics" Department, St. Petersburg

³Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, "Information Technology and IT Security" Department, St. Petersburg

Abstract: The implementation of railway automation and remote control systems on a microprocessor circuit technology involves significant capital investments compared to their relay counterparts. Therefore, it is advisable to use an integrated system with a comprehensive distributed architecture for automating train traffic control in an extended area from reference stations. This, in turn, requires the development of a technology for organizing the transportation process. The article discusses the technology of interlocking control at reference stations, as well as justifies a list of responsible commands implemented in a safe control computing complex, taking into account the exclusion of some interdependence checks in the distributed placement of equipment of object controllers and malfunctions in the operation of railway automation and remote control systems. The efficiency of the proposed technological scheme for the extended control zone of the polygon is considered.

Keywords: railway automation and remote control systems; microprocessor interlocking; automated workplace; reference station; control computing complex; object controller; coupling device; reference station operator; train dispatcher; responsible command; polygon control technologies.

References

1. Kautts V. E., Nefed'eva E. V. Innovatsii v perevozhnom protsesse na primere VSZhD i Vostochnogo poligona transsibirskoy zheleznodorozhnoy magistrali [Innovations in the transportation process on the example of the Eastern Railway and the Eastern range of the Trans-Siberian Railway]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo*

regiona: materialy Desyatoy Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, 21–24 maya 2019 g. Irkutsk: v 2 t. [Transport infrastructure of the Siberian region: materials of the Tenth International Scientific and Practical Conference, 21–24 May 2019. Irkutsk: in 2 volumes]. Irkutsk: IRGUPS Publ., 2019, vol. 2, 402 p. (In Russian)

2. Frolova A. V., Mishustin V. A., Nefed'eva E. V. Poligonnye tekhnologii upravleniya perevozkami v RF [Polygon technologies for transportation management in the Russian Federation]. *Molodaya nauka Sibiri: elektron. nauch. zhurn.* [Young Science of Siberia: electron. scientific magazine]. 2019, Iss. 1. Available at: <http://mnv.irgups.ru/toma/11-2019>. (In Russian)
3. Os'minin A. T. Nauchnye podkhody k raschetu granits poligonov upravleniya perevozhnym protsessom i realizatsii poligonnykh tekhnologiy [Scientific approaches to calculating the boundaries of polygons for managing the transportation process and implementing polygon technologies]. *Byulleten' OUS OAO "RZhD"* [Bulletin of the OUS of JSC Russian Railways]. 2017, Iss. 2, pp. 42–56. (In Russian)
4. Sapozhnikov VI. V., Nikitin A. B. Analiz komp'yuternykh sistem operativnogo upravleniya ustroystvami ETs [Analysis of computer systems for operational control of EC devices]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communications, computer science]. 2006, Iss. 6, pp. 6–8. (In Russian)
5. Nikitin A. B., Nasedkin O. A., Lykov A. A. Postroenie raspredelennykh mikroprotssessornykh sistem upravleniya dvizheniem poezdov [Construction of distributed microprocessor control systems for train traffic]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport]. 2023, vol. 9, Iss. 2, pp. 153–161. DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-153-161. (In Russian)
6. Gavzov D. V., Nikitin A. B. Avtomatizirovannye sistemy dispetcherskogo upravleniya dvizheniem poezdov [Automated dispatch control systems for train traffic]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie: sbornik obzornoy informatsii* [Transport: science, technology, management: collection of overview information]. Moscow: VINITI Publ., 1993, Iss. 2, pp. 2–12. (In Russian)
7. Sapozhnikov VI. V., Gavzov D. V., Nikitin A. B. *Kontsentratsiya i tseentralizatsiya operativnogo upravleniya dvizheniem poezdov* [Concentration and centralization of operational control of train traffic]. Moscow: Transport Publ., 2002, 102 p. (In Russian)
8. Nikitin A. B. Avtomatizatsiya operativnogo upravleniya na stantsiyakh dispetcherskogo upravleniya [Automation of operational control at dispatch control stations]. *Konstruirovaniye, sertifikatsiya i tekhnicheskaya diagnostika ustroystv i sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: sb. nauch. trudov* [Design, certification and technical diagnostics of devices and systems of railway automation and telemechanics: collection. scientific works]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2003, pp. 99–106. (In Russian)
9. Nikitin A. B., Nasedkin O. A., Lykov A. A. et al. Intellektual'nye funktsii upravleniya v mikroprotssessornykh sistemakh tseentralizatsii [Intelligent control functions in microprocessor centralization systems]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2023, vol. 9, Iss. 1, pp. 63–71. DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-63-71. (In Russian)

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПНЕВМОНИКИ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТОМ

ПАНКОВ Андрей Александрович, д-р техн. наук, профессор¹; e-mail: app.post@rambler.ru

НЕЧАЕВ Григорий Иванович, д-р техн. наук, профессор¹; e-mail: logistikatt@mail.ru

МИРОШНИКОВ Вадим Владимирович, д-р техн. наук, зав. кафедрой, проректор по научно-учебной работе²; e-mail: prorectormw@mail.ru

ЗАХАРЧУК Александр Сидорович, д-р техн. наук, профессор³; e-mail: kaf_energo_sys@mail.ru

БУДИКОВ Леонид Яковлевич, д-р техн. наук, профессор⁴; e-mail: leonidbudikov@yandex.ru

КОРОБЕЙНИКОВ Дмитрий Сергеевич, аспирант¹; e-mail: dimaktt@mail.ru

МИХАЙЛОВА Ирина Геннадиевна, соискатель¹; e-mail: tilinstitut@gmail.com

¹Луганский государственный университет имени Владимира Даля, кафедра «Транспортные технологии», Луганск

²Луганский государственный университет имени Владимира Даля, кафедра «Приборы», Луганск

³Луганский государственный университет имени Владимира Даля, кафедра «Электротехнические системы электропотребления», Луганск

⁴Луганский государственный университет имени Владимира Даля, кафедра «Аварийно-спасательные работы», Луганск

В работе показано, что особое место в системах управления транспортом занимают специализированные устройства, разработанные на основе применения элементов пневмоники (струйной техники). С использованием струйных и других проточных пневматических элементов и устройств оказывается возможным в определенных случаях наиболее рациональным образом выполнять функции автоматического управления. В некоторых эксплуатационных условиях этот способ управления является единственно возможным, например там, где не могут работать электронные системы управления. Анализ перспектив применения управляющих устройств на основе пневмоники привел к заключению о целесообразности их использования в системах автоматического управления некоторыми видами транспорта, в частности гидро- и пневмотранспортом, устройствами перемещения на воздушной прослойке, узлами и механизмами с аэрогидродинамическим рабочим телом. В связи с особыми требованиями, предъявляемыми к системам управления, кроме обычных стандартных элементов, должны применяться и нестандартные, в частности силовые аэрогидродинамические элементы пневмоники. Установлено, что одной из причин недостаточного применения элементов пневмоники в специализированных системах управления транспортом являются затруднения в разработке более эффективных конструкций силовых элементов. Процессы взаимодействия потоков в элементах пневмоники сложны и изучены недостаточно. Это составляет проблему выбора оптимальной геометрии элементов для получения их улучшенных характеристик. Для этого необходимо заменить эмпирические методы с их элементами случайности методами, имеющими более существенное обоснование. В настоящее время эффективное решение данной задачи возможно на основе имитационного моделирования аэрогидродинамических потоков с применением специальных программных средств. На основе имитационного моделирования в программной среде ANSYS Fluent проанализированы рабочие процессы и аэродинамические потоки в силовых элементах пневмоники. В результате моделирования разработаны элементы для применения в системах управления транспортом. В разработанных элементах оптимизированы размерные, энергетические характеристики и режимы работы. Применение элементов пневмоники, полученных в результате моделирования, позволяет улучшить технико-экономические характеристики специализированных систем управления транспортом.

Ключевые слова: струйная техника; специализированные системы управления; имитационное моделирование; силовой элемент пневмоники; взаимодействие потоков; процесс переключения.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-04-342-354

▼ Введение

Системы управления с элементами пневмоники находят все более широкое применение в транспортной отрасли. Известны струйные устройства пневмоники для защиты от

гидравлических ударов, предназначенные для систем трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов [1]. При разработке струйных вихревых клапанов для регулирования режимов движения нефти в трубопроводе возникли

затруднения в связи с тем, что для эффективной работы струйных вихревых клапанов необходимо, чтобы давление в каналах управления было больше давления на входе, что достигается дросселированием основного потока [2–6]. Однако при регулировании потока нефти в трубопроводах дросселирование основного потока в нужных пределах является недопустимым. Поэтому для регулирования подачи нефти и нефтепродуктов по трубопроводам разработаны струйные вихревые клапаны с подвижными стержнями в каналах управления, которые позволяют управлять потоками жидкости без дросселирования входного сечения клапана [1].

Получили развитие работы по использованию устройств и систем пневмоники для управления газопроводами. Для газовой промышленности специально разработаны струйные элементы системы «Янтарь», отличающиеся от элементов пневмоники общепромышленного назначения тем, что они предназначены для работы на открытом воздухе в условиях, когда температура окружающей среды изменяется в широких пределах [1].

Для управления движением железнодорожного транспорта на протяжении многих лет были традиционными только устройства электроавтоматики, они и сейчас имеют в данной области техники исключительное применение. Поэтому значительный интерес вызвала публикация [7], в которой сообщалось о работах по использованию пневмоники в системах железнодорожной автоматики. Основанием для проведения этих работ явилось то, что струйные элементы позволяют создавать схемы железнодорожной автоматики, более соответствующие требованиям безопасности движения. В качестве особенно ценного свойства элементов пневмоники отмечается возможность реализации основных функций без опасных отказов, так как в элементах пневмоники отсутствуют какие-либо детали, ощутимо изменяющие свои характеристики с течением времени. В статье представлены данные о разработке струйной схемы маршрутов приема (была взята для проработки схема маршрутов приема горловины малой станции). Сообщается об испытаниях струйного устройства управления стрелкой, проведенного в

реальных условиях эксплуатации на одной из станций железнодорожного узла. Устройством было безотказно произведено во время испытаний $7,5 \cdot 10^6$ переключений. В указанной выше статье также говорится о возможности применения струйных элементов в локомотивных устройствах, таких, например, как скоростемеры и датчики пройденного пути. Для питания таких устройств предлагалось использование воздуха из тормозной магистрали.

На элементах пневмоники построен ряд устройств, предназначенных для управления железнодорожными составами специального назначения. На струйных элементах системы «Волга» построена аппаратура, осуществляющая управление стрелочными переводами с движущегося локомотива на подземном транспорте угольных шахт и рудников, и аппаратура для управления в шахтах дверями шлюзов, причем в этом случае управление производится из кабины машиниста движущегося локомотива или же с пульта поста управления [1].

Известны работы по вопросам использования струйных устройств в системах управления автоматическими гидромеханическими передачами автомобилей [1, 8, 9].

Особое место среди транспортных средств, для управления которыми целесообразно применять элементы пневмоники, занимают аппараты на воздушной подушке и средства пневмотрубопроводного транспорта.

Проведенный анализ перспектив применения в данной области устройств пневмоники привел к заключению о целесообразности их использования в системах автоматического управления следующими видами транспорта на воздушной подушке или воздушной прослойке: аппаратами на воздушной подушке, предназначенными для движения по бездорожью, и судами на воздушной подушке; внутризаводским пневмотранспортом, конвейерами для транспортирования поддонов с изделиями и отдельных изделий на воздушной прослойке, устройствами перемещения на воздушной прослойке станков при обработке громоздких изделий [1, 10, 11].

Ряд задач автоматического управления возникает и в области трубопроводного пневмотранспорта сыпучих материалов [12].

Анализ возможных применений пневмоники в системах перспективного высокоскоростного пассажирского наземного эстакадного и трубопроводного транспорта, проекты которого находятся сейчас в стадии предварительной разработки и обсуждения, привел к заключению о том, что здесь могут быть использованы устройства струйной автоматики, например при автоматическом управлении криогенными установками сверхпроводящих магнитов в транспортных средствах с электродинамической подвеской, приводимых в движение синхронными линейными двигателями [1].

В качестве примера использования элементов пневмоники в конструкциях транспортных средств можно представить разработку антиюзных систем управления торможением автомобиля (или систем динамической стабилизации) [1, 13–16]. Одна из таких экспериментальных систем, испытанная в Японии, была построена на основе стандартных струйных элементов производства фирмы Corning Glass Works.

Согласно приведенным данным, прошли сравнительные испытания автомобиль со стандартной системой торможения и автомобиль, оборудованный антиюзной системой на основе элементов пневмоники. Когда первый автомобиль, двигавшийся с начальной скоростью 100 км/ч, был резко заторможен, он прошел тормозной путь 130 м и развернулся на 90° относительно исходного направления движения. При таких же условиях торможения автомобиля, оборудованного струйной антиюзной системой, не произошло отклонения от исходного направления движения, а тормозной путь оказался даже несколько меньшим, чем в первом случае [1, 14–16].

Системы управления на основе элементов пневмоники все чаще применяются на объектах транспортной отрасли, где требуется сохранение работоспособности при повышенных температурах, резких колебаниях значений давления, ударах, вибрациях и прочих неблагоприятных воздействиях.

Для таких эксплуатационных условий создана система устройств агрегатно-интегральной струйной техники (АИСТ). Обладая

широкой функциональной номенклатурой струйных элементов, АИСТ обеспечивает интегральное исполнение агрегатных узлов и устройств [1, 17].

АИСТ успешно применяется для построения струйных регуляторов авиационных силовых установок. На элементах АИСТ созданы и выпускаются струйные регуляторы, которые эксплуатируются на газотурбинных двигателях, где регуляторы работают при температурах до +560 °С, значительных колебаниях давления питания (0,002–2,5 МПа) и окружающей среды, ударах, вибрациях, электромагнитных помехах и других неблагоприятных воздействиях [1, 17].

Цель работы: совершенствование геометрических и энергетических характеристик силовых элементов пневмоники для специализированных систем управления транспортом.

Задачи исследований:

- осуществить анализ методов исследований рабочего процесса элементов пневмоники, моделирования и визуализации струйных течений и газовых потоков;
- рассмотреть аспекты и проанализировать опыт применения современных способов имитационного компьютерного моделирования элементов струйной техники;
- на основе имитационного компьютерного моделирования струйных устройств определить возможности улучшения размерно-энергетических характеристик силовых элементов пневмоники;
- провести стендовые экспериментальные исследования силовых элементов пневмоники, разработанных и усовершенствованных на основе имитационного компьютерного моделирования.

1. Анализ методов исследований рабочего процесса элементов пневмоники, моделирования и визуализации струйных течений и газовых потоков

Одной из причин недостаточного применения элементов пневмоники в системах управления транспортом являются затруднения в разработке более эффективных конструкций элементов.

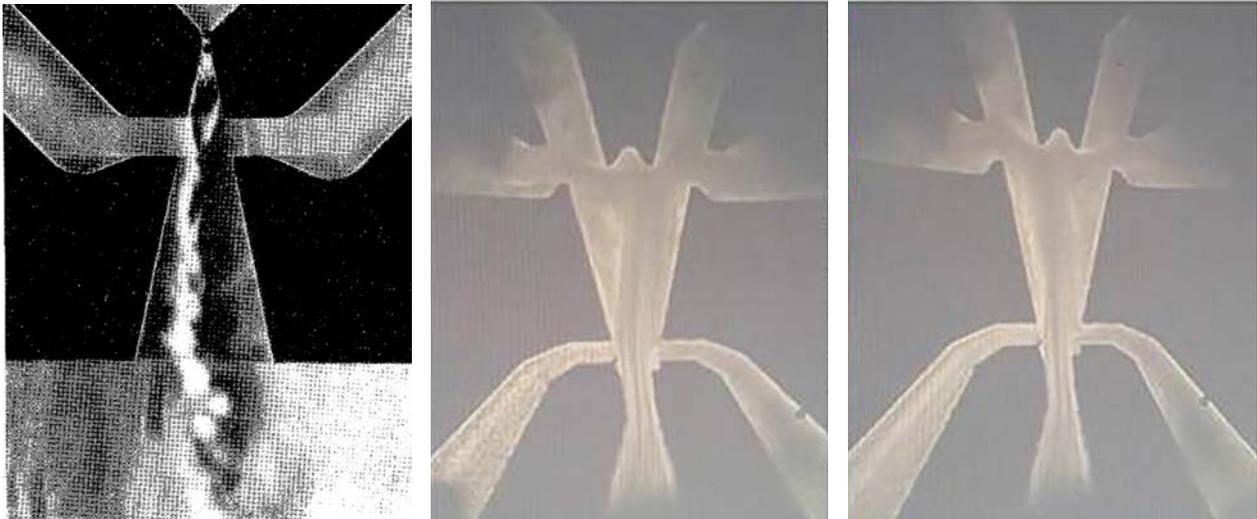


Рис. 1. Физическое моделирование течений в элементах пневмоники

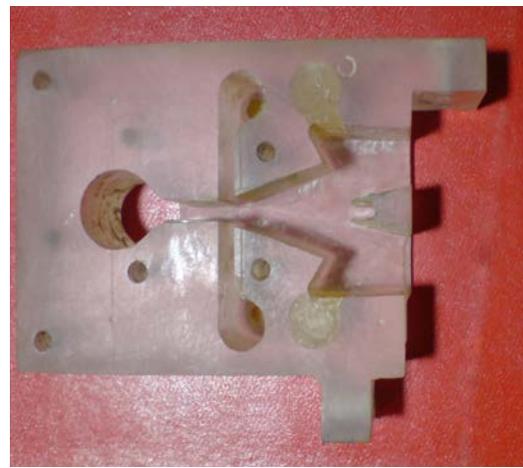
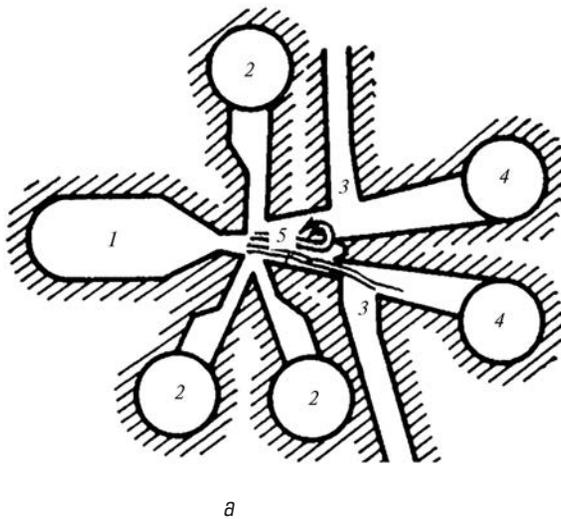


Рис. 2. Элементы пневмоники:

а — схема элемента; 1 — канал питания; 2 — каналы управления; 3 — атмосферные каналы; 4 — выходные каналы; 5 — рабочая камера; *б* — силовой элемент, разработанный эмпирическим методом

При исследовании и разработке элементов пневмоники используются следующие методы [18, 19]:

- эмпирические методы проб и ошибок. Исследователь выбирает геометрические размеры, опираясь на аналогии, интуицию и представления о механизме явлений;
- экспериментальные методы, основанные на визуализации течений (физическое моделирование). Они заключаются в том, что потоки тем или иным способом делают видимыми, например через задымление или окрашивание [18, 20–23] (рис. 1). Изменяя геометрические размеры, достигают нужных направления и конфигурации потоков. Этот метод является

разновидностью метода проб и ошибок и отличается наглядностью;

- аналитические и статистические методы. Это выявление особенностей и аналитических закономерностей при передаче энергии струями в элементах, определение и оптимизация их размерно-энергетических характеристик [24–27].

Обычно струйный элемент (схема на рис. 2, *а*) создается для определенных задач. При этом предпочтение отдается эмпирическим и экспериментальным методам. Это позволяет за минимальное время создать элемент с удовлетворительными характеристиками. Например, на основе эмпирического метода проб и ошибок создан элемент на рис. 2, *б*.

Процессы взаимодействия потоков сложны и изучены недостаточно. Это составляет проблему выбора оптимальной геометрии элементов для получения их улучшенных характеристик. Для этого необходимо заменить эмпирические методы с их элементами случайности, методами, имеющими более существенное обоснование. В настоящее время эффективное решение данной задачи возможно на основе совершенствования методов имитационного моделирования и визуализации аэродинамических потоков с применением специальных программных средств [28–34].

2. Материалы и методы

Для анализа работы элемента пневмоники использована программная среда ANSYS Fluent 15.0 [28, 29]. С ее помощью моделировались переходные процессы в камере элемента (рис. 5–8). Имитационное моделирование проводили в двумерной постановке. На основе рекомендаций, представленных в работах [26, 28–31], рассмотрен процесс переключения в камере элемента. Полученная картина распространена на силовые макроэлементы.

На входе в канал питания элемента моделировали избыточное давление 7–9 кПа и

температуру 300 К. Избыточное давление в управляющих каналах предполагалось постоянным. Таким образом, имитировался управляющий сигнал. На стенках элемента в процессе моделирования программно ставились условия герметичности, прилипания и тепловой изолированности.

Для представленной на рис. 2, б конфигурации элемента пневмоники с базовыми размерами сопла питания шириной $b = 2$ мм и глубиной (высотой) $h = 17$ мм исследовался процесс переключения при подаче управляющих воздействий. В процессе моделирования сначала программно задавали геометрию элемента пневмоники и на ее основании моделировали процесс переключения силовой струи. По характеристикам течений определяли, удовлетворены ли требования к элементу. При необходимости геометрию корректировали и повторяли моделирование процесса переключения.

Следующим этапом было установление показателей работы моделируемого элемента. Для этого изготавливался элемент с полученными при моделировании оптимальными геометрическими показателями (рис. 9). Испытания элемента выполнялись на стендовом оборудовании (рис. 3, 4).

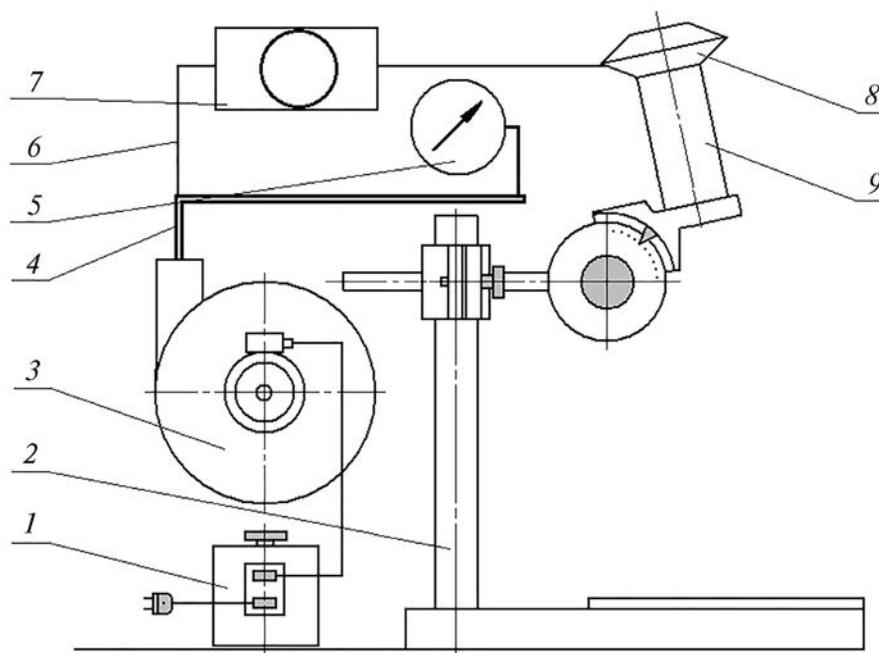
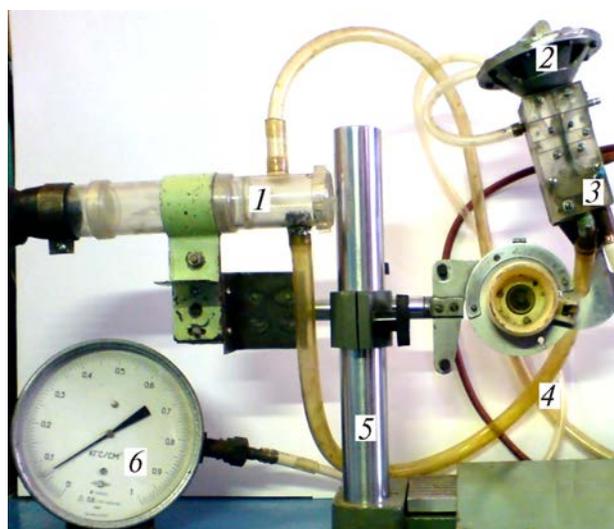


Рис. 3. Схема стенда для испытания элементов пневмоники:

- 1 — лабораторный автотрансформатор; 2 — штатив с монтажными кронштейнами;
3 — источник сжатого воздуха; 4 — воздушный коллектор; 5 — манометр; 6 — воздухопроводы;
7 — счетчик объема воздуха; 8 — дроссель; 9 — элемент пневмоники



а



б

Рис. 4. Оборудование для испытаний струйных элементов пневмоники:

- а — измерение давления питания элемента пневмоники; б — измерение объема воздуха;
- 1 — воздушный коллектор; 2 — дроссель;
- 3 — элемент пневмоники; 4 — воздухопроводы;
- 5 — штатив с монтажными кронштейнами;
- 6 — манометр; 7 — счетчик объема воздуха;
- 8 — лабораторный автотрансформатор

Лабораторным автотрансформатором на манометре 6 устанавливались значения давления питания $P_{\text{П}} = 1\text{--}15$ кПа (рис. 4, а) и замерялись значения объема воздуха W , прошедшего через счетчик 7 за определенный временной период ($t = 30$ с). Значения расхода воздуха элементом пневмоники рассчитывались по известной формуле ($Q = W/t$) и заносились в табл. 1. На основе значений давления и расхода рассчитывалась мощность, потребляемая элементом.

3. Результаты исследований

В моделируемой картине газодинамических процессов при заданной геометрии рассмотрены основные этапы переключения струи воздуха и распространения волн давления по аналогии с исследованиями авторов [28, 29], где представлен процесс установления струи в рабочей камере элемента пневмоники после подачи давления питания. По обе стороны струи идет процесс образования вихрей. Они формируются случайным образом. Рабочая среда частично эжектируется из каналов управления. Первичный поток струи питания сбрасывается в атмосферные окна и частично поступает в выходные каналы. Воздушная струя случайным образом устанавливается вдоль левой стенки рабочей камеры элемента. На рис. 5 можно видеть ядро струи и его основное направление. На рис. 5 также показано, как происходит повышение давления в левом выходном канале.

Далее давление управления подается в левый управляющий канал. Струя при этом начинает отклоняться вправо. На модели процесса (рис. 6) выявлено, что почти отклоненная вправо струя сбрасывается в левое атмосферное окно. Она пока не может преодолеть вихрь отраженного потока, формирующийся справа от нее. В правой выходной канал начинается выброс пульсаций давления, которые формирует пульсирующая рабочая среда отраженного потока. Пульсации могут быть источником ложных срабатываний элемента [28, 29].

На фрагменте модели процесса (рис. 7) видно, как струя снова устанавливается в «среднее» положение, отклонившись от левой стенки. Основной поток сбрасывается в левый атмосферный канал. По обе стороны струи формируются отраженные потоки. В обоих выходных каналах формируются пульсации давления. В рассматриваемый момент в левом выходном канале они преобладают. Управляющее давление и расход поступают в левый канал управления. Струя перемещается к правой стенке.

Затем струя восстанавливает свою целостность. Пульсации давления в левом выходном канале приводят к пульсациям давления в левом управляющем канале. Это вызывает нестабильность положения силовой струи

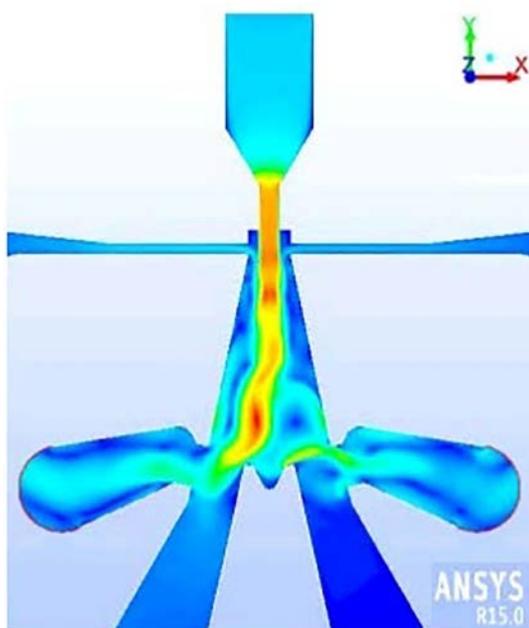


Рис. 5. Фрагмент повышения давления в левом выходном канале

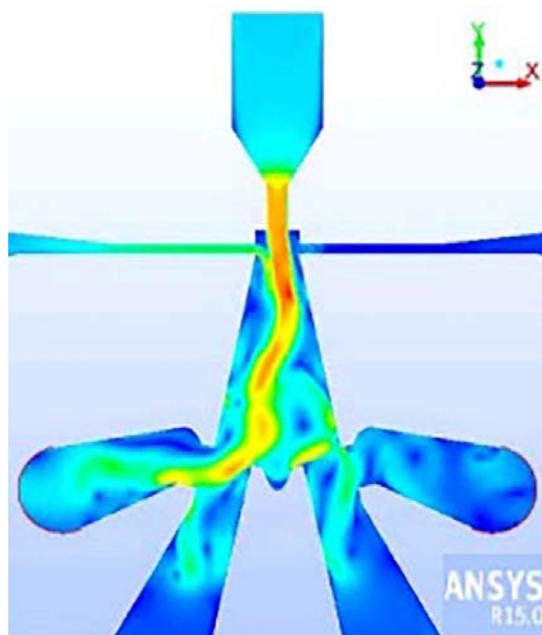


Рис. 6. Момент сброса струи в левое атмосферное окно

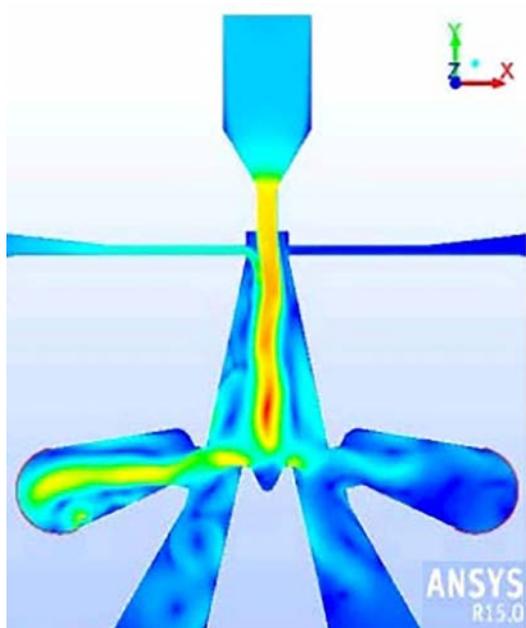


Рис. 7. Фрагмент установления струи в среднем положении

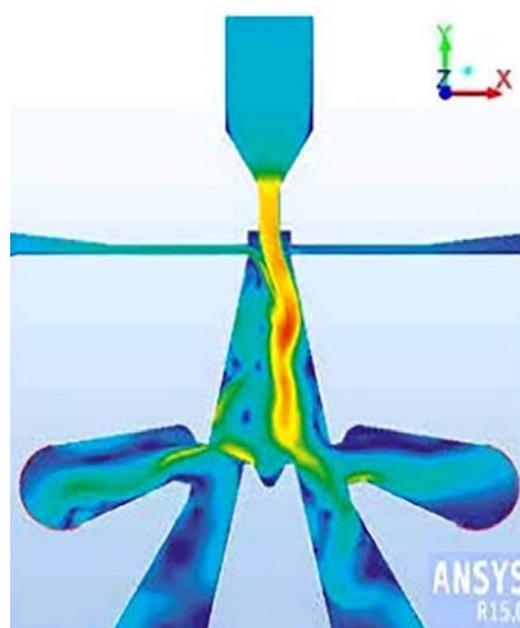


Рис. 8. Фрагмент переключения струи к правой стенке

и начальные пульсации давления в правом выходном канале. Под воздействием давления в левом управляющем канале струя окончательно переходит к правой стенке струйного элемента, то есть происходит переключение (рис. 8).

Анализируя цикл переключения струи в камере элемента, можно отметить, что:

- полученная картина переключения отличается от эмпирической (на основе метода

проб и ошибок). Ранее принималась модель переключения, в которой не было полной картины возникновения пульсаций давления в процессе переключения. Это является существенным моментом при учете возникновения ложных срабатываний элементов пневмоники;

- при повышенных частотах переключение струи происходит также под влиянием

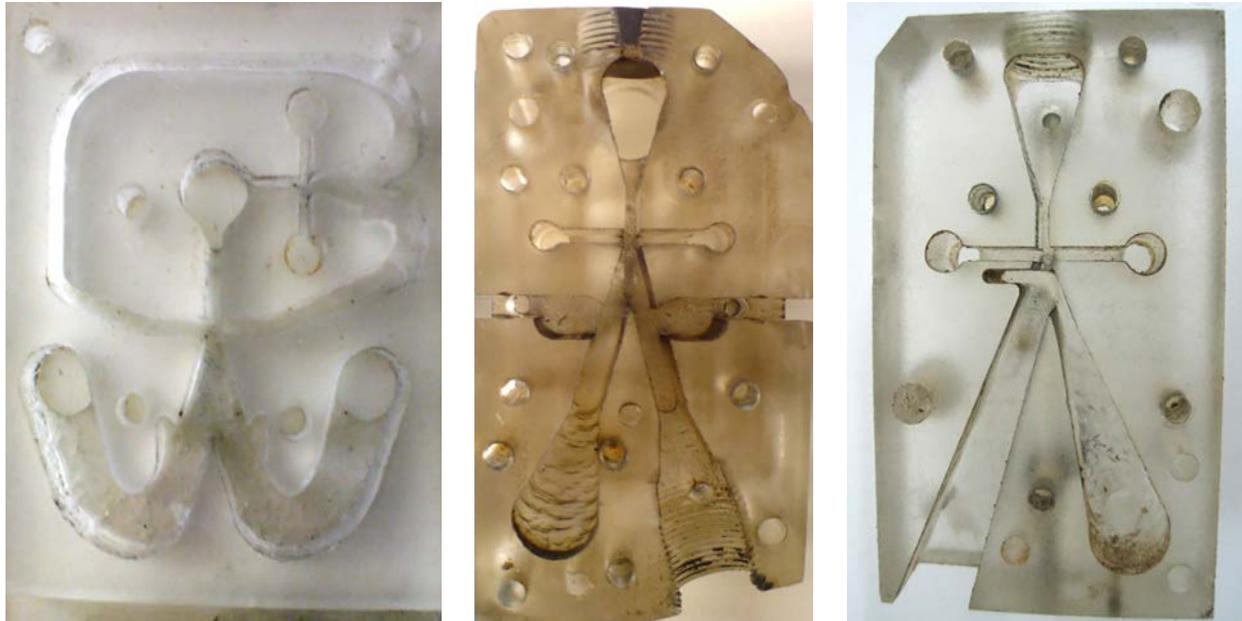


Рис. 9. Элементы, разработанные и изготовленные на основе моделирования:
а — логический управляющий элемент; *б* — силовой бистабильный элемент;
в — силовой моностабильный элемент-эжектор

Таблица 1. Зависимость расхода воздуха Q от давления питания $P_{\text{п}}$ с площадью поперечного сечения сопла питания элемента пневмоники $S_{\text{п}} = 34 \text{ мм}^2 (b \cdot h)$

$P_{\text{п}}$, кПа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$Q \cdot 10^{-4}, \text{ м}^3/\text{с}$	7,35	10,2	13,2	15,8	18,1	20,0	21,8	23,5	25,1	26,7	28,2	29,6	31,1	32,4	33,7

Таблица 2. Потребляемая мощность элемента $N_{\text{эп}}$ в зависимости от давления питания $P_{\text{п}}$

$P_{\text{п}}$, кПа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$N_{\text{эп}}$, Вт	0,7	2,5	4,0	6,3	9,0	12,0	15,2	18,8	22,6	26,7	31,1	35,6	40,4	45,4	50,6

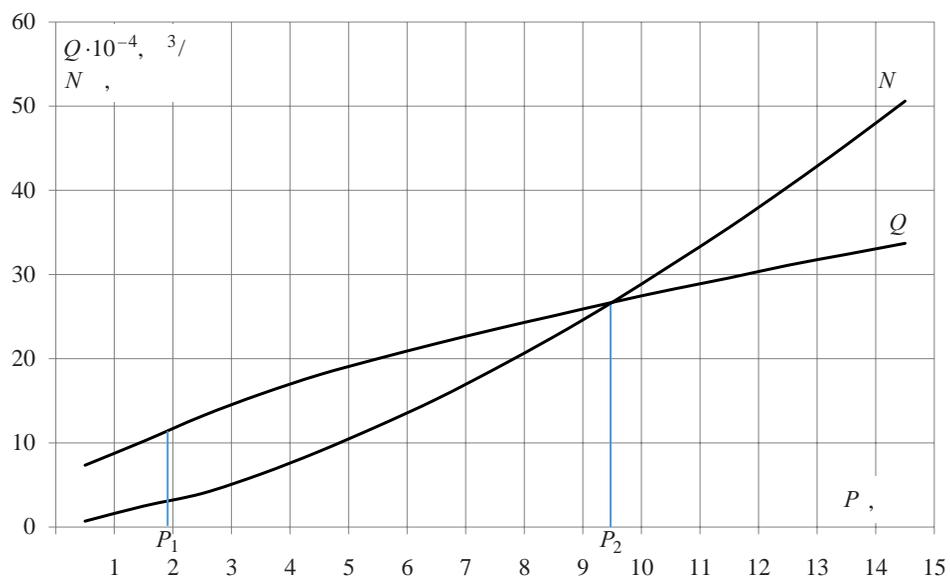


Рис. 10. Зависимость расхода воздуха Q и мощности $N_{\text{эп}}$ от давления питания $P_{\text{п}}$ при площади сечения сопла питания элемента $S_{\text{п}} = 34 \text{ мм}^2$



Рис. 11. Модуль системы автоматического управления на основе блока элементов пневмоники

выбросов расхода и давления, возникающих в выходных каналах элемента в процессе работы;

- определено, что фасонный рассекатель (углубление между выходными каналами, рис. 2, б) в силовых элементах не является обязательным. Это упрощает изготовление элементов.

Элементы пневмоники, разработанные и изготовленные на основе имитационного моделирования, представлены на рис. 9.

Результаты испытаний разработанного бистабильного элемента пневмоники представлены в табл. 1.

Потребляемая мощность элемента пневмоники:

$$N_{\text{эл}} = P_{\text{п}} \cdot Q, \text{ Вт.}$$

Полученные значения мощности для различных значений давления питания элемента пневмоники представлены в табл. 2.

Графические зависимости расхода питающего воздуха Q и мощности, потребляемой струйным элементом $N_{\text{эл}}$, в зависимости от давления питания $P_{\text{п}}$ представлены на рис. 10.

Исходя из характера зависимостей, представленных на рис. 10, можно сделать вывод, что диапазон давлений питания усовершен-



Рис. 12. Экспериментальные варианты исполнения управляющих и силовых элементов пневмоники

ствованного силового элемента пневмоники $P_1 - P_2 = 2,5 - 10$ кПа соответствует такому же диапазону для стандартных управляющих элементов пневмоники «Волга» [35, 36].

Вместе с управляющим элементом (рис. 9, а) силовой бистабильный элемент собирается в моноблок (рис. 11), после чего присоединяется к потребителю.

В настоящее время для применения транспортной отрасли далее разрабатываются и совершенствуются бистабильные элементы пневмоники на основе методологии, представленной в данной работе (рис. 12).

Для применения в трубопроводном транспорте также исследуется применение другого класса устройств струйной техники — вихревых клапанов [37–39].

Заключение

В процессе анализа методологии исследования элементов пневмоники установлено, что процессы взаимодействия газодинамических струй и потоков в них сложны и изучены недостаточно. Поэтому геометрические характеристики силовых элементов пневмоники, рассчитанные теоретически или выбранные

в соответствии с рекомендациями для управляющих элементов, не позволяют обеспечить достаточно качественную работу элемента. Это является одной из причин недостаточного применения элементов пневмоники в системах управления транспортом, а также разработки более эффективных конструкций элементов. Необходимо принимать во внимание гидродинамическое подобие и масштабные факторы, которые устанавливаются путем моделирования.

Полученная в результате имитационного моделирования картина аэродинамических потоков показывает, что необходима и возможна оптимизация геометрических параметров применяемых силовых элементов пневмоники. В процессе исследований в моделируемой картине газодинамических процессов в камере элемента при заданной ее геометрии выделены основные этапы переключения струи рабочего тела и распространения волн давления. Установлено, что важным параметром, который необходимо оптимизировать, является длина рабочей камеры элемента. Для улучшения процесса переключения необходимо и достаточно переключать только ядро струи, а не развитую расширенную струю с завихрениями, которая имеет эжекционные турбулентные составляющие.

По результатам имитационного моделирования выявлено возникновение пульсаций давления в выходных каналах. Вследствие этого процесс переключения может повторяться. Зафиксирован разрыв основной струи и возникновение вредных пульсаций давления. Это является еще одним источником ложных срабатываний элемента пневмоники.

В отличие от ранее представленных в различных работах результатов теоретических и экспериментальных исследований установлено, что наличие фасонного рассекателя для силовых элементов пневмоники не является обязательным. Это упрощает их изготовление.

Устранение негативных эффектов в работе элементов пневмоники позволило улучшить их характеристики, что расширит применение элементов в специализированных системах транспортной автоматики.

Перспективы дальнейших исследований связаны с повышением энергетической эффективности элементов пневмоники. Улучшить пока-

затели энергетической эффективности возможно использованием более совершенных способов передачи энергии в струйных устройствах. ▲

Библиографический список

1. Залманзон Л. А. Специализированные аэрогидродинамические системы автоматического управления / Л. А. Залманзон. — М.: Наука, 1978. — 464 с.
2. Семин Д. А. Влияние типа и размера расчетных сеток на точность расчета течений в вихрекамерных нагнетателях / Д. А. Семин, А. С. Роговой // Вісник НТУ «ХП». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. — 2016. — № 41(1213). — С. 70–77.
3. Роговой А. С. Особенности режимов работы вихрекамерных нагнетателей / А. С. Роговой // Вестник ХНАДУ. — 2016. — Вып. 75. — С. 120–128.
4. Левашов А. Н. Снижение потерь перекачиваемой среды в вихрекамерных нагнетателях / Д. А. Семин, А. Н. Левашов, Я. Н. Левашов и др. // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. — 2017. — № 4(6). — Ч. 2. — С. 196–199.
5. Левашов Я. Н. Экспериментальные исследования рабочих характеристик вихревых клапанов различных модификаций / Д. А. Семин, Я. Н. Левашов, А. Н. Левашов // Вестник Луганского Национального университета имени Владимира Даля. — 2019. — № 11(29). — С. 113–118.
6. Левашов Я. Н. Математическое и физическое моделирование течений в вихревых клапанах / Д. А. Семин, Я. Н. Левашов, А. Н. Левашов и др. // Вестник Луганского Национального университета имени Владимира Даля. — 2021. — № 6(48). — С. 199–203.
7. Акопов А. А. Струйные элементы в устройствах железнодорожной автоматики / А. А. Акопов, Е. Н. Розенберг, Г. И. Лобынцев // Автоматика, телемеханика и связь. — 1976. — № 7. — 48 с.
8. Gau L. P. Automobile application of fluidics / L. P. Gau // Fluidics Quarterly. — Vol. 3. — Iss. 2, April 1971.
9. Kawabata M. Automatic transmission control system / M. Kawabata. Pat. US № 3592083 cl. 74/868, appl. 07.07.1969, publ. 13.07.1971.
10. Мурзинов В. Л. Методы пневмоники в управлении струйными потоками в системах транспортирования на воздушной подушке / В. Л. Мурзинов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (КубГАУ). — 2011. — № 74(10). — С. 25–34.
11. Мурзинов В. Л. Снижение аэродинамического шума при реализации эффекта Коанда в пневматических конвейерах / В. Л. Мурзинов // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. — 2005. — № 1. — С. 33–35.
12. Левашов А. Н. Моделирование работы вихрекамерного нагнетателя в системах трубопроводного пневмотранспорта мелкодисперсных сыпучих грузов / Д. А. Семин, А. Н. Левашов, Я. Н. Левашов // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. — 2022. — № 4(58). — С. 239–245.
13. Romiti A. Fluidic-pneumatic antiskid system for cars / A. Romiti, G. Belforte // Preprints of the 2nd IFAC Symposium on Fluidics. IFAC Technical Committee on Components. Fluidics Quarterly. — 1974. — Vol. 6. — Iss. 1. — Pp. 73–77.

14. Tsuchiya K. Governor-type and inertia-type sensors of an anti-lock brake control system / K. Tsuchiya, S. Izawa, S. Kitazawa et al. // Papers of the 9th Fluidics Symposium, Hamamatsu, Japan, SICE, 1974. — Pp. 41–44.
15. Tsuchiya K. Anti-lock brake control system utilizing fluidic amplifiers / K. Tsuchiya, S. Kasagi, S. Izawa et al. // Fluidics Quarterly. — 1975. — Vol. 7. — Iss. 1. — Pp. 88–93.
16. Tsuchiya K. Anti-lock brake control system utilizing fluidic amplifiers / K. Tsuchiya, S. Kasagi, S. Izawa et al. // Papers of the 8th Fluidics Symposium, Okayama, Japan, SICE, 1973. — Pp. 24–28.
17. Касимов А. М. Развитие пневматических средств автоматизации / А. М. Касимов // Труды конференции «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» (Москва, октябрь 2010 г.). — С. 000640–000652.
18. Градецкий В. Г. Струйная пневмогидроавтоматика / В. Г. Градецкий, А. Д. Чудаков, В. И. Чернышев. — М.: Мир, 1966. — 382 с.
19. Лебедев И. В. Элементы струйной автоматики / И. В. Лебедев, С. Л. Трескунов, В. С. Яковенко. — М.: Машиностроение, 1973. — 360 с.
20. Lighthill M. J. Physiological fluid dynamics: a survey / M. J. Lighthill // Journal of Fluid Dynamics. — 1972. — Iss. 52(3). — Pp. 475–497. — DOI: 10.1017/S0022112072001557.
21. Shimizu S. Discrete-vortex simulation of a two-dimensional turbulent jet / S. Shimizu // Bulletin JSME. — 1986. — Vol. 29(254). — Pp. 2440–2446. — DOI: 10.1299/JSME1958.29.2440.
22. Балабанов А. В. Инструментальные средства компьютерного и физического моделирования для разработки интегральных струйных устройств / А. В. Балабанов, А. М. Касимов, А. Е. Артамонов и др. // Труды 15-й международной конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта», (CAD/CAM/PDM-2015). — М.: ИПУ РАН, 2015. — С. 83–86.
23. Чаплиц А. Д. Визуализация газовых потоков во внутренних каналах: методы и результаты экспериментальных исследований / А. Д. Чаплиц, А. И. Астапов: Нац. акад. наук Украины, Нац. космическое агентство Украины, Ин-т технической механики. — Днепрпетровск: Ин-т технической механики, 2007. — 209 с.
24. Chorin A. J. Numerical study of slightly viscous flow / A. J. Chorin // Journal of Fluid Mechanics. — 1973. — Vol. 57(4). — Pp. 785–796. — DOI: 10.1017/S0022112073002016.
25. Аулин В. В. Аналитическое определение характеристик силовых струйных элементов автоматизированных высевающих систем / В. В. Аулин, М. И. Черновол, А. А. Панков // Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. — 2018. — Vol. 9. — Iss. 3. — Pp. 33–38. — DOI: 10.31548/me2018.03.033.
26. Залманзон Л. А. Теория элементов пневмоники / Л. А. Залманзон. — М.: Наука, 1969. — 508 с.
27. Волков К. Н. Численное моделирование взаимодействия поперечной струи со сверхзвуковым потоком с использованием различных моделей турбулентности / К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, М. С. Яковчук // Прикладная механика и техническая физика. — 2015. — Т. 56. — № 5. — С. 64–75. — DOI: 10.15372/PMTF20150505.
28. Бурков Ю. Г. Моделирование процессов переключения струйного элемента / Ю. Г. Бурков, В. А. Горюнов, Д. А. Дудников и др. // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2015. — Т. 156. — № 1. — С. 48–52.
29. Дудников Д. А. Численный метод моделирования рабочего процесса струйного бистабильного элемента / Д. А. Дудников, А. Ю. Чулюнин, О. А. Пашков и др. // CADFEM Review. — 2014. — № 1. — С. 35–39.
30. Ильина Т. Е. Проектирование элемента струйной системы управления газостатическим подшипником / Т. Е. Ильина, Н. В. Продан // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2015. — Т. 15. — № 5. — С. 921–929.
31. Артамонов Е. И. Автоматизированное проектирование и изготовление устройств автоматики на элементах струйной техники / Е. И. Артамонов, А. М. Касимов, А. В. Балабанов и др. // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2013). Труды 13-й международной конференции ИПУ РАН. Москва, 15–17 октября 2013. — С. 36–40.
32. Чаплиц А. Д. Совершенствование метода визуализации газовых потоков во внутренних каналах технических устройств / А. Д. Чаплиц // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2012. — № 6/7(60). — С. 54–58. — DOI: 10.15587/1729-4061.2012.5562.
33. Булат П. В. Визуализация течений с сильными и слабыми газодинамическими разрывами в вычислительной газовой динамике / П. В. Булат, К. Н. Волков, М. С. Яковчук // Вычислительные методы и программирование. — 2016. — Т. 17. — С. 245–257. — DOI: 10.26089/NumMet.v17r323.
34. Волков К. Н. Методы и концепции визуализации вихревых течений в задачах вычислительной газовой динамики / К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, И. В. Тетерина и др. // Вычислительные методы и программирование. — 2016. — № 17. — С. 81–100. — DOI: 10.26089/NumMet.v17r109.
35. Кулешова Н. А. Атлас конструкций элементов схем пневмоавтоматики. Ч. 2. Элементы струйной системы «Волга» / Н. А. Кулешова, Ю. Д. Власов, И. С. Леладзе. — М.: Ротапринт МАДИ-ТУ, 1995. — 34 с.
36. Струйные логические элементы и устройства программного управления станками и промышленными роботами. Каталог. — М.: НИИмаш, 1979. — 71 с.
37. Роговой А. С. Применение вихрекамерных нагнетателей в гидро- и пневмотранспортных системах / А. С. Роговой // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування: збірник наукових праць. — 2016. — № 3(78). — С. 65–70.
38. Левашов А. Н. Совершенствование рабочих характеристик вихрекамерных нагнетателей для пневмотранспортных систем мелкодисперсных сыпучих грузов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А. Н. Левашов. — Луганск, 2022. — 22 с.
39. Левашов Я. Н. Повышение эффективности трубопроводных транспортных систем снижением энергозатрат на управление вихревой арматурой: автореф. дисс. канд. техн. наук / Я. Н. Левашов. — Луганск, 2022. — 22 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 4, pp. 342–354
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-04-342-354

Modeling and Experimental Research of Pneumatic Elements for Transportation Control Systems

Information about authors

Pankov A. A., Doctor in Engineering, Professor¹. E-mail: app.post@rambler.ru

Nechaev G. I., Doctor in Engineering, Professor¹. E-mail: logistikatt@mail.ru

Miroshnikov V. V., Doctor in Engineering, Head of the Department, Vice-Rector for Scientific and Educational Work². E-mail: prorectormv@mail.ru

Zaharchuk A. S., Doctor of Engineering, Professor³. E-mail: kaf_energo_sys@mail.ru

Budikov L. Ya., Doctor of Engineering, Professor⁴. E-mail: leonidbudikov@yandex.ru

Korobejnikov D. S., Postgraduate Student¹. E-mail: dimaktt@mail.ru

Mihajlova I. G., PhD Candidate¹. E-mail: tilinstitut@gmail.com

¹Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Department “Transport Technologies”, Lugansk

²Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Department “Devices”, Lugansk

³Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Department “Electrotechnical Power Consumption Systems”, Lugansk

⁴Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Department of Emergency Rescue Operations, Lugansk

Abstract: The article demonstrates that specialized devices play a significant role in transportation control systems, and they are developed based on the application of pneumatic elements (pneumatics). By using fluidic and other flow-based pneumatic elements and devices, it becomes possible, in certain cases, to perform automatic control functions in the most rational manner. In certain operating conditions, this method of control is the only feasible option, for example, where electronic control systems cannot operate. The analysis of the prospects for the use of control devices based on pneumatics has led to the conclusion that it is advisable to use them in automatic control systems for certain types of transportation. This is particularly relevant for hydro- and pneumatic transport, devices for moving on an air cushion, and mechanisms with aerohydrodynamic operating fluid. Due to the specific requirements imposed on control systems, besides standard elements, non-standard elements, particularly power aerohydrodynamic pneumatic components, should be employed. It has been determined that one of the reasons for the limited use of pneumatic components in specialized transportation control systems is the challenges in developing more effective designs for power elements. The processes of flow interaction in pneumatic components are complex and not sufficiently studied. This poses a problem when selecting the optimal geometry of components to achieve improved characteristics. To achieve this, it is necessary to replace empirical methods with their elements of randomness with methods that have a more substantial justification. Currently, an effective solution to this problem is possible through the use of simulation modeling of aerohydrodynamic flows using specialized software tools. Based on simulation modeling within the ANSYS Fluent software environment, the operational processes and aerodynamic flows in pneumatic power elements have been analyzed. As a result of the modeling, elements have been developed for use in transportation control systems. The developed elements have optimized dimensional, energy-related characteristics, and operational modes. The application of pneumatic elements obtained through modeling allows for the improvement of the technical and economic characteristics of specialized transportation control systems.

Keywords: pneumonics; specialized control systems; simulation modeling; pneumatic power element; flow interaction; switching process.

References

- Zalmanzon L. A. Spetsializirovannye aerogidrodinamicheskie sistemy avtomaticheskogo upravleniya [Specialized aerohydrodynamic automatic control systems]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 1978, 464 p. (In Russian)
- Semin D. A., Rogovoy A. S. Vliyanie tipa i razmera raschetnykh setok na tochnost' rascheta techeniy v vikhrekamernykh nagnetatelyakh [Influence of the type and size of computational grids on the accuracy of flow calculations in vortex chamber pumps]. *Visnyk NTU “KhPI”. Seriya: Gidravlichni mashyny ta hidroahregaty* [Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. Series: Hydraulic Machines and Hydroaggregates]. 2016, Iss. 41(1213), pp. 70–77. (In Ukrainian)
- Rogovoy A. S. Osobennosti rezhimov raboty vikhrekamernykh nagnetatelye [Features of the operation modes of vortex chamber pumps]. *Vestnik KhNADU* [Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University]. 2016, Iss. 75, pp. 120–128. (In Russian)
- Semin D. A., Levashov A. N., Levashov Ya. N. Snizhenie poter' perekachivaemoi sredy v vikhrekamernykh nagnetatelyakh [Reduction of losses of the pumped medium in vortex chamber pumps]. *Vestnik Luganskogo natsional'nogo universiteta imeni Vladimira Dalya* [Bulletin of Luhansk National University named after Vladimir Dahl]. 2017, Iss. 4(6), Part 2, pp. 196–199. (In Russian)
- Levashov Ya. N., Semin D. A., Levashov A. N. Eksperimental'nye issledovaniya rabochikh kharakteristik vikhrevykh klapaov razlichnykh modifikatsii [Experimental studies of the working characteristics of vortex valves of various modifications]. *Vestnik Luganskogo natsional'nogo universiteta imeni Vladimira Dalya* [Bulletin of Luhansk National University named after Vladimir Dahl]. 2019, Iss. 11(29), pp. 113–118. (In Russian)
- Levashov Ya. N., Semin D. A., Levashov A. N. Matematicheskoe i fizicheskoe modelirovanie techenii v vikhrevykh klapanakh [Mathematical and physical modeling of flows in vortex valves]. *Vestnik Luganskogo natsional'nogo universiteta imeni Vladimira Dalya* [Bulletin of Luhansk National University named after Vladimir Dahl]. 2021, Iss. 6(48), pp. 199–203. (In Russian)
- Akopov A. A., Rozenberg E. N., Lobintsev G. I. Struynnye elementy v ustroystvakh zheleznodorozhnoy avtomatiki [Jet elements in railway automation devices]. *Avtomatika, telemekhanika i svyaz'* [Automation, Remote Control and Communications]. 1976, Iss. 7, 48 p. (In Russian)
- Gau L. P. Automobile application of fluidics. *Fluidics Quarterly*. April 1971, vol. 3, Iss. 2.
- Kawabata M. Automatic transmission control system. Pat. US 3592083 cl. 74/868, appl. 07.07.1969, publ. 13.07.1971.
- Murzinov V. L. Metody pnevmoniki v upravlenii struynnymi potokami v sistemakh transportirovaniya na vozdukhnoy podushke [Pneumatic methods in controlling jet flows in air cushion transport systems]. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (KubGAU)* [Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University]. 2011, Iss. 74(10), pp. 25–34. (In Russian)
- Murzinov V. L. Snizhenie aerodinamicheskogo shuma pri realizatsii effekta Koanda v pnevmaticheskikh konveyerakh [Reduction of aerodynamic noise during the implementation of the Coanda effect in pneumatic conveyors]. *Nauchnyi vestnik VGASU. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Scientific Bulletin of VGASU. Construction and architecture]. 2005, Iss. 1, pp. 33–35. (In Russian)
- Levashov A. N., Semin D. A., Levashov Ya. N. Modelirovanie raboty vikhrekamernogo nagnetatelya v sistemakh truboprovodnogo pnevmotransporta melkodispersnykh sypuchikh gruzov [Modeling of the operation of a vortex chamber compressor in systems of pipeline pneumatic transport of finely dispersed bulk materials]. *Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Vladimira Dalya* [Bulletin of Luhansk National University named after Vladimir Dahl]. 2022, Iss. 4(58), pp. 239–245. (In Russian)

13. Romiti A., Belforte G. Fluidic-pneumatic antiskid system for cars. Preprints of the 2nd IFAC Symposium on Fluidics. IFAC Technical Committee on Components. Fluidics Quarterly, 1974, vol. 6, Iss. 1, pp. 73–77.
14. Tsuchiya K., Izawa S., Kitazawa S. et al. Governor-type and inertia-type sensors of an anti-lock brake control system. Papers of the 9th Fluidics Symposium, Hamamatsu, Japan, SICE, 1974, pp. 41–44.
15. Tsuchiya K., Kasagi S., Izawa S. et al. Anti-lock brake control system utilizing fluidic amplifiers. Fluidics Quarterly, 1975, vol. 7, Iss. 1, pp. 88–93.
16. Tsuchiya K., Kasagi S., Izawa S., et al. Anti-lock brake control system utilizing fluidic amplifiers. Papers of the 8th Fluidics Symposium, Okayama, Japan, SICE, 1973, pp. 24–28.
17. Kasimov A. M. *Razvitie pnevmaticheskikh sredstv avtomatizatsii. Trudy konferentsii "Tekhnicheskie i programnye sredstva sistem upravleniya, kontrolya i izmereniya"* [Development of pneumatic automation tools. Proceedings of the conference "Hardware and software for control, monitoring and measurement systems"]. Moscow, 2010, pp. 000640–000652. (In Russian)
18. Gradetsky V. G., Chudakov A. D., Chernyshev V. I. *Struynaya pnevmogidravtomatika* [Jet pneumatic-hydro automation]. Moscow: Mir Publ., 1966, 382 p. (In Russian)
19. Lebedev I. V., Treskunov S. L., Yakovenko V. S. *Elementy struinoi avtomatiki* [Elements of jet automation]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1973, 360 p. (In Russian)
20. Lighthill M. J. Physiological fluid dynamics: a survey. Journal of Fluid Dynamics, 1972, Iss. 52(3), pp. 475–497. DOI: 10.1017/S0022112072001557.
21. Shimizu S. Discrete-vortex simulation of a two-dimensional turbulent jet. Bulletin JSME, 1986, vol. 29(254), pp. 2440–2446. DOI: 10.1299/JSME1958.29.2440.
22. Balabanov A. V. *Instrumental'nye sredstva komp'yuternogo i fizicheskogo modelirovaniya dlya razrabotki integral'nykh struynykh ustroystv. Trudy 15-y mezhduarodnoy konferentsii "Sistemy proektirovaniya, tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva i upravleniya etapami zhiznennogo tsikla promyshlennogo produkta"* (CAD/CAM/PDM-2015) [Instrumental means of computer and physical modeling for the development of integral jet devices. Proceedings of the 15th international conference "Systems for design, technological preparation of production and management of stages of the life cycle of an industrial product" (CAD/CAM/PDM-2015)]. Moscow: IPU RAN Publ., 2015, pp. 83–86. (In Russian)
23. Chaplits A. D. *Vizualizatsiya gazovykh potokov vo vnutrennikh kanalakh: metody i rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy* [Visualization of gas flows in internal channels: methods and results of experimental studies]. Nat. akad. nauk Ukrainy, Nat. kosmicheskoe agentstvo Ukrainy, In-t tekhnicheskoy mekhaniki. Dnepropetrovsk: In-t tekhnicheskoy mekhaniki Publ., 2007, 209 p. (In Russian)
24. Chorin A. J. Numerical study of slightly viscous flow. Journal of Fluid Mechanics. 1973, vol. 57(4), pp. 785–796. DOI: 10.1017/S0022112073002016.
25. Aulin V. V. *Analiticheskoe opredelenie kharakteristik silovykh struynykh elementov avtomatizirovannykh vysevayushchikh sistem* [Analytical determination of the characteristics of power jet elements of automated sowing systems]. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. 2018, vol. 9, Iss. 3, pp. 33–38. DOI: 10.31548/me2018.03.033. (In Russian)
26. Zalmanzon L. A. *Teoriya elementov pnevmoniki* [Theory of pneumatic elements]. Moscow: Nauka Publ., 1969, 508 p. (In Russian)
27. Volkov K. N. Chislennoe modelirovanie vzaimodeystviya poperechnoy strui so sverkhzvukovym potokom s ispol'zovaniem razlichnykh modeley turbulentnosti [Numerical modeling of the interaction of a transverse jet with a supersonic flow using various turbulence models]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* [Applied Mechanics and Technical Physics]. 2015, vol. 56, Iss. 5, pp. 64–75. DOI: 10.15372/PMTF20150505. (In Russian)
28. Burkov Yu. G. Modelirovanie protsessov pereklyucheniya strunnogo elementa [Modeling of the switching processes of the jet element]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [News of the Volgograd State Technical University]. 2015, vol. 156, Iss. 1, pp. 48–52. (In Russian)
29. Dudnikov D. A. *Chislennyy metod modelirovaniya rabocheho protsessa strunnogo bistabil'nogo elementa* [Numerical method for modeling the working process of a jet bistable element]. CADFEM Review, 2014, Iss. 1, pp. 35–39. (In Russian)
30. Il'ina T. E. *Proektirovanie elementa struynoy sistemy upravleniya gazostaticheskim podshpivnikom* [Design of an element of a jet control system for a gas-static bearing]. *Nauchno-tekhnicheskyy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics]. 2015, vol. 15, Iss. 5, pp. 921–929. (In Russian)
31. Artamonov E. I. *Avtomatizirovannoe proektirovanie i izgotovlenie ustroystv avtomatiki na elementakh struynoy tekhniki. Sistemy proektirovaniya, tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva i upravleniya etapami zhiznennogo tsikla promyshlennogo produkta* (CAD/CAM/PDM-2013). *Trudy 13-y mezhduarodnoy konferentsii IPU RAN* [Automated design and manufacture of automation devices on jet technology elements. Systems for design, technological preparation of production and management of stages of the life cycle of an industrial product (CAD/CAM/PDM-2013). Proceedings of the 13th international conference of the IPU RAS]. Moscow, 15–17 October 2013, pp. 36–40. (In Russian)
32. Chaplits A. D. *Sovershenstvovanie metoda vizualizatsii gazovykh potokov vo vnutrennikh kanalakh tekhnicheskikh ustroystv* [Improving the method of visualizing gas flows in the internal channels of technical devices]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eastern European Journal of Advanced Technologies]. 2012, Iss. 6/7(60), pp. 54–58. (In Russian)
33. Bulat P. V., Volkov K. N., Yakovchuk M. S. *Vizualizatsiya techeniy s sil'nymi i slabymi gazodinamicheskimi razryvami v vychislitel'noy gazovoy dinamike* [Visualization of flows with strong and weak gas-dynamic discontinuities in computational gas dynamics]. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye* [Computational Mathematics and Mathematical Physics]. 2016, vol. 17, pp. 245–257. (In Russian)
34. Volkov K. N., Emelyanov V. N., Teterina I. V. et al. *Metody i konseptsii vizualizatsii vikhrevykh techeniy v zadachakh vychislitel'noy gazovoy dinamiki* [Methods and concepts of visualization of vortex flows in problems of computational gas dynamics]. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye* [Computational Mathematics and Mathematical Physics]. 2016, Iss. 17, pp. 81–100. (In Russian)
35. Kuleshova N. A., Vlasov Y. D., Leladze I. S. *Atlas konstruktivnykh elementov skhem pnevmoavtomatiki. Ch. 2. Elementy struynoy sistemy "Volga"* [Atlas of designs of elements of pneumatic automation circuits. Part 2. Elements of the jet system "Volga"]. Moscow: Rotaprint MADI-TU Publ.; 1995. 34 p. (In Russian)
36. *Struynnye logicheskiye elementy i ustroystva programmno upravleniya stankami i promyshlennymi robotami. Katalog* [Inkjet logic elements and software control devices for machine tools and industrial robots. Catalog]. Moscow: NII Mash Publ., 1979, 71 p. (In Russian)
37. Rogovoy A. S. *Primeneniye vikhrekamernykh nagnetateley v gidro- i pnevmotransportnykh sistemakh* [Application of vortex chamber blowers in hydraulic and pneumatic transport systems]. *Visnyk NTUU "KPI". Mashinobuduvannya: zbirnyk naukovykh prats'* [Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". Mechanical Engineering]. 2016, Iss. 3(78), pp. 65–70. (In Ukrainian)
38. Levashov A. N. *Sovershenstvovanie rabochikh kharakteristik vikhrekamernykh nagnetateley dlya pnevmotransportnykh sistem melkodispersnykh sypuchikh gruzov: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the performance of vortex chamber compressors for pneumatic transport systems of finely dispersed bulk materials: author's abstract of the thesis for the degree of candidate of technical sciences]. Lugansk, 2022, 22 p. (In Russian)
39. Levashov Y. N. *Povysheniye effektivnosti truboprovodnykh transportnykh sistem snizheniem energozatrat na upravleniye vikhrevoi armaturoy: avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Increasing the efficiency of pipeline transport systems by reducing energy costs for controlling vortex fittings: author's abstract of the thesis for the degree of candidate of technical sciences]. Lugansk, 2022, 22 p. (In Russian)

УДК 004.942:656.021.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОТЫ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

МИТРОХИН Максим Александрович, д-р техн. наук, профессор; e-mail: mmax83@mail.ru

АЛЯЕВ Александр Олегович, лаборант-исследователь; e-mail: alyaev-2003@mail.ru

ЛОБАНОВ Рамиль Ильясович, студент; e-mail: ramil_lobanov@mail.ru

КИРЬЯНОВ Владислав Евгеньевич, студент; e-mail: vlad.kiryanov.2019@mail.ru

Пензенский государственный университет, Кафедра «Вычислительная техника», Пенза

Целью настоящей статьи является проверка гипотезы о возможности эффективного моделирования дорожного трафика с использованием ограниченных наборов данных. Конкретно: исследование фокусируется на возможности моделирования потоков на перекрестках, основываясь исключительно на информации о движении транспорта в смежных участках дорожной инфраструктуры.

Одним из главных этапов разработки системы было исследование и выбор оптимального интервала усреднения данных о количестве транспортных средств, движущихся в модели. Этот выбор является основным, так как он непосредственно влияет на точность и эффективность работы системы. В процессе анализа различных вариантов интервалов усреднения была выявлена оптимальная конфигурация, которая обеспечивает наилучший баланс между точностью данных и эффективностью системы. На основе результатов моделирования был выбран оптимальный интервал усреднения данных.

В рамках этой цели основными задачами в данной работе являются: разработка программы автоматического запуска процесса моделирования при поступлении новых данных с камеры, проверка адекватности моделирования на примере одного конкретного перекрестка, а также проверка гипотезы относительно возможности эффективного моделирования перекрестков при использовании ограниченных объемов данных.

Разработанная система моделирования транспортных потоков представляет собой решение, которое базируется на использовании данных, получаемых с интеллектуальной камеры, для анализа и оптимизации движения транспортных средств. Эта система была создана в рамках исследовательского проекта, который имел своей основной целью оптимизацию процесса анализа транспортного потока в городских и дорожных условиях.

Разработанная модель обладает широким спектром потенциальных применений. Она может быть интегрирована в городское планирование с целью создания эффективных моделей дорожного движения, которые впоследствии могут быть использованы для эффективного управления дорожным движением и оптимизации дорожной инфраструктуры.

Ключевые слова: моделирование транспортных потоков; трафик; симулятор городской мобильности; интервал усреднения данных.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-04-355-367

▼ Введение

Рост городского населения и увеличение автотранспортного движения приводят к необходимости эффективного управления транспортной инфраструктурой и оптимизации городского движения. Важность эффективного управления транспортом становится все более очевидной, так как увеличение трафика может приводить к дорожным заторам, которые, в свою очередь, приводят к ухудшению экологической обстановки и экономическому ущербу из-за потери времени, опозданий.

Для выявления рациональных схем управления движением транспорта, анализа причин появления дорожных заторов и способов их

устранения широко применяется имитационное моделирование [1].

В исследованиях отечественных [2] и иностранных авторов [3] обозначена перспективность имитационного моделирования при работе с транспортными системами.

В работе [4] авторы отмечают высокую точность различных алгоритмов имитационного моделирования. В [5] отмечено, что модели симуляции дорожного движения могут стать отличным вариантом для оценки управления городским движением.

В исследовании Т. А. Кузнецова [6] по транспортному моделированию рассмотрена задача оптимизации времени действия зеленого

сигнала на светофорах у перекрестков. Используя имитационное моделирование, удалось оптимизировать параметры работы светофора, сократив время пребывания транспорта на перекрестке и уменьшив объем заторов.

В рамках изучения современных инструментов имитационного моделирования транспортных потоков авторы Ю. И. Захарова и Е. С. Карнауха [7] подтвердили значительное упрощение процесса изучения и контроля динамики транспортного потока средствами имитационного моделирования.

Немаловажным аспектом имитационного моделирования является его точность. В [8] предлагается инновационная структура калибровки имитационных моделей, обеспечивающая одновременную настройку эксплуатационных параметров и параметров безопасности, улучшая производительность модели и позволяя оценивать реальные дорожные конфликты.

В настоящее время на рынке представлены несколько программных продуктов, средствами которых можно моделировать трафик. Это *SUMO (Simulation of Urban Mobility)*, *Avenue 2.0*, *LISA+*, *INES+* и другие. Наиболее широкие возможности для моделирования трафика и интеграции с другими программными продуктами имеет *SUMO*. К достоинствам данной программы, по отношению к вышеперечисленным аналогам, можно отнести ее гибкость настроек и возможностей моделирования, реалистичность воспроизведения, а также распространение на бесплатной основе.

Одним из основных этапов моделирования является задание информации о параметрах трафика, в частности об интенсивности, если речь идет о воспроизведении функционирования реального участка дорожной сети. Информацию о трафике можно получать различными способами, такими как: датчики на дорогах, камеры наблюдения, данные GPS, индуктивные датчики, реагирующие на металлические объекты, такие как машины.

Рассматривая тему анализа технологий сбора данных о параметрах движения транспортных потоков в рамках научной работы, А. А. Ромашова [9] представила существенный анализ современных методов сбора информации о движении автотранспорта, приведя

достоинства и недостатки каждого метода подсчета.

Наиболее перспективным вариантом является использование интеллектуальных видеокамер, способных вести подсчет проезжающих транспортных средств по каждому из направлений движения. Один из вариантов такой камеры¹ работает в составе информационной системы² сбора и анализа данных о транспортных потоках. Такая система позволяет распознавать 13 типов транспортных средств, определять их скорость и направление движения, рассчитывать интенсивность транспортного потока в реальном времени. Данные системы предоставляются в формате: тип транспортного средства (ТС); позиция старта; позиция финиша; дата и время записи информации о проезде. Аналогичная система³ требует минимального вмешательства человека в процесс, а также способна распознавать транспортные средства на полосах движения. Существенным достоинством использования интеллектуальных камер является отсутствие необходимости проведения монтажных работ под дорожным полотном, как в случае с индуктивными датчиками, или установки датчиков непосредственно на транспортных средствах. Однако, несмотря на достоинства интеллектуальных видеокамер, в некоторых случаях возможность их установки может быть ограничена отсутствием подходящих инженерных конструкций, ограниченным обзором, невозможностью подведения электропитания или высокоскоростного интернета и т. д. В этом случае возникает ситуация неполноты исходных данных о транспортных потоках, необходимых для имитационного моделирования. Эта ситуация заключается в том, что для части участков дорожно-транспортной сети информация о транспортных потоках отсутствует ввиду невозможности установки средств сбора информации или сокращения затрат на установку в условиях ограниченных

¹Расчет транспортного потока на основе YOLOv5 и DeepSORT на базе Deepstream. — URL <https://habr.com/ru/articles/725916/>.

²SMART TRAFFIC SYSTEM. — URL <http://traffic.codeinside.ru/>.

³Интеллектуальная транспортная система. — URL: <https://neurocore.ru/blogs/traffic>.

муниципальных бюджетов. Особенно чувствительной к неполноте исходных данных является задача локального управления, например оптимизации светофорного регулирования на основе имитационного моделирования.

Цель данной статьи заключается в оценке адекватности имитационной модели транспортных потоков в условиях неполноты исходных данных. Более конкретно: исследование фокусируется на возможности создания имитационной модели транспортных потоков на перекрестках, используя информацию о движении транспорта в примыкающих элементах дорожной инфраструктуры. В качестве критерия адекватности предлагается использовать среднеквадратичную ошибку расхождения данных, получаемых с камер, и данных, получаемых из модели.

В процессе исследования решены следующие задачи: создана программа автоматической обработки и моделирования данных о движении транспорта с интеллектуальной камеры; проведена оценка адекватности моделирования транспортных потоков на заданном перекрестке в условиях наличия полной информации о движении транспорта; проведена оценка адекватности моделирования транспортных потоков на заданном перекрестке при ограниченных объемах данных.

1. Исходные данные для моделирования транспортных потоков

Исходными данными для моделирования являются данные, получаемые с камер в виде файла в формате CSV⁴, в котором каждый проезд транспортного средства (далее ТС) через перекресток представляет собой ячейку таблицы. В нем хранится информация о типе проезжающего ТС, позиции старта и финиша, а также времени пересечения перекрестка. Для примера показана часть файла, представленная в виде табл. 1.

На основе таких данных может быть построена модель, воспроизводящая реальный трафик на дороге, которая может быть использована для построения прогноза изменения планов работы светофорных объектов.

⁴ CSV — Comma-separated values.

Таблица 1. Формат предоставленных данных

Тип ТС	Позиция старта	Позиция финиша	Дата и время
car	down	up	2023-06-30T09:00
car	up	down	2023-06-30T09:00:01
bus	left	down	2023-06-30T09:00:05
truck	left	up	2023-06-30T09:00:06

Входными данными такой модели, построенной в программе SUMO, являются позиция старта и финиша, а также дата и время записи информации о проезде.

Для сбора данных о трафике применяется интеллектуальная камера, использующая нейросетевые алгоритмы для обнаружения и классификации ТС, фиксации времени и направления проезда перекрестка. Предлагаемая программа в автоматическом режиме обрабатывает полученные с камеры данные, осуществляет подготовку к запуску модели в программе SUMO (где происходит непосредственно моделирование) и проводит анализ результатов моделирования. Схема взаимодействия модулей программы приведена на рис. 1. Программа позволяет автоматически без участия человека запускать процесс моделирования при поступлении новых данных с камеры.

Согласно схеме, исходные данные о реальном трафике, полученные с интеллектуальной камеры, считываются функцией *CSVReader* из *CSV* файла. Далее удаляются повторяющиеся данные о проезде транспортных средств, и функция *CountData* подсчитывает количество ТС за определенное время.

При помощи функции *ChangeTimeInPeriod* случайным образом определяется время появления каждой машины в симуляции. Время рассчитывается с использованием формулы:

$$A = \frac{T}{N} S + \Delta t, \quad (1)$$

где A — итоговое время появления ТС в моделировании в секундах;

T — период усреднения данных;

N — количество ТС, проезжающих перекресток за период T ;

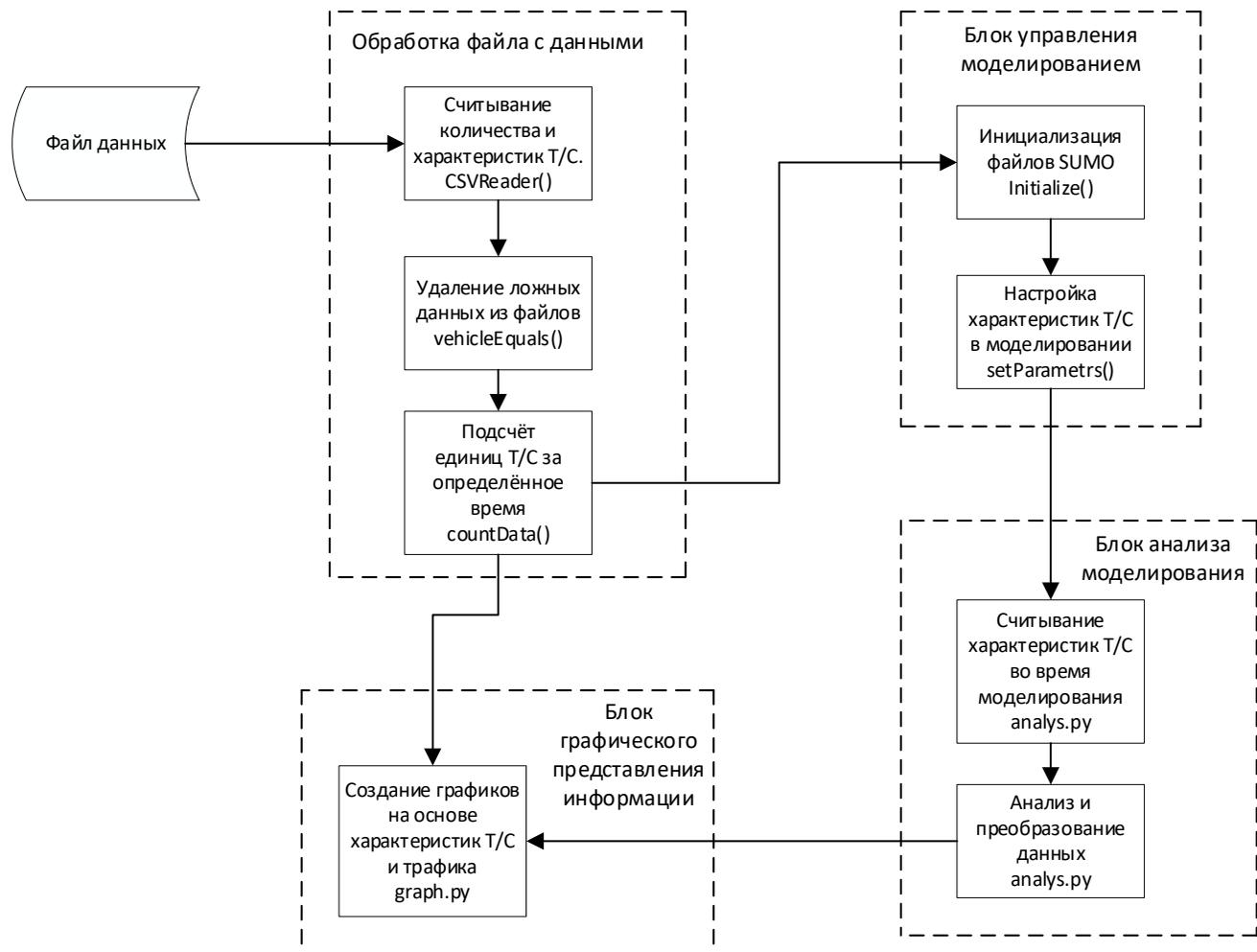


Рис. 1. Схема взаимодействия модулей

S — случайное число, подчиняющееся экспоненциальному [10] закону с параметром интенсивности $\lambda = 2,859$ 1/с;
 Δt — шаг моделирования;
 n — номер периода.

Параметр λ оценивается по текущим экспериментальным данным о транспортном потоке, получаемым с камеры, и может интерпретироваться как обратное среднее времени между появлением ТС [11]. Следовательно, оно может быть рассчитано как:

$$\lambda = \frac{1}{\delta}, \quad (2)$$

где δ — среднее время появления ТС в модели в секундах.

Далее определяется итоговое время появления ТС в симуляции путем суммирования

данных о рассчитанном случайном временном интервале и шаге моделирования.

Обработанные данные поступают в блок управления моделированием, где происходит настройка характеристик транспортных средств перед моделированием при помощи функции *setParams*, создание конфигурационных файлов для *SUMO* и вызов соответствующих команд для проведения моделирования при помощи функции *initialize*.

В процессе моделирования в программе осуществляются считывание и анализ таких основных характеристик как: скорость ТС, плотность и интенсивность движения.

У каждого транспортного средства в модели считывается текущая скорость, которая затем преобразуется в среднюю скорость движения транспортного потока. Она получается путем расчета среднего арифметического всех измеренных скоростей транспортных средств,



Рис. 2. Направления движения на перекрестке улиц Суворова — Володарского

находящихся в моделировании. Полученная таким образом средняя скорость потока является важным показателем эффективности транспортной системы. Она позволяет оценить общую скорость передвижения транспортных средств в заданной области и выявить возможные пробки или проблемные места на дорогах.

Важными аспектами симуляции в программе *SUMO* являются измерение плотности транспортного потока, как количества ТС, находящихся на дороге в единицу времени и определение интенсивности движения.

Обработанные данные поступают в блок графического представления информации, где происходит построение графиков зависимостей различных величин.

Таким образом, данная программа специализирована для работы с интеллектуальными камерами, что позволяет эффективно использовать данные с камер для имитационного моделирования транспортного потока на локальном участке дорожно-транспортной сети. Основное преимущество заключается в автоматизации процесса моделирования. Программа сама проводит все шаги: подготовку данных, запуск моделирования и обработку полученных статистических данных.

2. Моделирование одного перекрестка на основании реальных данных о трафике

Разработанную программу мы протестировали на примере перекрестка улиц

Суворова — Володарского города Пензы, что позволило установить соответствие ожидаемых и реальных данных.

Задание параметров транспортного потока в имитационной модели осуществляется на основе данных о его интенсивности. Оценка интенсивности производится путем подсчета количества ТС, проходящих через данное сечение дороги в единицу времени. Сечениями, на которых производится оценка, являются границы перекрестка. Для выбора временного интервала было проведено исследование.

В основе исследования лежит оценка схожести результатов моделирования реальным данным при различных интервалах оценки интенсивности дорожного движения для перекрестка, на котором установлена интеллектуальная камера [11], способная вести подсчет количества транспортных средств по направлениям движения, а также классифицировать 7 типов транспортных средств (рис. 2).

Схема перекрестка, представленного в модели, показана на рис. 3.

Выборка, состоящая из 7790 проездов машин, была использована для построения и оценки модели.

Результаты моделирования для различных интервалов оценивания приведены на графиках (рис. 4–6). На графике представлены две линии, отражающие общее количество ТС в модели. Сплошная линия показывает количество ТС, полученных по реальным данным, пунктирная — по результатам моделирования.

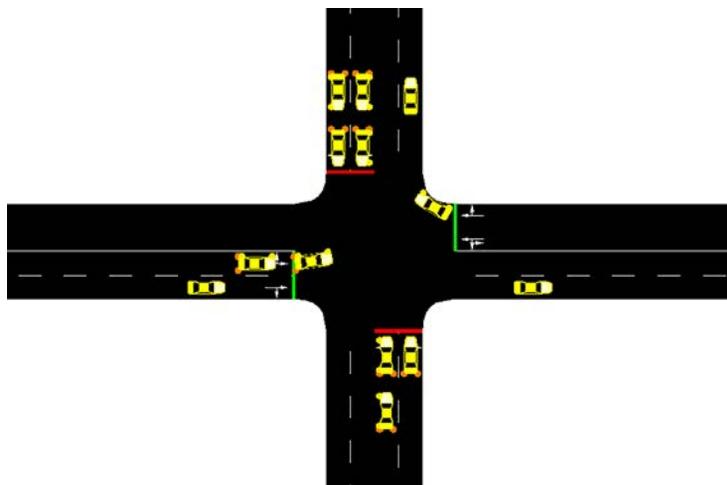


Рис. 3. Схема перекрестка

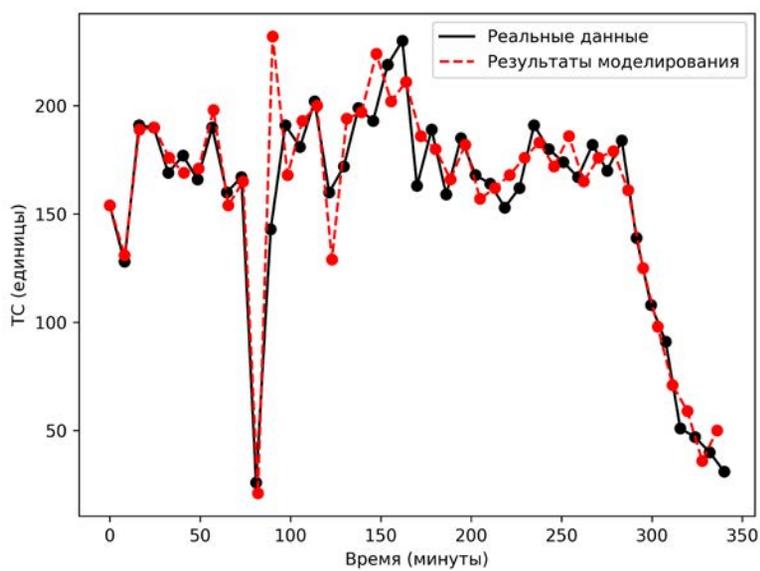


Рис. 4. Результаты моделирования для интервала оценивания 300 с

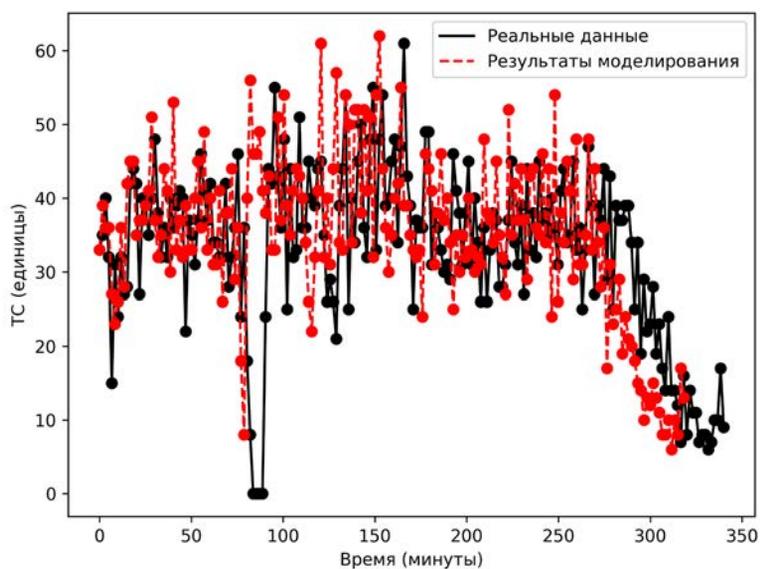


Рис. 5. Результаты моделирования для интервала оценивания 100 с

Можно сделать вывод, что при использовании слишком короткого интервала оценивания (100 с) график количества ТС, полученный в результате моделирования трафика, зашумляется из-за чувствительности к краткосрочным колебаниям в трафике. С другой стороны, при использовании слишком длинного интервала оценивания (1500 с) график становится слишком общим и не дает детального представления о потоке, что является важным для управления транспортным потоком на локальном участке дорожно-транспортной сети.

Для того чтобы выбрать наиболее подходящий интервал оценивания, предлагается использовать критерий корреляции Пирсона, рассчитывающийся по формуле [12]:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3)$$

где x_i — значение интенсивности для конкретного интервала, вычисленное для реального трафика;

\bar{x} — среднее значение интенсивности, вычисленное для реального трафика;

y_i — значение интенсивности для конкретного интервала, вычисленное для смоделированного трафика;

\bar{y} — среднее значение интенсивности, вычисленное для смоделированного трафика.

Результаты расчета коэффициента корреляции показаны на рис. 7.

По графику видно, что наибольшее значение коэффициента корреляции на уровне 0,996 соответствует длительности 480 с. Это значение выбирается для вычисления интенсивности в последующих симуляциях. При выбранном периоде получили следующий график количества машин, представленный на рис. 8.

Интервал усреднения не оказывает влияния на плотность трафика. Перенос рекомендованной продолжительности данного периода на другие конфигурации перекрестков подразумевает анализ схожести в динамических особенностях трафика. Подразумевается анализ средней интенсивности движения в качестве ключевого фактора при переносе

рекомендованной продолжительности периода на другие конфигурации перекрестков.

Для полученных данных была рассчитана среднеквадратичная ошибка между реальными и смоделированными данными. Она составила 4,79 ТС.

Также для проведенного эксперимента рассчитаем доверительный интервал и стандартную ошибку. Расчет будет производиться, используя преобразование Фишера. Формула преобразования Фишера выглядит следующим образом [13]:

$$Z = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r_{xy}}{1-r_{xy}}, \quad (4)$$

где Z — преобразованный коэффициент корреляции;

r_{xy} — исходный коэффициент корреляции. Таким образом, получаем $Z = 3,1063$.

Далее рассчитаем стандартную ошибку преобразованного коэффициента:

$$SE_Z = \frac{1}{\sqrt{n-3}}, \quad (5)$$

где n — количество наблюдений.

Получили стандартную ошибку $SE_Z = 0,1259$.

Для уровня доверительной вероятности $\gamma = 0,95$, принимаемой в большинстве инженерных расчетов [14], из соотношения $2\Phi(z_\gamma) = \gamma$ нашли коэффициент доверия z_γ , который равен 1,96.

Вычислили нижнюю и верхнюю границы интервала по формуле:

$$z_i = z \pm z_\gamma SE_z. \quad (6)$$

Получили верхнюю границу $z_1 = 3,345$ и нижнюю границу $z_2 = 2,855$.

Выполним обратные преобразования Фишера для возвращения размерности по формуле [13]:

$$r_i = \tanh(z_i). \quad (7)$$

Получили верхнюю границу $r_1 = 0,997$ и нижнюю границу $r_2 = 0,993$.

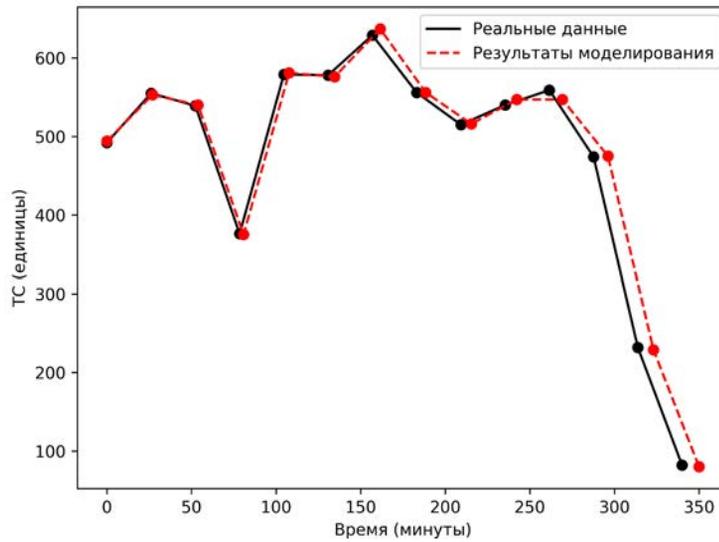


Рис. 6. Результаты моделирования для интервала оценивания 1500 с

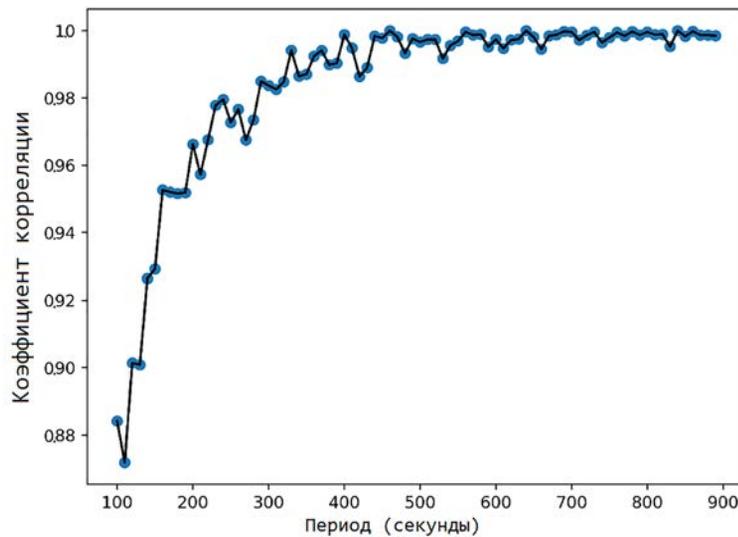


Рис. 7. График зависимости корреляции от длительности интервала оценивания

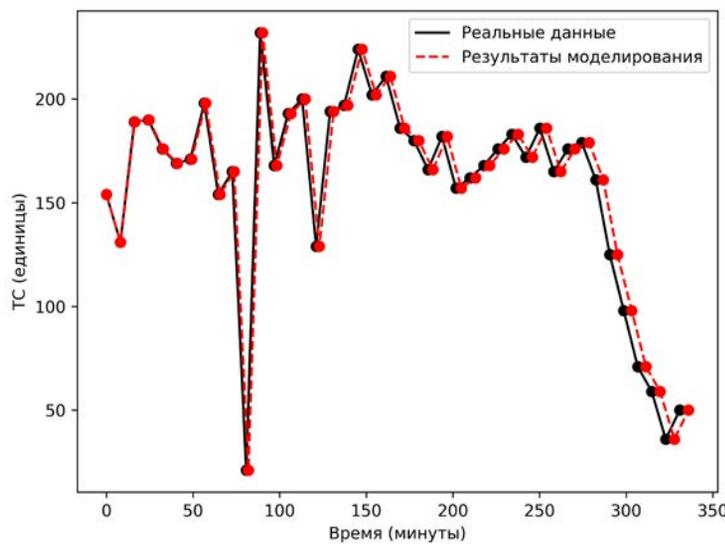


Рис. 8. Результаты моделирования для интервала оценивания 480 с

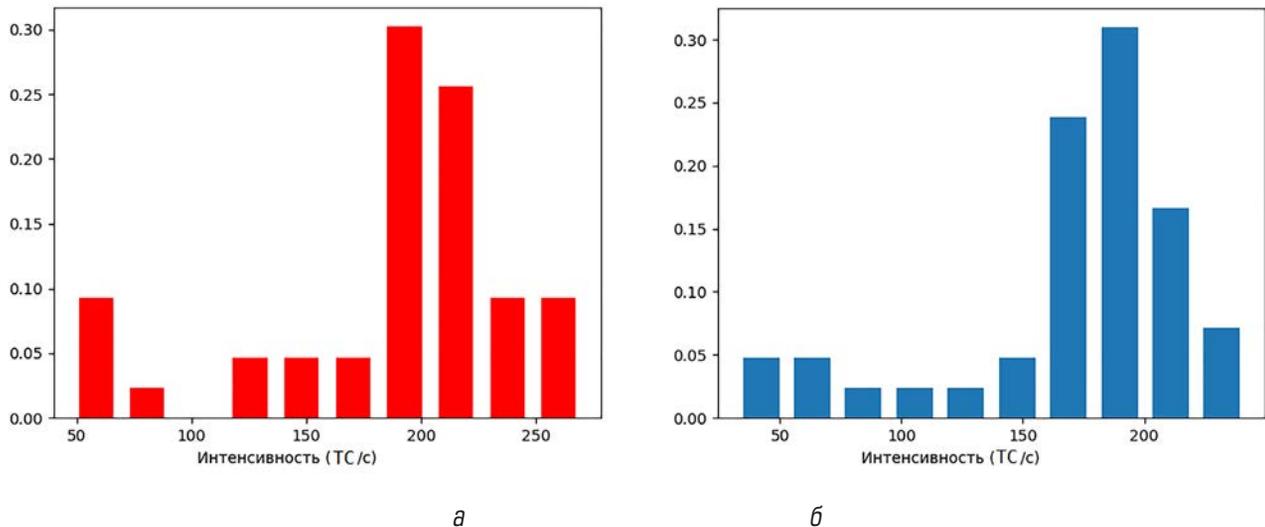


Рис. 9. Гистограммы интенсивности движения:

а — распределение интенсивности движения транспорта для интервала оценивания 480 с по реальным данным;
 б — распределение интенсивности движения транспорта для интервала оценивания 480 с по модельным данным

Таким образом, коэффициент корреляции $r = 0,996$ находится в пределах доверительного интервала ($r_1 < r < r_2$), это указывает на то, что данный коэффициент является статистически значимым на заданном уровне доверия.

На рис. 9, а показано распределение интенсивности движения транспорта для интервала оценивания 480 с по реальным данным, а на рис. 9, б — по модельным данным.

Для оценки различий между выборками интенсивностей, рассчитанных по реальным и смоделированным данным, использовался U -критерий Манна — Уитни, который подтвердил отсутствие статистически значимых различий на уровне значимости 0,1.

3. Моделирование на ограниченных наборах данных

Далее было проведено моделирование трафика для трех перекрестков на основании реальных данных о трафике через них. Это перекрестки улиц: Суворова — Плеханова, Суворова — Володарского и Суворова — Московская в г. Пензе.

В данном моделировании особое внимание уделяется возможности моделирования трафика, используя ограниченный набор данных. Смоделируем ситуацию, когда известен трафик только через два крайних перекрестка: Суворова — Плеханова и Суворова — Московская. Задача ставится как моделирование трафика

через третий перекресток по известным данным для двух других.

Данные для перекрестков представляют собой CSV-файл с записями о проездах транспортных средств в количестве 7487 строк для перекрестка Суворова — Московская; 13 846 строк для перекрестка Суворова — Плеханова и 13 845 строк для перекрестка Суворова — Володарского, где каждая строка представляет собой проезд машины по перекрестку. Низкий трафик на перекрестке улиц Володарского — Московская объясняется проведением ремонтно-восстановительных работ с последующим ограничением проезда на улице Московской.

При этом необходимо определить параметры распределения потока по направлениям на среднем перекрестке (Суворова — Володарского), основываясь на данных предварительного обследования. Мы используем метод расщепления потока, основанный на подсчете количества транспортных средств в каждом направлении в течение определенного периода времени. Затем мы вычисляем вероятность того, что транспортное средство повернет в определенном направлении, путем деления количества транспортных средств в данном направлении за указанный период на общее количество транспортных средств на перекрестке за этот период.

Схема перекрестка, реализованного в модели, представлена на рис. 10.

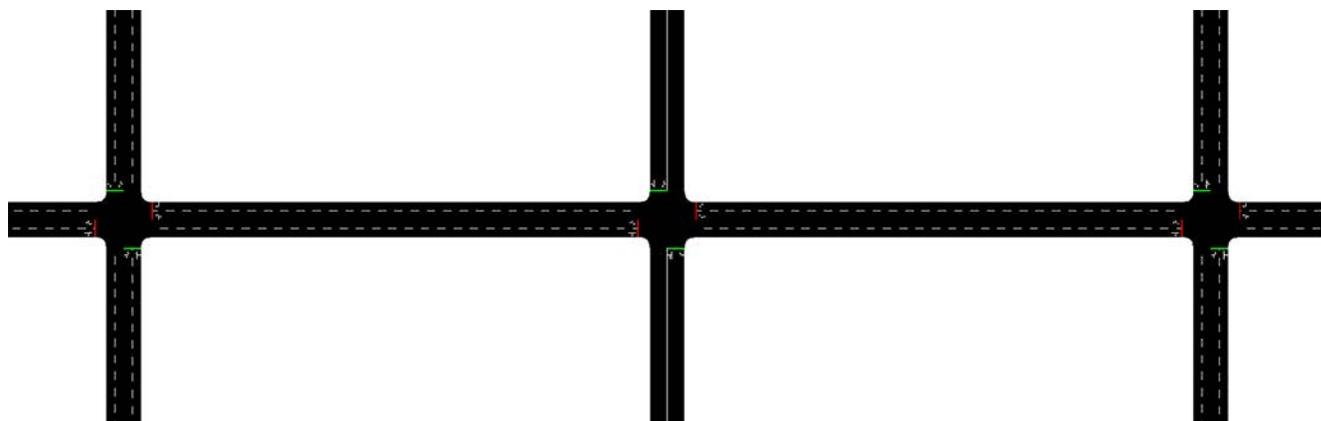


Рис. 10. Поле моделирования трех перекрестков

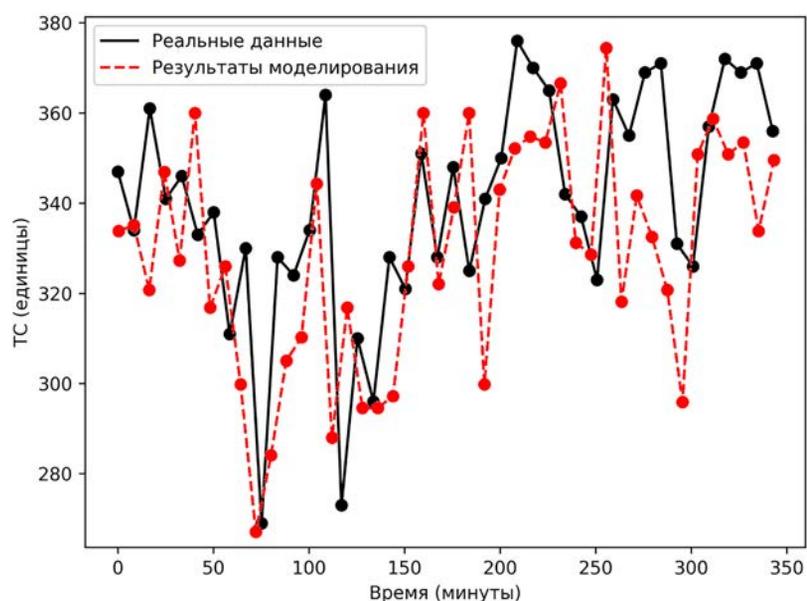


Рис. 11. Результаты моделирования на ограниченных наборах данных

При проведении моделирования с ограниченным объемом данных мы будем исключать информацию о движении на перекрестке улиц Володарского — Суворова из входного набора данных имитационной модели.

Для улицы Суворова данные о движении на перекрестке собираются с двух смежных перекрестков, в то время как в случае улицы Володарского мы предполагаем, что трафик схож с тем, что наблюдается на соседних улицах — Плеханова и Московской.

Практически все изучаемые перекрестки на улице Суворова проявили схожую динамику движения транспорта (в период с 9 до 15 ч количество проезжающих машин практически одинаково на всех перекрестках), что свидетельствует о стабильности движения в указанный

временной промежуток. На основании этой информации для моделирования на ограниченных наборах данных возьмем такой же период, как и при моделировании одного перекрестка.

Результаты моделирования на основе ограниченных наборов данных представлены на рис. 11. На графике сплошная линия показывает количество ТС, вычисленных по реальным данным, пунктирная линия — по результатам моделирования.

По результатам моделирования транспортных потоков через перекресток на ограниченных наборах данных среднеквадратичная ошибка для всего интервала моделирования составила 3,66 ТС, коэффициент корреляции между реальными и смоделированными данными r составил 0,7.

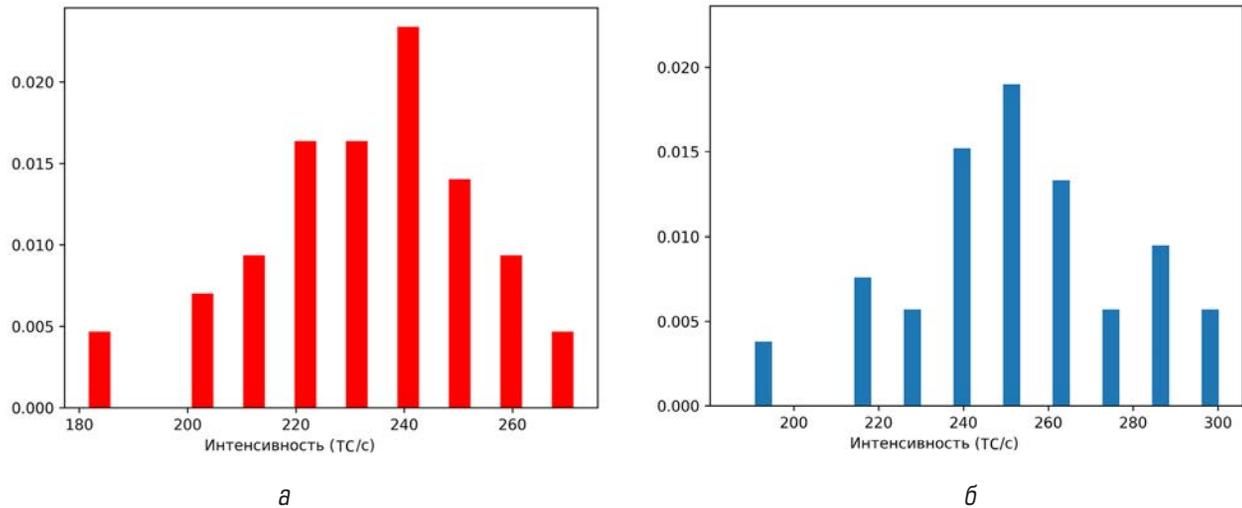


Рис. 12. Гистограммы интенсивности движения:
 а — распределение по реальным данным; б — по модельным данным

Также как и в случае с результатами моделирования одного перекрестка, применим преобразование Фишера к полученному коэффициенту корреляции, взяв в качестве доверительной вероятности $\gamma = 0,95$.

В результате вычислений получили доверительный интервал с верхней границей $r_1 = 0,824$, нижней границей $r_2 = 0,492$ и стандартную ошибку $SE_z = 0,162$.

Таким образом, коэффициент корреляции также находится в пределах доверительного интервала ($r_1 < r < r_2$), это указывает на то, что данный коэффициент является статистически значимым на заданном уровне доверия.

Также было проведено исследование распределения интенсивности движения транспорта для интервала оценивания 480 с. На рис. 12, а показано распределение по реальным данным, а на рис. 12, б — по модельным данным.

Для оценки различий между выборками интенсивностей, рассчитанных по реальным и смоделированным данным, также использовался U -критерий Манна — Уитни, который подтвердил отсутствие статистически значимых различий на уровне значимости 0,1.

4. Заключение

Основным научным результатом работы является модель, реализованная в виде программного комплекса, способного автоматически моделировать трафик без участия человека, обрабатывая данные, поступающие с

интеллектуальных камер, установленных на перекрестках.

В рамках проведенного исследования подтверждена возможность моделирования транспортных потоков в условиях неполноты исходных данных, а конкретно — возможность моделирования потоков на перекрестках, ориентируясь исключительно на информацию о движении транспорта в смежных областях.

Уместно подчеркнуть, что при моделировании конкретного перекрестка коэффициент корреляции достиг высоких 0,996, что указывает на значительную точность моделирования данного перекрестка.

Исследование подтверждает, что моделирование трафика на основе ограниченных данных в перспективе может стать инструментом в управлении транспортным движением. Среднеквадратичная ошибка моделирования в условиях неполных исходных данных составила 3,66 ТС, коэффициент корреляции между реальными и смоделированными данными составил 0,7, что соответствует средней степени совпадения результатов. Эти значения подтверждают умеренную точность модели, обеспечивая достаточное согласование между моделированием и фактическими данными.

В двух экспериментах коэффициенты корреляции находятся в диапазонах доверительных интервалов, что также говорит о достаточной сходимости результатов моделирования.

Результаты исследования имеют практическое значение с перспективой определения на модели оптимальных параметров управления транспортными потоками на локальных временных интервалах порядка нескольких десятков минут. Развитие модели планируется в направлении ее использования для создания адаптивных алгоритмов управления светофорными объектами на перекрестках. Этот шаг позволит повысить эффективность управления транспортной инфраструктурой к изменяющимся условиям дорожного движения.

Авторы благодарят ООО «КодИнсайд» за предоставленные данные и финансовую поддержку проведенного исследования. ▲

Библиографический список

1. Сальникова А. Д. Формирование системы транспортно-пересадочных узлов в городской агломерации / А. Д. Сальникова, А. В. Баните, Д. Г. Плотников и др. // Автоматика на транспорте. — 2023. — Т. 9. — № 1. — С. 87–98.
2. Макаров И. В. Совершенствование управления транспортными потоками города с использованием имитационного моделирования / И. В. Макаров, Р. Г. Хабибуллин, К. А. Шубенкова и др. // Материалы 4-й Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию ИММОД 2009. — СПб.: Дом ученых им. М. Горького. — 2009.
3. Shahrudin R. A. Controlling Traffic Congestion in Urbanised City: A Framework Using Agent-Based Modelling and Simulation Approach / R. A. Shahrudin, Md Yu. Misro // ISPRS Int. J. Geo-Inf. — 2023. — Iss. 12(6). — P. 226.
4. Alghamdi T. A. Comparative Study on Traffic Modeling Techniques for Predicting and Simulating Traffic Behavior / T. Alghamdi, S. Mostafi, G. Abdelkader et al. // Future Internet. — 2021. — Iss. 14. — P. 294.
5. Yedavalli P. Microsimulation analysis for network traffic assignment (MANTA) at metropolitan-scale for agile transportation planning / P. Yedavalli, K. Kumar, P. Waddell // Transportmetrica A: Transport Science. — 2021. — Pp. 1278–1299.
6. Кузнецов Т. А. Оптимизация движения транспортного потока на регулируемом перекрестке с использованием имитационного моделирования / Т. А. Кузнецов // Политехнический молодежный журнал. — 2022. — № 07(72).
7. Захаров Ю. И. Основные современные инструменты имитационного моделирования транспортных потоков / Ю. И. Захаров, Е. С. Карнаух // Вісник придніпровської державної академії будівництва та архітектури. — 2023. — С. 87–98.
8. Di Sh. Calibrating stochastic traffic simulation models for safety and operational measures based on vehicle conflict distributions obtained from aerial and traffic camera videos / Sh. Di, G. Jingqin, Y. Di et al. // Accident Analysis and Prevention. — 2023. — Iss. 179.
9. Ромашова А. А. Анализ технологий сбора данных о параметрах движения транспортных потоков / А. А. Ромашова // Форум молодых ученых. — 2021. — № 5(57). — С. 298–303.
10. Altshuler Ya. Augmented Betweenness Centrality for Mobility Prediction in Transportation Networks / Ya. Altshuler, R. Puzis, Yu. Elovici et al. // Finding Patterns of Human Behaviors in Network and Mobility Data. — 2011. — P. 671.
11. Ross S. M. Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists / S. M. Ross. — University of California, Berkeley. — 2004. — P. 179.
12. Rodgers J. L. Thirteen Ways to Look at the Correlation Coefficient / J. L. Rodgers, W. A. Nicewander // The American Statistician. — 1988. — Vol. 42. — Iss. 1. — Pp. 59–66.
13. Hotelling H. New Light on the Correlation Coefficient and its Transforms / H. Hotelling // Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological). — 1953. — Vol. 15(2). — Pp. 193–225.
14. Фишер П. А. Статистические методы для исследователей: монография / П. А. Фишер. — М.: Госстатиздат, 1958. — С. 42.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 4, pp. 355–367
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-04-355-367

Modeling of Local Traffic Flows under Conditions of Incomplete Initial Data

Information about authors

Mitrokhin M. A., Doctor of Engineering, Professor. E-mail: mmax83@mail.ru

Alyayev A. O., Research Assistant. E-mail: alyayev-2003@mail.ru

Lobanov R. I., Student. E-mail: ramil_lobanov@mail.ru

Kiryayev V. E., Student. E-mail: vlad.kiryayev.2019@mail.ru

Penza State University, "Computer Engineering" Department, Penza

Abstract: The main scientific result of the work is a model implemented in the form of a software package capable of automatically modeling traffic without human intervention, processing data coming from intelligent cameras installed at intersections.

Within the framework of the study, the possibility of modeling traffic flows in conditions of incompleteness of the initial data has been confirmed, and specifically, the possibility of modeling flows at intersections, focusing solely on information about traffic in related areas.

The study confirms that traffic modeling based on limited data in the future can become a tool of traffic management. The mean squared error of modeling under conditions of incomplete initial data is 3,66, the correlation coefficient between real and simulated data is 0,7, which corresponds to the average degree of coincidence of the results.

It is appropriate to emphasize that, when modeling a particular intersection, the correlation coefficient has reached 0,996, which indicates a significant accuracy in modeling this intersection.

In two experiments, the correlation coefficients are in the ranges of confidence intervals, which also indicates sufficient convergence of the simulation results.

The results of the study are of practical importance with the prospect of determining the optimal parameters of traffic flow control on the model at local time intervals of approximately several tens of minutes. The development of the model is planned in the

direction of its use to create adaptive algorithms for controlling traffic light objects at intersections. This step will improve the efficiency of transport infrastructure management to changing traffic conditions.

Keywords: modeling of traffic flows; traffic; Simulation of Urban Mobility; data averaging interval.

References

1. Sal'nikova A. D., Banite A. V., Plotnikov D. G. Formirovanie sistemy transportno-perevadochnykh uzlov v gorodskoy aglomeratsii [Formation of a system of transport hubs in the urban agglomeration]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2023, vol. 9, Iss. 1, pp. 87–98. (In Russian)
2. Makarov I. V., Khabibullin R. G., Shubenkova K. A. et al. Sovershenstvovanie upravleniya transportnymi potokami goroda s ispol'zovaniem imitatsionnogo modelirovaniya [Improving the management of city traffic flows using simulation modeling]. *Materialy 4-y Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii po imitatsionnomu modelirovaniyu IMMOD 2009* [Materials of the 4th All-Russian Scientific and Practical Conference on Simulation modeling IMMOD 2009]. St. Petersburg: Dom uchenykh im. M. Gor'kogo Publ., 2009. (In Russian)
3. Shaharuddin R. A., Misro Md Yu. Controlling Traffic Congestion in Urbanised City: A Framework Using Agent-Based Modelling and Simulation Approach. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 2023, Iss. 12(6), p. 226.
4. Alghamdi T. A., Mostafi S., Abdelkader G. et al. Comparative Study on Traffic Modeling Techniques for Predicting and Simulating Traffic Behavior. *Future Internet*, 2021, Iss. 14, p. 294.
5. Yedavalli P., Kumar K., Waddell P. Microsimulation analysis for network traffic assignment (MANTA) at metropolitan-scale for agile transportation planning. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2021, pp. 1278–1299.
6. Kuznetsov T. A. Optimizatsiya dvizheniya transportnogo potoka na reguliruemom perekrestke s ispol'zovaniem imitatsionnogo modelirovaniya [Optimization of traffic flow at a controlled intersection using simulation modeling]. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Polytechnic youth magazine]. 2022, Iss. 07(72). (In Russian)
7. Zakharov Yu. I., Karnaukh E. S. Osnovnye sovremennye instrumenty imitatsionnogo modelirovaniya transportnykh potokov [Basic modern tools for simulation modeling of transport flows]. *Visnik pridniprovs'koi derzhavnoi akademii budivnitstva ta arkhitekturi* [Bulletin of the Dnieper State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2023, pp. 87–98. (In Russian)
8. Di Sh., Jingqin G., Di Y. et al. Calibrating stochastic traffic simulation models for safety and operational measures based on vehicle conflict distributions obtained from aerial and traffic camera videos. *Accident Analysis and Prevention*, 2023, Iss. 179.
9. Romashova A. A. Analiz tekhnologiy sbora dannykh o parametrah dvizheniya transportnykh potokov [Analysis of technologies for collecting data on the parameters of traffic flows]. *Forum molodykh uchenykh* [Forum of young scientists]. 2021, Iss. 5(57), pp. 298–303. (In Russian)
10. Altshuler Ya., Puzis R., Elovici Yu. et al. Augmented Betweenness Centrality for Mobility Prediction in Transportation Networks. *Finding Patterns of Human Behaviors in Network and Mobility Data*, 2011, p. 671.
11. Ross S. M. *Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists*. University of California, Berkeley, 2004, p. 179.
12. Rodgers J. L., Nicewander W. A. Thirteen Ways to Look at the Correlation Coefficient. *The American Statistician*, 1988, vol. 42, Iss. 1, pp. 59–66.
13. Hotelling H. New Light on the Correlation Coefficient and its Transforms. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*, 1953, vol. 15(2), pp. 193–225.
14. Fisher R. A. *Statisticheskie metody dlya issledovateley: monografiya* [Statistical methods for researchers: monograph]. Moscow: Gosstatizdat Publ., 1958, p. 42. (In Russian)

УДК 519.876.5

ЛОГИКО-ВРЕМЕННАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

БЕЛИШКИНА Татьяна Алексеевна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: belishkina@mail.ru
КОНСТАНТИНОВА Татьяна Юрьевна, канд. техн. наук, доцент кафедры; e-mail: at-tanya@mail.ru
ЛЫКОВ Андрей Александрович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: bastdrew@mail.ru
МАРКОВ Дмитрий Спиридонович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: MDS1945@yandex.ru
МИКАДО Елена Николаевна, заведующий лабораторией кафедры; e-mail: mikadowork@yandex.ru
СОКОЛОВ Вадим Борисович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: SVB9@yandex.ru

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

Целью статьи является изложение результатов разработки метода формализации имитационных моделей систем железнодорожной автоматики и телемеханики как систем массового обслуживания с жестко регламентированной последовательностью использования обслуживаемых устройств в процессе обработки потоков заявок различных типов. Для программной реализации имитационных моделей с такими свойствами традиционно используется инструментальное средство GPSS World. Предложена логико-временная формализация, и сформулирована концепция предложенной формализации имитационных моделей, основными положениями которой являются: тип заявки определяется только составом и последовательностью занятия и освобождения обслуживаемых устройств; использование параметров транзактов для организации их многофазной обработки по каждому типу заявки; проверка значения булевых функций по каждому процессу обработки заявки каждого типа; регламентное время в процессе обработки заявок рассматривается как одно из множества логических условий булевых функций; логическое и параметрическое описание моделируемой системы должно выполняться на уровне исходных данных без изменения текста моделирующей программы. Определены объекты GPSS World, достаточные для реализации данной концепции. С использованием выбранных объектов составлен алфавит, и в полученном алфавите разработаны логические схемы моделирующих алгоритмов в качестве демонстрации применения логико-временной концепции формализации имитационных моделей сложных систем массового обслуживания. Разработана GPSS-программа, позволившая подтвердить возможность и целесообразность использования предложенного метода формализации имитационных моделей систем железнодорожной автоматики с жесткой структурой.

Ключевые слова: системы железнодорожной автоматики и телемеханики; системы массового обслуживания с жесткой структурой; имитационная модель; булевы функции; формализация моделей; логические схемы алгоритмов.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-04-368-376

▼ Введение

Железнодорожная автоматика и телемеханика (ЖАТ) включает широкий спектр разнообразных по назначению и технической реализации устройств и систем. По сфере применения целесообразно выделить два класса систем:

- 1) собственно системы железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ), которые по ГОСТ Р 53431—2009¹ определяются следующим образом: совокупность

технических средств, обеспечивающая контроль и управление с установленным уровнем безопасности движения стационарными путевыми и подвижными объектами железнодорожного транспорта;

- 2) системы обеспечения жизненного цикла (СОЖЦ) СЖАТ.

В ГОСТ Р 53431—2009 приведены определения и фактически довольно полная классификация устройств и систем железнодорожной автоматики.

В то же время терминология по СОЖЦ СЖАТ в системном виде, как составляющей

¹ ГОСТ Р 53431—2009. Автоматика и телемеханика железнодорожная. Термины и определения.

ЖАТ, пока не сформулирована в нормативных документах. К СОЖЦ СЖАТ относятся: система доказательств безопасности и сертификации СЖАТ на безопасность; системы автоматизированного проектирования и электронного документооборота технической документации; системы диспетчерского контроля и на их основе технической диагностики и удаленного мониторинга технического состояния устройств ЖАТ; системы автоматизированного управления службой сигнализации, централизации и блокировки (АСУ-Ш-2); системы технической эксплуатации СЖАТ. Далее СЖАТ и СОЖЦ, если нет необходимости указывать различия, определяются как СЖАТ.

Приведенные положения в данной работе не направлены на постановку задач разработки понятийного аппарата по СОЖЦ СЖАТ, но позволяют очертить предметную область СЖАТ как объектов моделирования. Авторами в более ранних работах [1–4] и в данной статье рассматриваются методы формализации имитационных моделей (ИМ) системного уровня.

В [1, 5, 6] относительно СЖАТ как объектов моделирования для поддержки принятия системотехнических решений сформулированы следующие основные положения:

- 1) системное моделирование СЖАТ необходимо выполнять на основе процессного дискретно-событийного подхода;
- 2) дискретно-событийный подход реализуется по математической схеме массового обслуживания, причем СЖАТ рассматриваются как сложные системы массового обслуживания (ССМО) [1, 7];
- 3) формализация ИМ и всего процесса имитационного моделирования от постановки задач до формулирования рекомендаций по системотехническим решениям имеет определяющее значение в преодолении самых существенных недостатков методологии имитационного моделирования, а именно субъективности результатов и высоких затрат времени на разработку ИМ и проведение серий имитационных экспериментов (СИЭ);
- 4) повышение за счет формализации процедур синтеза ИМ объективности,

семантической и статистической достоверности, полноты и своевременности получаемой в результате имитационных исследований информации;

- 5) формализация синтеза ИМ СЖАТ, в зависимости от свойств системы, выполняется либо по функционально-алгоритмическому, либо по структурному описанию СЖАТ.

Формализацию по функционально-алгоритмическому описанию системы [2, 4, 8] целесообразно выполнять для систем организационно-технологического типа, например АСУ-Ш-2. В таких системах при изменениях организационной структуры более устойчивыми к изменениям являются совокупность и порядок выполнения функций.

Формализация синтеза ИМ СЖАТ на основе структурного или морфологического подхода целесообразна для систем с жесткой структурой, в которых определяющей является аппаратно-программная составляющая, например, системы микропроцессорной электрической и диспетчерской централизаций. При этом под жесткой структурой СЖАТ как ССМО понимается однозначная привязка функциональных модулей, устройств и подсистем как обслуживаемых устройств (ОУ) к соответствующим подмножествам выполняемых операций по обработке поступающих в систему заявок, например команд от операторов, сигналов от напольного оборудования и смежных систем и т. п.

В [3, 9] предложен морфологический подход для формализации ИМ, основанный на системе паспортов ОУ, в каждый из которых записывается на уровне исходных данных информация о выполняемых данным элементом операциях по типам заявок и жестких или условных связях с другими элементами системы или ее входами. Такой подход является универсальным по отношению к составу устройств, подмножеству выполняемых каждым устройством операций, количеству и разнообразию видов связей между элементами и входами системы. Однако достигнутая универсальность естественным образом влечет за собой избыточность используемых средств моделирования (паспортов) и затрат времени

на разработку ИМ СЖАТ при достаточности по структуре системы и решаемым задачам более простых средств моделирования.

1. Логико-временная формализация ИМ СЖАТ

В данной работе рассмотрен менее универсальный, но и менее затратный морфологический подход, а именно логико-временная формализация (ЛВФ) ИМ ССМО с жесткой структурой при неизменной (в процессе обработки заявок) последовательности занятия и освобождения ОУ с логическим контролем доступности процесса обслуживания в целом и отдельных устройств. Например, заявка на установку и использование маршрута в системе электрической централизации. Формализация выполняется на основе предложенной в [1] обобщенной формализованной схемы (ОФС) СЖАТ как ССМО, включающей:

- модель внешней среды в виде потока заявок различного типа на обслуживание в ССМО;
- структурно-алгоритмическое описание системы и процесса обслуживания заявок;
- параметрическое описание, включающее вероятностно-временные характеристики потоков заявок и процесса обслуживания заявок.

ОФС для систем с жесткой структурой и заданной последовательностью использования ОУ адаптируется как ЛВФ следующим образом.

Формализованная схема внешней среды представляется моделью потоков заявок V_T различного типа в систему S :

$$V_T = [H; F(\tau); Ph_j(t); C_j^{bx}],$$

где H — множество заявок различного типа hj ; $j = \overline{1, J}$, обслуживаемых системой S ;

$F(\tau_0)$ — характеристика времени поступления заявок множества H в систему S ;

Ph_j — вероятность поступления в систему заявки j -го типа;

C_j^{bx} — идентификаторы устройств S , начинающих обслуживание заявок j -го типа.

Морфологическая формализация исследуемой системы как ССМО:

$$S = \{E; E_j; BV_j; F(\tau)e_n\},$$

где E — множество элементов e_n , $n = \overline{1, N}$, рассматриваемых в конкретном исследовании;

E_j — подмножество устройств, используемых в заданной последовательности при обработке заявки j -го типа;

BV_j — булева функция оценки доступности процесса обработки заявки j -го типа;

$F(\tau)e_n$ — характеристика времени обработки заявки j -го типа n -ым устройством.

2. Концепция синтеза ИМ СЖАТ по ЛВФ

Приведенные во введении положения и сформулированная выше ЛВФ позволяют предложить следующую концепцию синтеза ИМ СЖАТ.

1. Настройка ИМ на конкретную систему должна выполняться в соответствии с ЛВФ на уровне исходных данных вводом следующей информации: Ej с указанием последовательности использования ОУ e_n , вероятностно-временных характеристик потока заявок $F(\tau_0)$, Ph_j и процесса их обработки $F(\tau)e_n$, булевых функций BV_j .
2. Тип заявки hj определяется только подмножеством Ej и последовательностью устройств e_n , используемых в процессе обработки заявки, что в совокупности J заявок полностью отображает структуру моделируемой системы.
3. Модели двух и многопозиционных элементов (например, стрелки, светофоры, шлагбаумы) e_n должны приводиться в исходное состояние до начала моделирования и управляться в соответствии с планом в процессе выполнения ИЭ.
4. Доступность процесса обработки заявок должна оцениваться не только по состоянию «свободно/занято» ОУ, но и по значениям подмножеств логических условий, в том числе и с учетом состояний двух и многопозиционных объектов, сопоставленных заявкам каждого типа.
5. Изменение состава или последовательности использования ОУ возможно только при моделировании отказов элементов системы, включая изменение состояния двух или многопозиционных объектов.

Такой подход приводит к построению логической, асинхронной, событийной модели. Традиционно [1–3] для системного моделирования СЖАТ используется транзактная, процессная, дискретно-событийная инструментальная среда GPSS World [10–12]. Для реализации предложенной концепции синтеза ЛВФ ИМ используются следующие объекты GPSS World [13]:

- транзакты Tr_j , отображающие объекты-заявки hj различного типа $j = \overline{1, J}$, образующие потоки с интенсивностями λ_j , обрабатываемые в СЖАТ;
- матрица $MX\$VHVREM$ вероятностно-временных параметров $F(\tau_0)$ обобщенного

$$\text{отока заявок } h_0 \text{ с интенсивностью } \lambda_0 = \sum_{i=1}^I \lambda_i;$$

- аппаратные средства: логические ключи, одноканальные устройства памяти используются для моделирования различных элементов $e_n, n = 1, N$ системы;
- непрерывная функция $FN\$INTO$ распределения интервалов времени τ_0 обобщенного потока h_0 с интенсивностью λ_0 ;
- дискретная функция $FN\$TYP1$ розыгрыша типа заявки j по схеме полной группы независимых событий в соответствии со значениями Ph_j ;
- матрица $MX\$HUSTR$ записанных по строкам (номер строки соответствует типу заявки j) идентификаторов ОУ (элементы e_n), обеспечивающих многофазную обработку заявок по типу j ;
- матрица $MX\$VREMOU$ вероятностно-временных параметров выполнения операции j -ой заявки n -ым ОУ;
- непрерывная функция $FX\$VREMOU$ распределения времени выполнения операции j -ой заявки n -ым ОУ $F(\tau)e_n$;
- булевы переменные BVj (функции), аргументами которых являются состояния двух и многопозиционных объектов, ОУ, временных ограничений, обеспечивающих оценку возможности выполнения операций по обработке заявок в СЖАТ;
- список пользователя GPZ в качестве накопителя подмножеств заявок hj каждого типа, обеспечивающий организацию генератора потока заявок

в ЛВФ ИМ при сокращении затрат машинного времени на выполнение ИЭ.

ЛВФ, предложенная концепция и выбранные для синтеза ИМ объекты GPSS World позволили использовать для моделирования СЖАТ по морфологическому описанию параметры транзактов. Следует отметить, что непосредственно запись информации в параметры транзактов без запуска объекта GPSS «Процесс моделирования» на выполнение не допускается. В соответствии с этим предложена следующая технология построения генератора потоков заявок (ГПЗ) с одновременной записью информации о структуре системы в параметры T_{pj} :

- 1) информация о последовательности занимаемых ОУ транзактом J -го типа вводится в объект GPSS-модель в элементы матрицы $MX\$HUSTR$ последовательно по строке J командами INITIAL на этапе создания объекта GPSS-модель, т. е. на уровне исходных данных;
- 2) при запуске объекта «Процесс моделирования» информация из элементов матрицы $MX\$HUSTR$ операторами ASSIGN по строкам J записывается последовательно в параметры T_{pj} , начиная с $P2$, так как параметр $P1$ занят под идентификатор типа заявки j ;
- 3) ввод в накопитель (список пользователя GPZ) оператором SPLIT заданного количества копий транзакта J -го типа. Количество копий определяется максимальным количеством одновременно находящихся на обслуживании в ССМО T_{pj} , т. е. соотношением интенсивностей входного потока $Tr(o)$ и обслуживания;
- 4) генерация оператором GENERATE однородного потока $Tr(o)$ с интенсивностью

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^I \lambda_i;$$

- 5) присвоение разыгранного по схеме полной группы независимых событий значения j сгенерированному на предыдущем шаге $Tr(o)j$;
- 6) выбор из накопителя GPZ транзактом $Tr(o)j$ транзакта Tr_j по значению j , полученному на предыдущем шаге;

7) ввод T_{pj} , выбранного по j на предыдущем шаге, в модель ОУ.

Следует отметить, что шаг 1 выполняется до начала «Процесса моделирования», а шаги 2 и 3 один раз в процессе выполнения одного или серии имитационных экспериментов. Такая организация ГПЗ, совмещенного с записью в параметры T_{pj} последовательности, используемые в обслуживании ОУ, позволяет существенно сократить затраты машинного времени на выполнение СИЭ, особенно при моделировании многофазных, многоканальных и высоконагруженных ССМО. Следует отметить, что чем выше уровень формализации процессов синтеза ИМ, планирования и проведения СИЭ, обработки их результатов, тем легче и эффективнее осуществляется выполнение сложнейших и наиболее ответственных процедур верификации и валидации ИМ и результатов моделирования [14–16].

Полученные результаты позволяют разработать логическую схему моделирующего алгоритма (ЛСМА) с использованием символики и структуры логических схем алгоритмов [17].

3. Алфавит ЛСМА

G — генератор T_{pj} ;
 A — работа с параметром $P(N)$;
 V — извлечение из накопителя;
 K — создание копий T_{pj} ;
 S — запись в ячейку $x(N)$;
 En — занятие ОУ;
 Zn — задержка на время обслуживания;
 Rn — освобождение ОУ;
 N — возврат T_{vi} в накопитель;
 q — логическое условие;
 T — вывод T_{pj} из ИМ;
 g — ждущее логическое условие.

4. ЛСМА установки двоичных объектов

$$U_1 = G_{11}^1 L_{11} L_{12} \dots L_{1m} \dots L_{1m} T,$$

G_{11}^1 — генератор T_{py} ;
 L_{1m} — установки двухпозиционных объектов;
 T_{py} — установочный транзакт;
 T — вывод транзакта из модели.

5. ЛСМА ГПЗ

$$U_2 = G_{21} S_{21} A_{21} A_{22} \downarrow^2 A_{23} q_{21} \uparrow^1 \times \\ A_{24} w \uparrow^2 \downarrow^1 A_{25} K_{21} \uparrow^3 N_{21} \downarrow^3 T_{21},$$

G_{21} — генератор $j T_{pj}^0$, $j = \overline{1, J}$;

S_{21} — $x1 = x1 + 1$;

A_{11} — $P1 := x1$;

A_{21} — $P100 := 1$;

A_{23} — $P100 = P100 + 1$;

$$q_{21} \begin{cases} 1 - \text{если } mx1(*1, *100) < 1\,000\,000; \\ 0 - \text{если } mx1(*1, *100) = 1\,000\,000; \end{cases}$$

A_{25} — $P100 := mx1(*1, *100)$;

K_{21} — создание K копий T_{pj} , $j = \overline{1, J}$;

N_{21} — ввод в накопитель GPZ копий T_{pj} , $j = \overline{1, J}$;

T_{21} — вывод транзактов T_{pj}^0 из модели

Тип заявки — по маршруту транзакта в ССМО (последовательность ОУ).

6. ЛСМА системы обработки заявок

$$U_3 = G_{31}^r q_{31} \uparrow^{31} A_{31} \downarrow^{38} V_{31} \uparrow^{32} T_{31} \downarrow^{32} A_{32} \downarrow^{34} \times \\ \times A_{33} q_{32} \uparrow^{33} A_{34} S_{31} A_{35} g_{31} E_{31} Z_{31} R_{31} w \uparrow^{34} \downarrow^{33} K_{31} \uparrow^{35} \times \\ \times N_{31} \downarrow^{35} T_{32}^1 \downarrow^{31} q_{34} \uparrow^{36} S_{32} \downarrow^{36} S_{33} A_{36} A_{37} q_{35} \times \\ \times \uparrow^{37} w \uparrow^{38} \downarrow^{37} S_{34} w \uparrow^{38};$$

где G_{31}^r — генератор однородного потока заявок

$$j = \overline{1, J} \text{ с интенсивностью } \lambda_0 = \sum_{i=1}^J \lambda_i;$$

$$q_{31} \begin{cases} 1 - x\$vid = 1; \\ 0 - x\$vid = 0; \end{cases}$$

A_{31} — $*1 := FN\$TYP$;

V_{31} — извлечение T_{pj} из накопителя GPZ;

T_{31} — вывод извлекающего T_{pj} из модели;

A_{32} — $*111 := 1$;

A_{33} — $*111 = *111 + 1$;

$$q_{32} \begin{cases} 1 - \text{если } P*111 < 1\,000\,000; \\ 0 - \text{если } P*111 = 1\,000\,000; \end{cases}$$

A_{34} — $*112 := P*111$;

S_{31} — $x7 := P*111$;

A_{35} — $*112 := x7$;

$$g_{31} = \begin{cases} 1 - \text{если } BV * 112 = 1; \\ 0 - \text{если } BV * 112 = 0; \end{cases}$$

E_{31} — занять $OY * 112$;

Z_{31} — задержка T_{Pj} ;

R_{31} — освобождение $OY * 112$;

K_{31} — создание копии T_{Pj} ;

N_{31} — возврат T_{Pj} в накопитель GPZ;

T_{32} — счетчик количества обслуженных T_{Pj} ;

$$q_{31} = \begin{cases} 1 - x1000 = 0; \\ 0 - x1000 \neq 0; \end{cases}$$

S_{32} — $x1000 := 1$;

S_{33} — $x1000 = x1000 + 1$;

A_{36} — $*1000 := x1000$;

A_{37} — $*1 := mx4(1, *1000)$;

S_{34} — $x1000 := 0$

ЛСМА U_1, U_2, U_3 выполнены с ориентацией на инструментальную среду GPSS World, что позволило установить однозначное соответствие GPSS-программы данным моделирующим алгоритмам.

7. GPSS-программа по ЛВФ

```

typ1 equ 1
typ1 function rn10,d2;
.5,1/1,2
vhvrem equ 3;
vhvrem matrix ,5,2;
initial mx3(1,1),100
initial mx3(1,2),50
vhtyp equ 4;
vhtyp matrix ,1,10;
initial mx4(1,1),3;
initial mx4(1,2),1
initial mx4(1,3),2
initial x$vid,0;
hustr equ 1;
hustr matrix ,5,10;
initial mx1(1,2),1;
initial mx1(1,3),3
initial mx1(1,4),5;

```

```

initial mx1(1,5),1000000;
initial mx1(2,2),2;
initial mx1(2,3),3;
initial mx1(2,4),4;
initial mx1(2,5),1000000;
vrem equ 2;
vrem matrix ,20,3;
initial mx2(1,1),11
initial mx2(1,2),5
initial mx2(2,1),12
initial mx2(2,2),7
initial mx2(3,1),13
initial mx2(3,2),6
initial mx2(4,1),9
initial mx2(4,2),4
initial mx2(5,1),21
initial mx2(5,2),11
klk1 equ 1;
klk1 bvariable 1s1
klk2 equ 3
klk2 bvariable 1s3
klk3 equ 4
klk3 bvariable 1s4
klk4 equ 5
klk4 bvariable 1s5
klk5 equ 2
klk5 bvariable 1s2
generate .5,,1; G11
logic s 1; L11
logic s 2; L12
logic s 3; L13
logic s 4; L14
logic s 5; L15
terminate; 1
generate 1,,2; G21
savevalue 1+,1; S21
assign 1,x1; A21
assign 100,1; A22
gis1 assign 100+,1; A23
test 1 mx1(*1,*100),1000000,tis1; q21
assign *100,mx1(*1,*100); A24
transfer ,gis1; w
tis1 assign *100,mx1(*1,*100); A25
split 10,lnk1; K21
buffer;
terminate; T21
lnk1 link gpz,fifo; N21
generate mx3(1,1),mx3(1,2); G31
test e x$vid,1,determ; q31

```

```

transfer ,ppp; w
determ test e x1000,0,vall; q34
savevalue 1000,1; S32
vall savevalue 1000+,1; S33
assign 1000,x1000; A36
assign 1,mx4(1,*1000); A37
test l *1000,mx4(1,1),obnul; q35
transfer ,unk1; w
pp assign 1,fn$typ1; A31
unk1 unlink gpz,potok,1,1,,rmi1; V31
terminate; T31
obnul savevalue 1000,0; S3
transfer ,unk1; w
potok assign 111,1; A32
gis2 assign 111+,1; A33
test l p*111,1000000,tis2; q32
assign 112,p*111; A34
savevalue 7,p*111; S31
assign 112,x7; A35
test e bv*112,1,rmi3; g31
seize *112; E31
advance mx2(*112,1),mx2(*112,2); Z31
release *112; R31
transfer ,gis2; w
tis2 split 1,rmi2; K31
lnk2 link gpz,fifo; N31
rmi1 terminate;
rmi2 terminate 1; T32
rmi3 terminate;

```

Заключение

Оценка системотехнических решений на различных этапах жизненного цикла СЖАТ, как правило, выполняется с использованием методов имитационного моделирования. Аппаратно-программные средства СЖАТ рассматриваются как системы массового обслуживания с жесткой технической структурой, в отличие от систем организационно-технологического типа, для которых определяющей является функционально-алгоритмическая структура. Предложенная ЛВФ ИМ предназначена для синтеза моделей СЖАТ с жесткой структурой и заданной строгой последовательностью многофазного обслуживания заявок разного типа. Тип заявки в данном контексте определяется только подмножеством ОУ и последовательностью их использования в

процессе обработки заявок. Модель, построенная на основе ЛВФ, является транзактной, процессной, асинхронной, дискретно-событийной моделью ССМО с жесткой структурой и реализуется в инструментальной среде GPSS World.

В работе получены следующие результаты:

1. Сформулирована концепция ЛВФ моделей СЖАТ как ССМО, основанная на записи идентификаторов ОУ в параметры транзактов T_{pj} ; с учетом последовательности их использования в процессе обработки заявок j -го типа.
2. Предложен новый подход к построению ГПЗ с использованием в качестве буферного накопителя транзактов T_{pj} ; списка пользователя GPZ и двухэтапной процедуры генерации T_{pj} ; с записью идентификаторов ОУ в параметры транзакта по типу j . Такой подход позволяет существенно сократить затраты машинного времени на выполнение ИЭ.
3. Разработан алфавит и с его использованием логические схемы моделирующих алгоритмов ИМ, реализующих концепцию ЛВФ.
4. По ЛСМА разработана GPSS-программа.
5. Таким образом, предложенный подход к синтезу ИМ СЖАТ с жесткой структурой проиллюстрирован реализацией в виде GPSS-программы, позволившей сделать вывод о возможности и эффективности по времени разработки моделей конкретных СЖАТ и выполнения ИЭ.
6. Существенное сокращение времени разработки ИМ СЖАТ достигается за счет настройки GPSS-программы на конкретную систему на уровне исходных данных, занесением в соответствующие матрицы, непрерывные и дискретные функции, булевы переменные данных о вероятностно-временных, структурных и логических свойствах моделируемой СЖАТ.

Предложенный подход к синтезу ИМ СЖАТ представляется авторам (на уровне экспертной оценки) перспективным и предполагает развитие по следующим направлениям:

- развитие логики моделирования многопозиционных устройств ЖАТ;

- разработка широкого класса моделей устройств ЖАТ как ОУ в рамках ЛВФ;
- разработка алгоритмов и программ моделей управления двумя и многопозиционными объектами в соответствии с логикой различных СЖАТ;
- разработка алгоритмов и программ управления изменением последовательности использования ОУ в процессе обработки заявки j -го типа;
- разработка алгоритмов и программ управления СИЭ с учетом особенностей ЛВФ ИМ, прежде всего задания последовательности ОУ при многофазном обслуживании в параметрах T_{pj} и оценки логики доступности процессов обработки заявок булевыми функциями;
- выполнение оценочных процедур построения ИМ и проведения СИЭ для конкретных СЖАТ. ▲

Библиографический список

1. Марков Д. С. Технология имитационного моделирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. С. Марков, Т. Ю. Константинова, А. А. Лыков и др. // Автоматика на транспорте. — 2023. — Т. 9. — № 2. — С. 193–204. — DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-193-204.
2. Марков Д. С. Матричный метод формализации имитационных моделей сложных систем массового обслуживания / Д. С. Марков, П. Е. Булавский // Известия ПГУПС. — 2010. — Вып. 4. — С. 63–74.
3. Лыков А. А. Метод формализации имитационных моделей технологических процессов в хозяйстве автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте / А. А. Лыков, Д. С. Марков. — СПб.: Известия ПГУПС, 2012. — Вып. 1. — С. 23–38.
4. Марков Д. С. Иерархическая многоматричная формализация имитационной модели электронного документооборота технической документации / Д. С. Марков, П. Е. Булавский // Актуальные вопросы развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики: сб. науч. тр. ПГУПС. — СПб., 2013. — С. 52–60.
5. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем / Т. И. Алиев. — СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. — 363 с.
6. Law A. M. Simulation Modeling and Analysis / A. M. Law, W. D. Kelton. — Fourth Edition. — McGraw-Hill, 2007. — 768 p.
7. Balci O. A Life Cycle for Modeling and Simulation / O. Balci // Simulation. — 2012. — Vol. 88(7). — Pp. 870–883.
8. Марков Д. С. Формализация алгоритмического описания систем обеспечения жизненного цикла железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. С. Марков, В. Б. Соколов, Т. Ю. Константинова // Автоматика на транспорте. — 2015. — Т. 1. — № 4. — С. 418–433.
9. Марков Д. С. Метод порционного моделирования транспортных систем массового обслуживания / Д. С. Марков, В. Б. Соколов // Развитие элементной базы и совершенствование методов построения устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: сб. науч. тр. ПГУПС. — СПб., 2014. — С. 43–47.
10. Кудрявцев Е. М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем: монография / Е. М. Кудрявцев. — М.: ДМК Пресс, 2018. — 37 с.
11. Боев В. Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World / В. Д. Боев. — СПб.: БХВ-Петербург, 2004. — 348 с.
12. Девятков В. В. Имитационные исследования в среде моделирования GPSS STUDIO / В. В. Девятков, Т. В. Девятков, М. В. Федотов. — М.: ИНФРА-М, 2019. — 283 с.
13. Девятков В. В. Руководство пользователя по GPSS World / В. В. Девятков. — Казань: Мастер Лайн, 2002. — 383 с.
14. Rabe M. Verifikation und Validie — rung fur die Simulation in Produktion und Logistik / M. Rabe, S. Spieckermann, S. Wenzel. — Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. — 195 p.
15. Carson J. S. Model verification and validation / J. S. Carson // Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference. — 2002. — Pp. 52–58.
16. Sargent R. G. Some approaches and paradigms for verifying and validating simulation models / R. G. Sargent // Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference. — 2001. — Pp. 106–114.
17. Лазарев В. Г. Синтез управляющих автоматов / В. Г. Лазарев, Е. И. Пийль. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 328 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 4, pp. 368–376
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-04-368-376

Logical Time Formalization of Simulation Models for Railway Automation and Remote Control Systems

Information about authors

Belishkina T. A., PhD in Engineering, Associate Professor of the Department.
E-mail: belishkina@mail.ru

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

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

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

Mikado E. N., Head of Laboratory of the Department.
E-mail: mikadowork@yandex.ru

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

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

Abstract: The purpose of the article is to present the results of developing a method for formalizing simulation models of railway automation and remote control systems as queuing systems with a rigidly regulated sequence of using service devices while processing streams of requests of various types. For the software implementation of simulation models with such properties, the GPSS World tool is traditionally used. The logical time formalization is proposed, and the concept of the proposed formalization of simulation models is formulated. Its main provisions include: the type of request is determined solely by the composition and sequence of occupation and release of servicing devices; the use of transaction parameters to organize their multiphase processing for each type of request; checking the value of Boolean functions for each procedure of processing requests for each type; the regulated time in the procedure of processing requests is considered as one of the many logical conditions of Boolean functions; logical and parametric description of the modeled system should be performed at the level of initial data without changing the text of the modeling program. Objects in GPSS World sufficient for implementing this concept have been identified. Using the selected objects, an alphabet has been compiled, and logical diagrams of modeling algorithms have been developed in the obtained alphabet. This serves as a demonstration of the application of the logical time concept for the formalization of simulation models of complex queuing systems. A GPSS program has been developed to confirm the possibility and feasibility of using the proposed method for formalizing simulation models of railway automation systems with a rigid structure.

Keywords: railway automation and remote control systems; queuing systems with a rigid structure; simulation model; Boolean functions; model formalization; logical algorithm schemes.

References

1. Markov D. S., Konstantinova T. Yu., Lykov A. A. et al. Tekhnologiya imitatsionnogo modelirovaniya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Technology of simulation modeling of railway automation and telemechanics systems]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2023, vol. 9, Iss. 2, pp. 193–204. DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-193-204.
2. Markov D. S., Bulavskiy P. E. Matrichnyy metod formalizatsii imitatsionnykh modeley slozhnykh sistem massovogo obsluzhivaniya [Matrix method for formalizing simulation models of complex queuing systems]. *Izvestiya PGUPS* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2010, Iss. 4, pp. 63–74.
3. Lykov A. A., Markov D. S. *Metod formalizatsii imitatsionnykh modeley tekhnologicheskikh protsessov v khozyaystve avtomatiki i telemekhaniki na zheleznodorozhnom transporte* [Method for formalizing simulation models of technological processes in the field of automation and telemechanics in railway transport]. St. Petersburg: Izvestiya PGUPS Publ., 2012, Iss. 1, pp. 23–38.
4. Markov D. S., Bulavskiy P. E. Ierarkhicheskaya mnogomatrichnaya formalizatsiya imitatsionnoy modeli elektronnoy dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentatsii [Hierarchical multi-matrix formalization of a simulation model of electronic document management of technical documentation]. *Aktual'nye voprosy razvitiya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: sb. nauch. tr. PGUPS* [Current issues in the development of railway automation and telemechanics systems: collection. scientific tr. PGUPS]. St. Petersburg, 2013, pp. 52–60.
5. Aliev T. I. *Osnovy modelirovaniya diskretnykh sistem* [Fundamentals of modeling discrete systems]. St. Petersburg: SPbGU ITMO Publ., 2009, 363 p.
6. Law A. M., Kelton W. D. *Simulation Modeling and Analysis*. Fourth Edition, McGraw-Hill, 2007, 768 p.
7. Balci O. A Life Cycle for Modeling and Simulation. *Simulation*, 2012, vol. 88(7), pp. 870–883.
8. Markov D. S., Sokolov V. B., Konstantinova T. Yu. Formalizatsiya algoritmicheskogo opisaniya sistem obespecheniya zhiznennogo tsikla zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Formalization of algorithmic description of life cycle support systems for railway automation and telemechanics]. *Avtomatika na transporte* [Automation in Transport]. 2015, vol. 1, Iss. 4, pp. 418–433.
9. Markov D. S., Sokolov V. B. Metod portsiionnogo modelirovaniya transportnykh sistem massovogo obsluzhivaniya [Method of batch modeling of queuing transport systems]. *Razvitie elementnoy bazy i sovershenstvovanie metodov postroeniya ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: sb. nauch. tr. PGUPS* [Development of the element base and improvement of methods for constructing devices for railway automation and telemechanics: collection. scientific tr. PGUPS]. St. Petersburg, 2014, pp. 43–47.
10. Kudryavtsev E. M. *GPSS World. Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya razlichnykh sistem: monografiya* [GPSS World. Fundamentals of simulation modeling of various systems: monograph]. Moscow: DMK Press Publ., 2018, 37 p.
11. Boev V. D. *Modelirovanie sistem. Instrumental'nye sredstva GPSS World* [Modeling of systems. GPSS World tools]. St. Petersburg: BKhV-Peterburg Publ., 2004, 348 p.
12. Devyatkov V. V., Devyatkov T. V., Fedotov M. V. *Imitatsionnye issledovaniya v srede modelirovaniya GPSS STUDIO* [Simulation studies in the GPSS STUDIO modeling environment]. Moscow: INFRA-M Publ., 2019, 283 p.
13. Devyatkov V. V. *Rukovodstvo pol'zovatelya po GPSS World* [User's Guide for GPSS World]. Kazan': Master Layn Publ., 2002, 383 p.
14. Rabe M., Spieckermann S., Wenzel S. *Verifikation und Validie — rung fur die Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008, 195 p.
15. Carson J. S. Model verification and validation. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, 2002, pp. 52–58.
16. Sargent R. G. Some approaches and paradigms for verifying and validating simulation models. *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, 2001, pp. 106–114.
17. Lazarev V. G., Piyl' E. I. *Sintez upravlyayushchikh avtomatov, 3-e izd., pererab. i dop.* [Synthesis of control automata]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1989, 328 p.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХМОДУЛЬНЫХ ВЗВЕШЕННЫХ КОДОВ С СУММИРОВАНИЕМ С ПРОИЗВОЛЬНЫМИ РАЗБИЕНИЯМИ МНОЖЕСТВА ИНФОРМАЦИОННЫХ СИМВОЛОВ

ЕФАНОВ Дмитрий Викторович, д-р техн. наук, профессор, член Института инженеров электротехники и электроники, действительный член Международной академии транспорта, заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе¹, профессор^{2,3,4}; e-mail: TrES-4b@yandex.ru

ТИМОШЕНКОВ Максим Викторович, магистрант²; e-mail: timych180@gmail.com

СИВАЧЕНКО Леонид Александрович, д-р техн. наук, профессор, академик Белорусской инженерной академии, профессор⁵; e-mail: 228011@mail.ru

ЛЕСКОВЕЦ Игорь Вадимович, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой⁵; e-mail: le@bru.by

¹ООО «НИПИ «ТрансСтройбезопасность», Санкт-Петербург

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

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

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

⁵Белорусско-Российский университет, кафедра «Транспортные и технологические машины», Могилев

Предложен способ построения двухмодульных кодов с суммированием, пригодных для решения задач синтеза самопроверяемых цифровых вычислительных устройств и систем, а также технических средств их диагностирования. При построении кода множество информационных символов разбивается на два подмножества и образуются отдельные векторы, для которых осуществляется подсчет суммарного веса по заранее установленному модулю. Предварительно в каждом из выделенных векторов осуществляется взвешивание одного из информационных символов весовым коэффициентом из натурального ряда. Получаемые при различных значениях весовых коэффициентов и модулей определения суммарного веса коды образуют отдельное семейство равномерных двоичных кодов с фиксированным числом проверочных символов. В статье приведен пример построения кода с суммированием в кольце вычетов по модулю $M = 4$. Использование этого модуля дает возможность построения двухмодульного кода с $k = 4$ проверочными символами для любого значения числа информационных символов m . С увеличением значения m будет существенно изменяться соотношение между числом информационных и проверочных символов, а сам строящийся код будет иметь низкую избыточность. Это важно при использовании рассматриваемого класса кодов при построении цифровых устройств. Установлены ранее неизвестные свойства рассматриваемого класса кодов с суммированием, учет которых целесообразен при решении задач синтеза и технической диагностики цифровых устройств.

Ключевые слова: контролепригодные системы; самопроверяемые системы; код с суммированием; код Бергера; взвешенный код с суммированием; обнаружение ошибок в информационных векторах; необнаруживаемая ошибка; обнаружение монотонных ошибок; свойства кода.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-04-377-389

▼ Введение

Компоненты управляющих систем должны быть самопроверяемыми, для чего следуют определенным принципам их реализации, в том числе используют методы теории информации и кодирования. При этом применяются как коды, ориентированные на коррекцию ошибок, так и коды, ориентированные исключительно на их обнаружение. Одними из таких кодов являются взвешенные коды с суммированием.

Взвешенные коды с суммированием принадлежат к классу блоковых разделимых несисте-

матических кодов и ориентированы на обнаружение ошибок в информационных символах. Их можно использовать как при обработке и передаче информации, так и при решении задач технической диагностики и синтеза контролепригодных цифровых вычислительных систем [1].

Операция взвешивания информационных символов заключается в приписывании им на этапе построения кода весовых коэффициентов w_i , $i = 1, m$, $w_i \in \mathbb{N}$.

В ставшей классической работе Дж. Бергера [2] помимо всем известного под его именем кода (кода Бергера) предложено строить и взвешенные коды с суммированием. Информационным символам приписываются весовые коэффициенты из следующего ряда: $[w] = [3, 5, 6, 7, 9, \dots]$. Это натуральный ряд, за исключением чисел вида $2^j, j \in \mathbb{N}_0$. Представленный Дж. Бергером взвешенный код с суммированием обнаруживает любые одно- и двукратные искажения в информационных символах, а также все однонаправленные (монотонные) искажения, что позволяет использовать его как при передаче данных по асимметричным каналам связи [3], так и при синтезе самопроверяемых цифровых вычислительных систем [4]. В своей следующей работе [5] Дж. Бергер предложил приписывать группе подряд идущих информационных символов весовые коэффициенты из ряда $2^j, j \in \mathbb{N}_0$. Этот подход позволяет обнаруживать пачки ошибок из отдельной группы подряд идущих символов в информационном векторе. Взвешенные коды Бергера не задумывались автором как коды для построения надежных цифровых систем. Они обладают высокой избыточностью, что при их использовании в процессе синтеза цифровых устройств приводит к существенному увеличению показателей структурной избыточности [6].

Сокращение избыточности взвешенного кода с суммированием возможно за счет двух подходов при его построении.

Первый подход состоит в выборе значений весовых коэффициентов и их определенном ограничении [7]. К примеру, для реальных цифровых устройств как раз возможен подбор значений весовых коэффициентов на этапе синтеза технических средств диагностирования. В работах [8, 9] исследованы взвешенные коды с суммированием с произвольными весовыми коэффициентами, избыточность которых равна избыточности классических кодов Бергера [2]. Такие коды обладают свойством обнаружения любых монотонных ошибок в информационных векторах, а также обнаруживают большее количество немонотонных ошибок в информационных символах, чем классические коды Бергера. Это позволяет достаточно «гибко» и широко применять их

при построении высоконадежных цифровых вычислительных систем со свойствами обнаружения неисправностей и ошибок в вычислениях.

Второй подход при построении взвешенного кода связан с суммированием значений весовых коэффициентов в кольце вычетов по заранее устанавливаемому модулю M [10]. Это дает возможность ограничения числа проверочных символов взвешенного кода величиной $k = \lceil \log_2 M \rceil$. Следует отметить, что принципы модулярной арифметики достаточно широко используются при синтезе устройств автоматики и вычислительной техники [11–22].

В [23], к примеру, изучены взвешенные коды с суммированием со значением модуля $M = 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil}$, где m — число информационных символов. Выбор данного модуля обусловлен тем, что это как раз модуль, дающий код с избыточностью классического кода Бергера (этот код наиболее известен и наиболее часто упоминается при решении задач синтеза цифровых вычислительных устройств). Уменьшение значения модуля относительно величины $M = 2^{\lceil \log_2(m+1) \rceil}$ приводит к наложению ограничений на значения весовых коэффициентов для получения кода, обнаруживающего любые однократные ошибки в информационных символах [24]. Это связано с тем, что значение любого символа при его весе $w_i = jM, j \in \mathbb{N}$ не будет проверяться в контрольном векторе строящегося кода, так как $w_i \pmod{M} = jM \pmod{M} = 0$, и значение i -го информационного символа не будет влиять на

конечное суммарное значение $W = \sum_{i=1}^m w_i x_i$, где

x_i — значение i -го информационного символа. Необходимо также отметить, что взвешенные коды, строящиеся с применением принципов модулярной арифметики, не обнаруживают некоторую долю монотонных ошибок, что накладывает ограничения на их применение при решении рассматриваемых задач диагностики и синтеза цифровых устройств. Известные подходы [25–29], связанные с синтезом устройств, на выходах которых возможны только монотонные проявления неисправностей, выделением специальных групп выходов, преобразованием

структур устройств в устройства с выходами, на которых возможны только монотонные ошибки, в данном случае неприменимы.

Второй подход представляет интерес, так как связан с построением кодов с фиксированным вне зависимости от числа m числом проверочных символов. Для наделения взвешенных кодов с суммированием свойством помехозащищенности (обнаружения любых однократных искажений) используются различные модификации [30, 31]. Как показано в [32], все они сводятся к тому, что подмножество символов, включая символы, значения весовых коэффициентов которых кратны значению модуля, контролируются дополнительно с выделением для этого проверочных символов. Таким образом, для построения помехозащищенного модульного взвешенного кода в общем случае требуется выделить два и более подмножеств символов среди полного множества проверочных символов. Наиболее простым вариантом является построение кода с двумя подмножествами символов контрольного вектора, предназначенных для проверки значений символов из двух подмножеств информационных символов. Такие модифицированные взвешенные коды обозначены как *двухмодульные взвешенные коды с суммированием*. В [33] данные коды изучены на случай суммирования значений весовых коэффициентов символов каждого из подмножества информационных символов в кольце вычетов по модулю $M = 4$ при взвешивании весовым коэффициентом $w_i > 1, i \in \mathbb{N}$, только одного из символов в каждом подмножестве информационных символов. При этом подмножества разбиваются ровно наполовину при четном значении m и с разницей в один символ — при нечетном значении m .

Расширим множество способов построения двухмодульных взвешенных кодов с суммированием, разбивая при построении информационные символы на два подмножества произвольным образом, но без пересечений.

1. Принципы построения двухмодульных взвешенных кодов с суммированием

В монографии [21, 22] рассмотрены характеристики основных кодов с суммированием, пригодных для синтеза цифровых

вычислительных устройств и систем. Там же рассмотрены принципы построения двухмодульных невзвешенных и взвешенных кодов. Приведем здесь обобщенный алгоритм их построения.

Двухмодульный взвешенный код с суммированием строится следующим образом:

1. Множество D информационных символов разбивается на два подмножества D_1 и D_2 таких, что:

$$D_1 \cup D_2 = D. \quad (1)$$

2. Символы из множества D_1 объединяются и размещаются в установленном порядке в информационном подвекторе $\langle D_1 \rangle$ длиной m_1 . Аналогично получают информационный подвектор $\langle D_2 \rangle$ с длиной m_2 .

3. Формируются последовательности весовых коэффициентов $[w^1]$ и $[w^2]$, приписываемые информационным символам из подвекторов $\langle D_1 \rangle$ и $\langle D_2 \rangle$.

4. Устанавливаются модули $M_1 \in \{2, 3, \dots, W_{\max_1} + 1\}$ и $M_2 \in \{2, 3, \dots, W_{\max_2} + 1\}$, по которым подсчитываются суммарные веса информационных подвекторов $\langle D_1 \rangle$ и $\langle D_2 \rangle$, где W_{\max_1} и W_{\max_2} — суммы всех весовых коэффициентов из последовательностей $[w^1]$ и $[w^2]$ соответственно.

5. Определяются наименьшие неотрицательные вычеты сумм весовых коэффициентов единичных информационных символов в подвекторах $\langle D_1 \rangle$ и $\langle D_2 \rangle$ — числа $W_1(\text{mod } M_1)$ и $W_2(\text{mod } M_2)$.

6. Значения $W_1(\text{mod } M_1)$ и $W_2(\text{mod } M_2)$ представляются в двоичном виде и записываются в $k_1 = \lceil \log_2 M_1 \rceil$ младших и в $k_2 = \lceil \log_2 M_2 \rceil$ старших проверочных символах соответственно.

Введем обозначение двухмодульных кодов с суммированием — $TMW(m, k)$ -коды, где $m = m_1 + m_2$ и $k = k_1 + k_2$ — число информационных и проверочных символов соответственно. При этом отдельно будем оговаривать такие параметры кода, как состав подвекторов $\langle D_1 \rangle$ и $\langle D_2 \rangle$ (числа m_1/m_2), установленные весовые коэффициенты $[w^1]$ и $[w^2]$ и значения модулей M_1 и M_2 .

Выполнение условия (1) необходимо для построения помехозащищенного кода. Если

условие (1) не соблюдается, то какой-то из символов не будет контролироваться. Отметим также, что для получения кода с обнаружением любых однократных ошибок в информационных векторах требуется исключить при взвешивании символов весовые коэффициенты, кратные значениям модулей M_1 и M_2 в каждом из подвекторов $\langle D_1 \rangle$ и $\langle D_2 \rangle$ [22, 24].

Рассмотрим далее только такие $TMW(m, k)$ -коды, для которых выполняется еще одно условие:

$$D_1 \cap D_2 = \emptyset. \quad (2)$$

$TMW(m, k)$ -код, при построении которого учтено условие (2), будет иметь только единжды встречающиеся информационные символы в каждом из подвекторов (не будет общих информационных символов в различных информационных подвекторах).

Приведем пример построения двухмодульного взвешенного кода с суммированием со следующими параметрами: $m = 12$, $M_1 = M_2 = 4$, $m_1/m_2 = 7/5$, $[w^1] = [1, 2, 2, 3, 1, 2, 1]$, $[w^2] = [1, 1, 1, 2, 3]$, порядок следования векторов $\langle D_1 \rangle$ и $\langle D_2 \rangle$ — первый из них — начиная с младшего символа. Получим значения проверочных символов для следующего информационного вектора $\langle f_{12} f_{11} \dots f_2 f_1 \rangle = \langle 101110110101 \rangle$. Выделим подвекторы $\langle D_1 \rangle$ и $\langle D_2 \rangle$: $\langle D_1 \rangle = \langle 0110101 \rangle$, $\langle D_2 \rangle = \langle 10111 \rangle$. Подсчитаем суммарные весовые коэффициенты подвекторов: $W_1 = 0 \cdot 1 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 2 + 0 \cdot 3 + 1 \cdot 1 + 0 \cdot 2 + 1 \cdot 1 = 6$, $W_2 = 1 \cdot 1 + 0 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 3 = 7$. Определим числа $W_1(\text{mod}4) = 6(\text{mod}4) = 2$ и $W_2(\text{mod}4) = 7(\text{mod}4) = 3$. Представим вычеты в двоичном виде и запишем их в контрольный вектор, начиная с младшего проверочного символа: $\langle g_4 g_3 g_2 g_1 \rangle = \langle 1110 \rangle$.

Информационные символы могут взвешиваться различными числами. Общим условием является то, что значение какого-либо из весовых коэффициентов не должно быть кратно значению модуля, в противном случае он не будет контролироваться [22]. Вообще, значение весового коэффициента любого из символов может быть выбрано из множества $\{1, 2, \dots, M-1\}$. Все остальные варианты взвешивания, за исключением $w_i = jM$, $j \in \mathbb{N}$, дают точно такие же взвешенные коды, как и при

использовании весовых коэффициентов из обозначенного подмножества. Это обстоятельство говорит о том, что число $TMW(m, k)$ -кодов не бесконечно. Далее, как и обсуждалось во введении, остановимся на описании характеристик только частного случая двухмодульных взвешенных кодов, при построении которых взвешивается числом $w_i > 1, i \in \mathbb{N}$ только один из символов каждого из подмножеств $\langle D_1 \rangle$ и $\langle D_2 \rangle$ и выполняется условие (2). Ранее этот класс кодов не был охвачен в научных исследованиях и в литературе.

2. Характеристики обнаружения ошибок двухмодульными взвешенными кодами с суммированием

Будем рассматривать только такие $TMW(m, k)$ -коды, для которых значения $M_1 = M_2 = 4$. К обозначению кода будем добавлять более простое сокращение, полностью характеризующее параметры кода: m_1/m_2 - $[w^1/w^2]$. Ранее подобные коды на случай «половинного» разбиения информационных символов на два подмножества были описаны в [22, 33]. Рассмотрим, как меняются характеристики обнаружения ошибок $TMW(m, k)$ -кодами при изменении длин подвекторов $\langle D_1 \rangle$ и $\langle D_2 \rangle$.

Автоматизация алгоритма формирования $TMW(m, k)$ -кода позволила рассчитать характеристики обнаружения ошибок в их информационных символах в диапазоне $m = 8-16$. При этом установлено общее количество необнаруживаемых кодами ошибок по каждой кратности d и по виду.

Ошибки в кодовых словах кодов, используемых при синтезе цифровых устройств, разделяются на монотонные, симметричные и асимметричные [21]. К монотонным относят однонаправленные искажения: только вида $0 \rightarrow 1$ либо только вида $1 \rightarrow 0$. Симметричные ошибки возникают при равном количестве искажений $0 \rightarrow 1$ и $1 \rightarrow 0$. Асимметричные ошибки связаны неравным числом искажений $0 \rightarrow 1$ и $1 \rightarrow 0$. Характеристики обнаружения ошибок кодами учитываются при выборе способа синтеза цифрового устройства с обнаружением неисправностей.

Общие свойства проявляются для всех значений m . Приведем в качестве примера характеристические таблицы для $TMW(10,4)$ -кода.

Таблица 1. Характеристика необнаруживаемых ошибок в информационных векторах

Код	Распределение необнаруживаемых ошибок по кратностям d									Распределение необнаруживаемых ошибок по видам			Всего
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Моно-тонных	Симмет-ричных	Асиммет-ричных	
5/5-[1/1]	10 240	0	30 720	0	25 600	0	6400	0	0	1480	62 680	8800	72 960
5/5-[1/2]	8192	3072	18 432	15 872	10 240	10 240	1280	1280	0	2824	34 296	31 488	68 608
5/5-[1/3]	10 240	0	30 720	0	25 600	0	6400	0	0	3496	34 296	35 168	72 960
5/5-[2/2]	6144	6144	10 240	19 456	12 288	6144	3328	512	256	4680	21 720	38 112	64 512
5/5-[2/3]	8192	3072	18 432	15 872	10 240	10 240	1280	1280	0	5608	18 584	44 416	68 608
5/5-[3/3]	10 240	0	30 720	0	25 600	0	6400	0	0	6664	26 776	39 520	72 960
4/6-[1/1]	10 752	0	31 232	0	27 392	0	5376	0	256	2168	63 788	9052	75 008
4/6-[1/2]	8192	5120	18 432	17 920	10 240	10 240	1280	1280	0	3528	34 296	34 880	72 704
4/6-[1/3]	10 752	0	31 232	0	27 392	0	5376	0	256	3562	34 296	37 150	75 008
4/6-[2/2]	6656	6656	10 240	17 920	11 520	7680	3840	0	0	5168	22 016	37 328	64 512
4/6-[2/3]	9216	1536	19 200	11 520	12 032	11 520	768	768	0	5212	19 136	42 212	66 560
4/6-[3/3]	10 752	0	31 232	0	27 392	0	5376	0	256	7192	27 296	40 520	75 008
3/7-[1/1]	12 288	0	34 048	0	30 464	0	5376	0	0	4480	67 616	10 080	82 176
3/7-[1/2]	9216	7680	19 200	19 200	12 032	12 032	768	768	0	5776	35 936	39 184	80 896
3/7-[1/3]	12 288	0	34 048	0	30 464	0	5376	0	0	5184	35 936	41 056	82 176
3/7-[2/2]	8192	8192	11 520	15 360	8192	8192	4096	512	256	6754	23 132	34 626	64 512
3/7-[2/3]	11 264	512	23 296	5376	12 544	8960	1792	1792	0	6088	21 152	38 296	65 536
3/7-[3/3]	12 288	0	34 048	0	30 464	0	5376	0	0	8800	29 248	44 128	82 176
2/8-[1/1]	14 848	0	43 008	0	32 256	0	7680	0	256	8968	76 196	12 884	98 048
2/8-[1/2]	11 264	10 752	23 296	23 296	12 544	12 544	1792	1792	0	9968	40 160	47 152	97 280
2/8-[1/3]	14 848	0	43 008	0	32 256	0	7680	0	256	8736	40 160	49 152	98 048
2/8-[2/2]	10 752	10 752	17 920	17 920	3584	3584	0	0	0	9968	26 432	28 112	64 512
2/8-[2/3]	14336	0	35 840	0	14 336	0	512	0	0	8736	26 432	29 856	65 024
2/8-[3/3]	14848	0	43 008	0	32 256	0	7680	0	256	11 432	34 440	52 176	98 048

В табл. 1 приведены характеристики обнаружения ошибок в целом по кратностям и видам. В первой графе таблицы перечислены все варианты разбиений символов информационного вектора на два непересекающихся подмножества. Далее приводятся распределения ошибок по кратностям и в общем по их видам.

Из таблицы становится ясным, что выбор числа символов при их разбиении на подмножества существенно влияет не только на общее количество необнаруживаемых ошибок, но и на распределение их по видам и кратностям. К примеру, вариант с «половинным» разбиением без взвешивания дает код с наименьшим количеством монотонных и асимметричных необнаруживаемых ошибок. Данный тип кода отдельно изучен в [34]. В табл. 2–4 приведены

более детализированные характеристики и показатели обнаружения кодами ошибок в информационных символах.

В табл. 5 даны относительные показатели обнаружения ошибок взвешенными кодами. Их анализировать гораздо удобнее, чем абсолютные величины. Приведены следующие показатели. Значения долей необнаруживаемых монотонных, симметричных и асимметричных ошибок от общего числа необнаруживаемых кодом ошибок — величины $\upsilon_{m,k}$, $\sigma_{m,k}$ и $\alpha_{m,k}$ соответственно. Значения доли необнаруживаемых ошибок от общего числа ошибок в информационных символах — показатель $\gamma_{m,k}$. Значения коэффициента эффективности $\xi_{m,k}$, показывающего отношение числа необнаруживаемых ошибок в коде с наименьшим

Таблица 2. Характеристика необнаруживаемых монотонных ошибок

Код	Распределение необнаруживаемых монотонных ошибок по кратностям d								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5/5-[1/1]	0	0	1280	0	0	0	200	0	0
5/5-[1/2]	0	1536	768	0	0	480	40	0	0
5/5-[1/3]	2048	0	768	0	640	0	40	0	0
5/5-[2/2]	0	3072	256	0	1152	192	8	0	0
5/5-[2/3]	2048	1536	256	1536	128	96	8	0	0
5/5-[3/3]	4096	0	2304	0	256	0	8	0	0
4/6-[1/1]	0	0	2048	0	0	0	120	0	0
4/6-[1/2]	0	2560	768	0	0	160	40	0	0
4/6-[1/3]	2560	0	768	0	192	0	40	0	2
4/6-[2/2]	0	3328	640	0	960	240	0	0	0
4/6-[2/3]	2560	768	640	960	32	240	0	12	0
4/6-[3/3]	4096	0	2560	0	512	0	24	0	0
3/7-[1/1]	0	0	4480	0	0	0	0	0	0
3/7-[1/2]	0	3840	1920	0	0	16	0	0	0
3/7-[1/3]	3072	0	1920	0	192	0	0	0	0
3/7-[2/2]	0	4096	1920	0	480	256	0	0	2
3/7-[2/3]	3072	256	1920	384	192	240	0	24	0
3/7-[3/3]	4096	0	3456	0	1152	0	96	0	0
2/8-[1/1]	0	0	8960	0	0	0	8	0	0
2/8-[1/2]	0	5376	4480	0	0	112	0	0	0
2/8-[1/3]	3584	0	4480	0	672	0	0	0	0
2/8-[2/2]	0	5376	4480	0	0	112	0	0	0
2/8-[2/3]	3584	0	4480	0	672	0	0	0	0
2/8-[3/3]	4096	0	5376	0	1792	0	168	0	0

возможным числом ошибок в информационных символах при заданных показателях m и k к числу необнаруживаемых ошибок данным двухмодульным кодом [21]. Чем ближе значение $\xi_{m,k}$ к 100 %, тем эффективнее код использует свои проверочные символы. В последних трех графах табл. 5 даны значения долей необнаруживаемых двух-, трех- и четырехкратных ошибок от общего числа ошибок данной кратностью — величины $\beta_{m,2}$, $\beta_{m,3}$ и $\beta_{m,4}$. Данные табл. 5 дополнены графиками на рис. 1–3.

Отмеченные выше свойства $TМW(m,k)$ -кодов обобщают свойства двухмодульных взвешенных кодов с суммированием, установленные в [22, 33]. Объясняются и доказываются они аналогичным образом.

Из анализа характеристических таблиц для значений $m = 8–16$ следуют такие общие закономерности, присущие $TМW(m, k)$ -кодам:

- для конкретного разбиения m_1/m_2 все коды с суммированием с нечетными значениями весовых коэффициентов обладают одинаковыми характеристиками обнаружения ошибок по кратностям (необходимо отметить, что по видам они отличаются);
- наиболее эффективными из всех кодов с суммированием с нечетными весовыми коэффициентами среди всех семейств кодов с одинаковым разбиением m_1/m_2 для данного значения m являются коды с «половинным» разбиением информационных символов; увеличение разницы между числами m_1 и m_2 влечет за собой увеличение числа необнаруживаемых ошибок;
- коды с суммированием со значениями весовых коэффициентов $[w^1/w^2] = 1/1$ вне зависимости от выбранного разбиения m_1/m_2 и значения m обнаруживают любые двух- и

Таблица 3. Характеристика необнаруживаемых симметричных ошибок

Код	Распределение необнаруживаемых симметричных ошибок по кратностям d				
	2	4	6	8	10
5/5-[1/1]	10 240	29 440	19 200	3800	0
5/5-[1/2]	8192	17 664	7680	760	0
5/5-[1/3]	8192	17 664	7680	760	0
5/5-[2/2]	6144	9984	4608	920	64
5/5-[2/3]	6144	9984	2304	152	0
5/5-[3/3]	6144	12 032	6400	2200	0
4/6-[1/1]	10 752	29 184	20 480	3240	132
4/6-[1/2]	8192	17 664	7680	760	0
4/6-[1/3]	8192	17 664	7680	760	0
4/6-[2/2]	6656	9600	4800	960	0
4/6-[2/3]	6656	9600	2880	0	0
4/6-[3/3]	6656	11 520	7360	1640	120
3/7-[1/1]	12 288	29 568	22 400	3360	0
3/7-[1/2]	9216	17 280	8960	480	0
3/7-[1/3]	9216	17 280	8960	480	0
3/7-[2/2]	8192	9600	4160	1120	60
3/7-[2/3]	8192	9600	3200	160	0
3/7-[3/3]	8192	11 136	8320	1600	0
2/8-[1/1]	14 848	34 048	22 400	4760	140
2/8-[1/2]	11 264	18 816	8960	1120	0
2/8-[1/3]	11 264	18 816	8960	1120	0
2/8-[2/2]	10 752	13 440	2240	0	0
2/8-[2/3]	10 752	13 440	2240	0	0
2/8-[3/3]	10 752	14 336	6720	2520	112

Таблица 4. Характеристика необнаруживаемых асимметричных ошибок

Код	Распределение необнаруживаемых асимметричных ошибок по кратностям d							
	3	4	5	6	7	8	9	10
5/5-[1/1]	0	0	0	6400	0	2400	0	0
5/5-[1/2]	1536	0	15 872	2560	9760	480	1280	0
5/5-[1/3]	0	12 288	0	17 280	0	5600	0	0
5/5-[2/2]	3072	0	19 456	6528	5952	2400	512	192
5/5-[2/3]	1536	8192	14 336	7808	10 144	1120	1280	0
5/5-[3/3]	0	16 384	0	18 944	0	4192	0	0
4/6-[1/1]	0	0	0	6912	0	2016	0	124
4/6-[1/2]	2560	0	17 920	2560	10 080	480	1280	0
4/6-[1/3]	0	12 800	0	19 520	0	4576	0	254
4/6-[2/2]	3328	0	17 920	5760	7440	2880	0	0
4/6-[2/3]	768	8960	10 560	9120	11 280	768	756	0
4/6-[3/3]	0	17 152	0	19 520	0	3712	0	136
3/7-[1/1]	0	0	0	8064	0	2016	0	0
3/7-[1/2]	3840	0	19 200	3072	12 016	288	768	0
3/7-[1/3]	0	14 848	0	21 312	0	4896	0	0
3/7-[2/2]	4096	0	15 360	3552	7936	2976	512	194
3/7-[2/3]	256	11 776	4992	9152	8720	1632	1768	0
3/7-[3/3]	0	19 456	0	20 992	0	3680	0	0
2/8-[1/1]	0	0	0	9856	0	2912	0	116
2/8-[1/2]	5376	0	23 296	3584	12 432	672	1792	0
2/8-[1/3]	0	19 712	0	22 624	0	6560	0	256
2/8-[2/2]	5376	0	17 920	1344	3472	0	0	0
2/8-[2/3]	0	17 920	0	11 424	0	512	0	0
2/8-[3/3]	0	23 296	0	23 744	0	4992	0	144

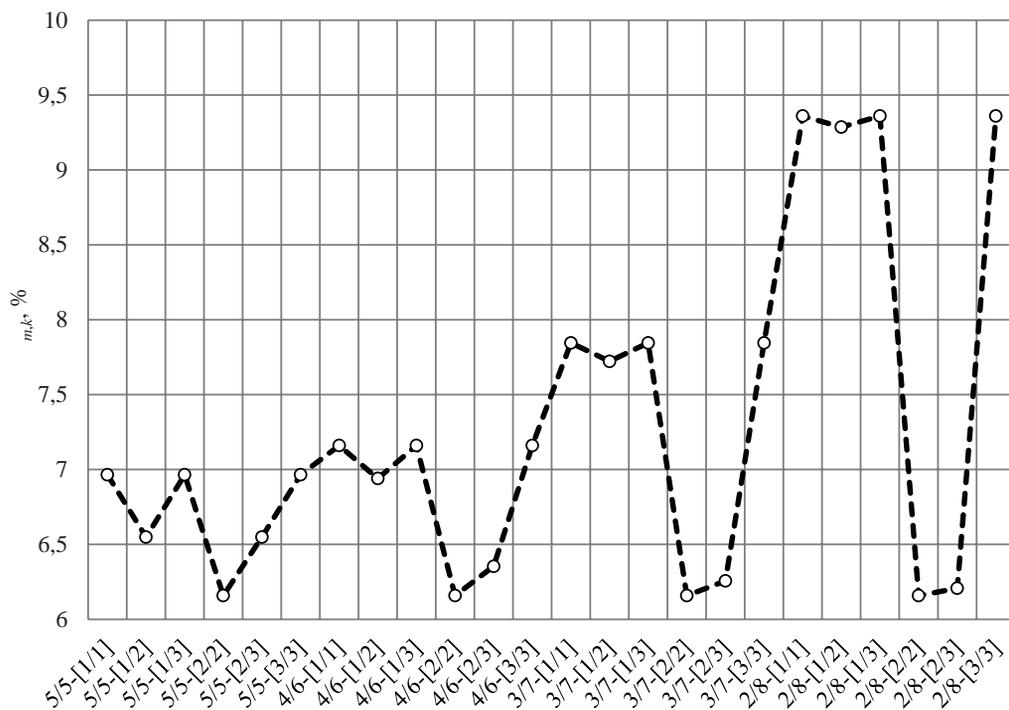


Рис. 1. Значения показателя $\gamma_{m,k} \%$

Таблица 5. Относительные показатели обнаружения ошибок $TMW(m, k)$ -кодами

Код	$U_{m,k}$ %	$\sigma_{m,k}$ %	$\alpha_{m,k}$ %	$\gamma_{m,k}$ %	$\xi_{m,k}$ %	$\beta_{m,2}$ %	$\beta_{m,3}$ %	$\beta_{m,4}$ %
5/5-[1/1]	2,029	85,91	12,061	6,965	88,421	22,222	0	14,286
5/5-[1/2]	4,116	49,988	45,896	6,549	94,03	17,778	2,5	8,571
5/5-[1/3]	4,792	47,006	48,202	6,965	88,421	22,222	0	14,286
5/5-[2/2]	7,254	33,668	59,078	6,158	100	13,333	5	4,762
5/5-[2/3]	8,174	27,087	64,739	6,549	94,03	17,778	2,5	8,571
5/5-[3/3]	9,134	36,699	54,167	6,965	88,421	22,222	0	14,286
4/6-[1/1]	2,89	85,042	12,068	7,16	86,007	23,333	0	14,524
4/6-[1/2]	4,853	47,172	47,975	6,94	88,732	17,778	4,167	8,571
4/6-[1/3]	4,749	45,723	49,528	7,16	86,007	23,333	0	14,524
4/6-[2/2]	8,011	34,127	57,862	6,158	100	14,444	5,417	4,762
4/6-[2/3]	7,831	28,75	63,419	6,354	96,923	20	1,25	8,929
4/6-[3/3]	9,588	36,391	54,021	7,16	86,007	23,333	0	14,524
3/7-[1/1]	5,452	82,282	12,266	7,845	78,505	26,667	0	15,833
3/7-[1/2]	7,14	44,422	48,438	7,722	79,747	20	6,25	8,929
3/7-[1/3]	6,308	43,731	49,961	7,845	78,505	26,667	0	15,833
3/7-[2/2]	10,469	35,857	53,674	6,158	100	17,778	6,667	5,357
3/7-[2/3]	9,29	32,275	58,435	6,256	98,438	24,444	0,417	10,833
3/7-[3/3]	10,709	35,592	53,699	7,845	78,505	26,667	0	15,833
2/8-[1/1]	9,146	77,713	13,141	9,36	65,796	32,222	0	20
2/8-[1/2]	10,247	41,283	48,47	9,286	66,316	24,444	8,75	10,833
2/8-[1/3]	8,91	40,959	50,131	9,36	65,796	32,222	0	20
2/8-[2/2]	15,451	40,972	43,577	6,158	100	23,333	8,75	8,333
2/8-[2/3]	13,435	40,65	45,915	6,207	99,213	31,111	0	16,667
2/8-[3/3]	11,659	35,126	53,215	9,36	65,796	32,222	0	20

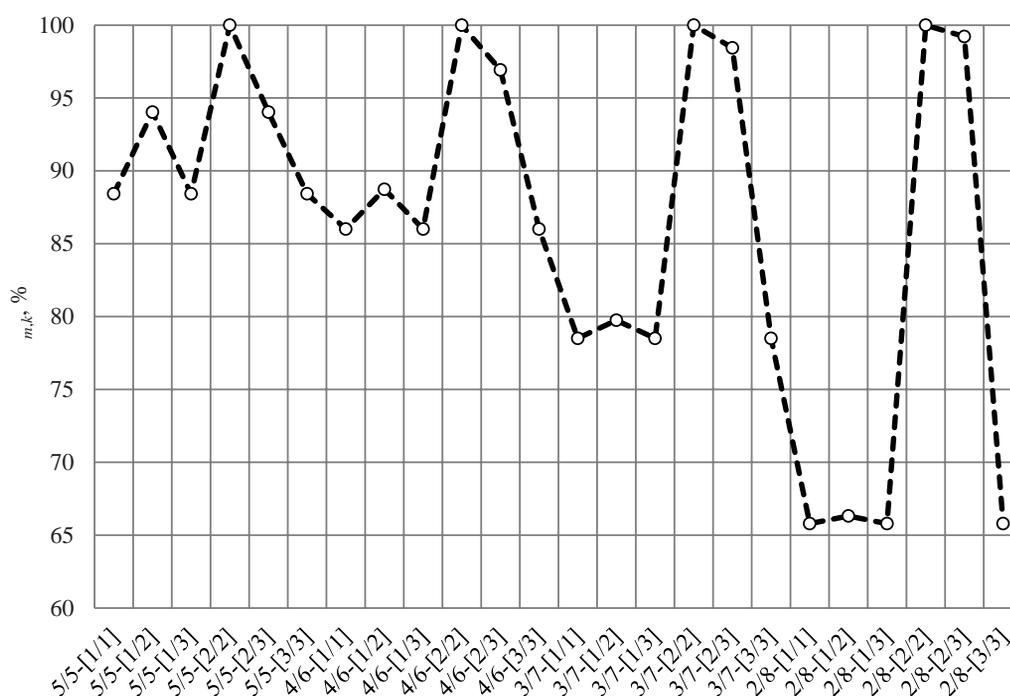


Рис. 2. Значения показателя $\xi_{m,k}$ %

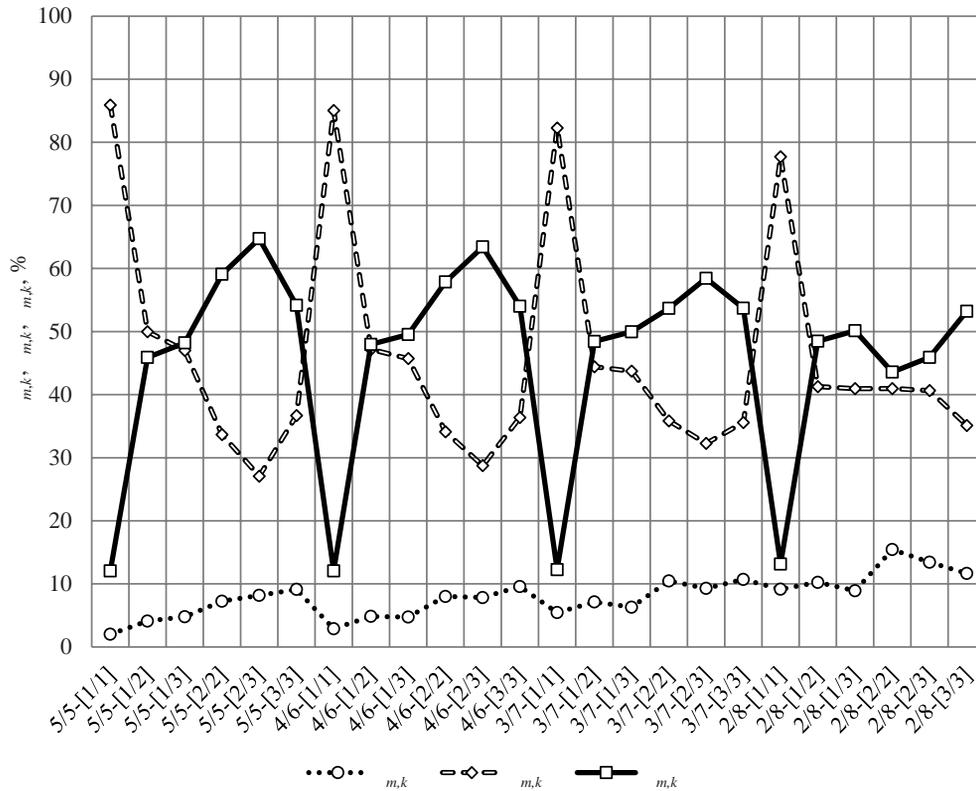


Рис. 3. Значения показателей $v_{m,k}$, $\sigma_{m,k}$, $\alpha_{m,k}$, %

трехкратные монотонные ошибки, также они обнаруживают любые асимметричные ошибки с кратностями $d < 6$;

- коды с суммированием со значениями весовых коэффициентов $[w^1/w^2] = 1/2$ и $[w^1/w^2] = 2/2$ вне зависимости от выбранного разбиения m_1/m_2 и длины t информационного вектора обнаруживают любые двукратные монотонные ошибки;
- коды с суммированием со значениями весовых коэффициентов взвешиваемых символов в каждом из подвекторов $\langle D_1 \rangle$ и $\langle D_2 \rangle$, равными 2, обнаруживают наибольшее количество ошибок при установленных значениях t и k (имеют значение коэффициента эффективности $\xi_{m,k} = 100$ %);
- коды с суммированием со значениями весовых коэффициентов взвешиваемых символов в каждом из подвекторов $\langle D_1 \rangle$ и $\langle D_2 \rangle$, равными 2, наиболее эффективно обнаруживают двукратные ошибки среди остальных кодов для данного разбиения m_1/m_2 ;
- вне зависимости от разбиения и числа t коды с суммированием с нечетными весовыми коэффициентами обнаруживают любые ошибки с нечетными кратностями.

Заключение

Двухмодульные взвешенные коды могут строиться при произвольном разбиении информационных символов на два подмножества. При этом должно обязательно выполняться условие построения помехозащищенного кода, указанное в формуле (1). Рассмотренные в статье двухмодульные коды строились также без пересечений подмножеств информационных символов D_1 и D_2 , что позволило построить семейства кодов с постоянными значениями m_1/m_2 без повторного учета символов в разных информационных подвекторах. Взвешивание даже одного из символов каждого подвектора числом $w_i > 1, i \in \mathbb{N}$ приводит к изменению распределения необнаруживаемых ошибок по видам и кратностям. При этом вне зависимости от числа t и вида разбиения m_1/m_2 всем двухмодульным взвешенным кодам присущи общие закономерности. Их учет целесообразен при синтезе цифровых вычислительных устройств и систем, обладающих контролепригодными и самопроверяемыми структурами.

В качестве развития рассматриваемых в статье $TMW(m, k)$ -кодов можно указать возможности исследования кодов с произвольными

весовыми коэффициентами для каждого из подмножеств D_1 и D_2 , а также построения кодов с произвольными значениями модулей для каждого из подмножеств. Кроме того, следует обратить внимание на направление исследования характеристик двухмодульных кодов при технической диагностике цифровых устройств с различными моделями неисправностей и возможностей их применения при реализации блоков и подсистем критического применения [35, 36].

Следует также отметить, что в данной статье обойден стороной вопрос синтеза кодеров $TMW(m, k)$ -кодов, так как для решения этой задачи эффективно используются методы, описанные в [21, 22]. Настоящее же исследование затрагивает общие свойства кодов, поэтому не характеризует никак элементную базу, на которой реализуются их кодеры. Это позволяет считать полученные результаты универсальными и применимыми достаточно широко на практике в настоящее время и в будущем при совершенствовании элементной базы вычислительных систем. ▲

Библиографический список

- Lala P. K. Self-Checking and Fault-Tolerant Digital Design / P. K. Lala. — San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001. — 216 p.
- Berger J. M. A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels / J. M. Berger // Information and Control. — 1961. — Vol. 4. — Iss. 1. — Pp. 68–73. — DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
- Ryan W. E. Channel Codes: Classical and Modern / W. E. Ryan, S. Lin. — Cambridge University Press, 2009, 708 p.
- Fujiwara E. Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications / E. Fujiwara // John Wiley & Sons. — 2006. — 720 p.
- Berger J. M. A Note on Burst Detection Sum Codes / J. M. Berger // Information and Control. — 1961. — Vol. 4. — Iss. 2-3. — Pp. 297–299. — DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80024-7.
- Das D. Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multilevel Circuits / D. Das, N. A. Touba // Proceedings of 17th IEEE Test Symposium, California. — USA, 1999. — Pp. 370–376. — DOI: 10.1109/VTEST.1999.766691.
- Дмитриев В. В. О двух способах взвешивания и их влиянии на свойства кодов с суммированием взвешенных переходов в системах функционального контроля логических схем / В. В. Дмитриев // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2015. — № 3. — С. 119–129.
- Сапожников В. В. Взвешенные коды с суммированием для организации контроля логических устройств / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Электронное моделирование. — 2014. — Т. 36. — № 1. — С. 59–80.
- Efanov D. V. Using Codes with Summation of Weighted Bits to Organize Checking of Combinational Logical Devices / D. V. Efanov, V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov // Automatic Control and Computer Sciences. — 2019. — Vol. 53. — Iss. 1. — Pp. 1–11. — DOI: 10.3103/S0146411619010061.
- Das D. Low Cost Concurrent Error Detection Based on Modulo Weight-Based Codes / D. Das, N. A. Touba, M. Seuring et al. // Proceedings of the IEEE 6th International On-Line Testing Workshop (IOLTW), Spain, Palma de Mallorca, July 3–5, 2000. — Pp. 171–176. — DOI: 10.1109/OLT.2000.856633.
- Сапожников В. В. Универсальные структуры двоичных счетчиков единиц по произвольному модулю счета / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. И. Ургансков // Электронное моделирование. — 2002. — Т. 24. — № 4. — С. 65–81.
- Сапожников В. В. Блочная структура двоичного счетчика единиц по произвольному модулю счета / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. И. Ургансков // Электронное моделирование. — 2005. — Т. 27. — № 4. — С. 65–81.
- Saposhnikov V. V. Composite Structure of Binary Counter of Ones Arbitrary Modulo / V. V. Saposhnikov, Vl. V. Saposhnikov, D. I. Urganskov // Proceedings of East-West Design & Test Workshop (EWDTW'05), 15–19 September 2005, Odessa, Ukraine. — Pp. 102–106.
- Saposhnikov V. V. Multistage Regular Structure of Binary Counter of Ones Arbitrary Modulo / V. V. Saposhnikov, Vl. V. Saposhnikov, D. I. Urganskov // Proceedings of East-West Design & Test Workshop (EWDTW'06), 15–19 September 2006, Sochi, Russia. — Pp. 287–290.
- Lin S.-H. VLSI Design of Diminished-One Modulo $2^n + 1$ Adder Using Circular Carry Selection / S.-H. Lin, M.-H. Sheu // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. — 2008. — Vol. 55. — Iss. 9. — Pp. 897–901. — DOI: 10.1109/TCSII.2008.923413.
- Bibilo P. N. Automated Design of Modular Arithmetic Devices: Might CAD Replace an Engineer / P. N. Bibilo, D. A. Gorodetskii // Automatic Control and Computer Sciences. — 2009. — Vol. 43. — Iss. 2. — Pp. 63–73. — DOI: 10.3103/S0146411609020023.
- Suprun V. P. Single-Level Schematic Realization of Basic Operations of Modular Arithmetic in Unitary Codes / V. P. Suprun // Automatic Control and Computer Sciences. — 2011. — Vol. 45. — Iss. 2. — Pp. 70–79. — DOI: 10.3103/S0146411611020088.
- Тельпухов Д. В. Особенности проектирования модулярных умножителей с помощью современных САПР / Д. В. Тельпухов, Р. А. Соловьев, Е. С. Балака и др. // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). — 2016. — № 1. — С. 249–254.
- Соловьев Р. А. Применение методов модулярной арифметики при разработке аппаратных реализаций нейронных сетей / Р. А. Соловьев, Д. В. Тельпухов, А. Г. Кустов и др. // Информационные технологии. — 2019. — Т. 25. — № 12. — С. 747–756.
- Telpukhov D. V. Hardware Implementation of Scaling in Residue Number System in Application to Convolutional

- Neural Networks / D.V.Telpukhov, R.A. Solovyev, I. A. Mkrtchan // Materials of the International Scientific-Practical Conference "Information Innovative Technologies", Prague, 20–24 April 2020. — Pp. 165–169.
21. Сапожников В. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. — Т. 1: Классические коды Бергера и их модификации. — М.: Наука, 2020. — 383 с.
 22. Сапожников В. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. — Т. 2: Взвешенные коды с суммированием. — М.: Наука, 2021. — 455 с.
 23. Сапожников В. В. Модульно-взвешенные коды с суммированием с наименьшим общим числом необнаруживаемых ошибок в информационных векторах / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // Электронное моделирование. — 2017. — Т. 39. — № 4. — С. 69–88.
 24. Ефанов Д. В. Теория и методы функционального диагностирования логических устройств железнодорожной автоматики и телемеханики на основе использования помехоустойчивых кодов с суммированием: дисс. ... д-ра техн. наук / Д. В. Ефанов. — СПб., 2017. — В двух томах: Т. 1: Основное содержание работы. — 316 с. — Т. 2: Приложения. — 112 с.
 25. Sogomonyan E. S. Design of Self-Testing and On-Line Fault Detection Combinational Circuits with Weakly Independent Outputs / E. S. Sogomonyan, M. Gössel // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. — 1993. — Vol. 4. — Iss. 4. — Pp. 267–281. — DOI: 10.1007/BF00971975.
 26. Busaba F. Y. Self-Checking Combinational Circuit Design for Single and Unidirectional Multibit Errors / F. Y. Busaba, P. K. Lala // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. — 1994. — Vol. 5. — Iss. 5. — Pp. 19–28. — DOI: 10.1007/BF00971960.
 27. Morosow A. Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs / A. Morosow, V. V. Sapozhnikov, V. V. Sapozhnikov et al. // VLSI Design. — 1998. — Vol. 5. — Iss. 4. — Pp. 333–345. — DOI: 10.1155/1998/20389.
 28. Göessel M. New Methods of Concurrent Checking: Edition 1 / M. Göessel, V. Ocheretny, E. Sogomonyan et al. — Dordrecht: Springer Science + Business Media B. V., 2008. — 184 p.
 29. Matrosova A. Yu. Self-Checking Synchronous FSM Network Design with Low Overhead / A. Yu. Matrosova, I. Levin, S. A. Ostanin // VLSI Design. — 2000. — Vol. 11. — Iss. 1. — Pp. 47–58. — DOI: 10.1155/2000/46578.
 30. Mehov V. Concurrent Error Detection Based on New Code with Modulo Weighted Transitions between Information Bits / V. Mehov, V. Sapozhnikov, V. Sapozhnikov et al. // Proceedings of 7th IEEE East-West Design & Test Workshop (EWDTW'2007), Erevan, Armenia, September 25–30, 2007. — Pp. 21–26.
 31. Мехов В. Б. Контроль комбинационных схем на основе модифицированных кодов с суммированием / В. Б. Мехов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 8. — С. 153–165.
 32. Efanov D. Generalized Algorithm of Building Summation Codes for the Tasks of Technical Diagnostics of Discrete Systems / D. Efanov, V. Sapozhnikov, V. Sapozhnikov // Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTW'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 — October 2, 2017. — Pp. 365–371. — DOI: 10.1109/EWDTW.2017.8110126.
 33. Ефанов Д. В. Двухмодульные взвешенные коды с суммированием в кольце вычетов по модулю $M=4$ / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Труды СПИИРАН. — 2020. — Т. 19. — № 3. — С. 674–713. — DOI: 10.15622/sp.2020.19.3.8.
 34. Efanov D. V. Two-Modulus Codes with Summation of One-Data Bits for Technical Diagnostics of Discrete Systems / D. V. Efanov, V. V. Sapozhnikov, V. V. Sapozhnikov // Automatic Control and Computer Sciences. — 2018. — Vol. 52. — Iss. 1. — Pp. 1–12. — DOI: 10.3103/S0146411618010029.
 35. Drozd A. Checkability of the Digital Components in Safety-Critical Systems: Problems and Solutions / A. Drozd, V. Kharchenko, S. Antoshchuk et al. // Proceedings of 9th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTW'2011), Sevastopol, Ukraine, 2011. — Pp. 411–416. — DOI: 10.1109/EWDTW.2011.6116606.
 36. Drozd O. Resilient Development of Models and Methods in Computing Space / O. Drozd, A. Rucinski, K. Zashcholkin et al. // Proceedings of 19th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTW'2021), Batumi, Georgia, September 10–13, 2021. — Pp. 70–75. — DOI: 10.1109/EWDTW52692.2021.9581002.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 4, pp. 377–389
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-04-377-389

Research of Two-Modulus Weighted Codes with Summation Involving Arbitrary Partitions of Several Data Symbols

Information about authors

Efanov D. V., Doctor in Engineering, Associate Professor, IEEE Member, Full-member of International Transport Academy, General Director Deputy on Scientific Research Work¹, Professor^{2,3,4}. E-mail: TrES-4b@yandex.ru

Timoshenko M. V., Master's Degree Student². E-mail: timych180@gmail.com

Sivachenko L. A., Doctor in Engineering, Professor, Academician of the Belarusian Engineering Academy, Professor⁵. E-mail: 228011@mail.ru

Leskovets I. V., PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department⁵. E-mail: le@bru.by

¹Scientific Research and Design Institute "Transport and Construction Safety" LLC, Saint Petersburg

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

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

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

⁵Belarusian-Russian University, Department of Transport and Technological Machines, Mogilev

Abstract: A method has been proposed for constructing two-modulus sum codes that are suitable for solving the synthesis problems of self-checking digital computing devices and systems, as well as the technical means of their diagnostics. In the process of constructing a code, a set of data symbols is divided into two subsets, forming separate vectors for which the total weight is calculated according to a predetermined modulus.

Beforehand, in each of the selected vectors, one of the data symbols is weighted with a coefficient from a natural series. Codes obtained with different values of weight coefficients and modulus for determining the total weight form a separate family of uniform binary codes with a fixed number of check symbols. The article provides an example of constructing a sum codes in the ring of residues modulus $M = 4$. Using this modulus enables the construction of a two-modulus code with $k = 4$ check symbols for any value of the m number of data symbols. As the value of m increases, the relationship between the number of data symbols and check symbols will change significantly, and the resulting code will have low redundancy. This is important when using the considered class of codes in the construction of digital devices. Previously unknown properties of the discussed class of sum codes have been identified, and taking these into account is beneficial when addressing problems related to the synthesis and technical diagnostics of digital devices.

Keywords: controllable systems; self-checking systems; sum codes; Berger code; weight-based sum codes; errors detection in data vectors; undetectable error; detection of unidirectional errors; code properties.

References

- Lala P. K. Self-Checking and Fault-Tolerant Digital Design. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001, 216 p.
- Berger J. M. A Note on Error Detection Codes for Asymmetric Channels. *Information and Control*, 1961, vol. 4, Iss. 1, pp. 68–73. DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80037-5.
- Ryan W. E., Lin S. Channel Codes: Classical and Modern. Cambridge University Press, 2009, 708 p.
- Fujiwara E. Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. John Wiley & Sons, 2006, 720 p.
- Berger J. M. A Note on Burst Detection Sum Codes. *Information and Control*, 1961, vol. 4, Iss. 2-3, pp. 297–299. DOI: 10.1016/S0019-9958(61)80024-7.
- Das D., Touban N. A. Weight-Based Codes and Their Application to Concurrent Error Detection of Multilevel Circuits. *Proceedings of 17th IEEE Test Symposium, California, USA, 1999*, pp. 370–376. DOI: 10.1109/VTEST.1999.766691.
- Dmitriev V. V. O dvukh sposobakh vzyvsheniya i ikh vliyaniy na svoystva kodov s summirovaniem vzyvshennykh perekhodov v sistemakh funktsional'nogo kontrolya logicheskikh skhem [About two methods of weighing and their influence on the properties of codes with weighted transitions summation in functional control systems of logical circuits]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2015, Iss. 3, pp. 119–129. (In Russian)
- Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V. Vzveshennyye kody s summirovaniem dlya organizatsii kontrolya logicheskikh ustroystv [Weighted codes with summation for the organization of control of logical devices]. *Elektronnoe modelirovaniye* [Electronic modeling]. 2014, vol. 36, Iss. 1, pp. 59–80. (In Russian)
- Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. Using Codes with Summation of Weighted Bits to Organize Checking of Combinational Logical Devices. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2019, vol. 53, Iss. 1, pp. 1–11. DOI: 10.3103/S0146411619010061.
- Das D., Touban N. A., Seuring M. et al. Low Cost Concurrent Error Detection Based on Modulo Weight-Based Codes. *Proceedings of the IEEE 6th International On-Line Testing Workshop (IOLTW)*, Spain, Palma de Mallorca, July 3–5, 2000, pp. 171–176. DOI: 10.1109/OLT.2000.856633.
- Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Urganskov D. I. Universal'nyye struktury dvoichnykh schetchikov yedinit po proizvol'nomu modulyu scheta [Universal structures of binary unit counters for arbitrary counting modules]. *Elektronnoe modelirovaniye* [Electronic Modeling]. 2002, vol. 24, Iss. 4, pp. 65–81. (In Russian)
- Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Urganskov D. I. Blochnaya struktura dvoichnogo schetchika yedinit po proizvol'nomu modulyu scheta [Block structure of binary unit counters for arbitrary counting modules]. *Elektronnoe modelirovaniye* [Electronic Modeling]. 2005, vol. 27, Iss. 4, pp. 65–81. (In Russian)
- Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Urganskov D. I. Composite Structure of Binary Counter of Ones Arbitrary Modulo. *Proceedings of East-West Design & Test Workshop (EWDTW'05)*, 15–19 September 2005, Odessa, Ukraine, pp. 102–106.
- Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Urganskov D. I. Multistage Regular Structure of Binary Counter of Ones Arbitrary Modulo. *Proceedings of East-West Design & Test Workshop (EWDTW'06)*, 15–19 September 2006, Sochi, Russia, pp. 287–290.
- Lin S.-H., Sheu M.-H. VLSI Design of Diminished-One Modulo $2^n + 1$ Adder Using Circular Carry Selection. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2008, vol. 55, Iss. 9, pp. 897–901. DOI: 10.1109/TCSII.2008.923413.
- Bibilo P. N., Gorodetskii D. A. Automated Design of Modular Arithmetic Devices: Might CAD Replace an Engineer. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2009, vol. 43, Iss. 2, pp. 63–73. DOI: 10.3103/S0146411609020023.
- Suprun V. P. Single-Level Schematic Realization of Basic Operations of Modular Arithmetic in Unitary Codes. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2011, vol. 45, Iss. 2, pp. 70–79. DOI: 10.3103/S0146411611020088.
- Tel'pukhov D. V. Osobennosti proektirovaniya modularnykh umnozhitel'ei s pomoshch'yu sovremennykh SAPR [Features of designing modular multipliers using modern CAD systems]. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem* (MES) [Problems of developing advanced micro- and nanoelectronic systems (MES)]. 2016, Iss. 1, pp. 249–254. (In Russian)
- Solov'ev R. A. Primeneniye metodov modular'noi arifmetiki pri razrabotke apparatnykh realizatsii neironnykh setei [Application of modular arithmetic methods in the development of hardware implementations of neural networks]. *Informatsionnyye tekhnologii* [Information technologies]. 2019, vol. 25, Iss. 12, pp. 747–756. (In Russian)
- Telpukhov D. V., Solovyev R. A., Mkrtyan I. A. Hardware Implementation of Scaling in Residue Number System in Application to Convolutional Neural Networks. *Materials of the International Scientific-Practical Conference "Information Innovative Technologies"*, Prague, 20–24 April 2020, pp. 165–169.
- Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V. *Kody s summirovaniem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. T. 1: Klassicheskie kody Bergera i ikh modifikatsii* [Codes with summation for technical diagnostic systems. Vol. 1: Classical Berger codes and their modifications]. Moscow: Nauka Publ., 2020, 383 p. (In Russian)
- Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V. *Kody s summirovaniem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya. T. 1: Klassicheskie kody Bergera i ikh modifikatsii* [Codes with summation for technical diagnostic systems. Vol. 2: Weighted codes with summation]. Moscow: Nauka Publ., 2021, 455 p. (In Russian)
- Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I., Efanov D. V. Modul'no-vzveshennyye kody s summirovaniem s naimen'shim obshchim chislom neobnaruzhivaemykh oshibok v informatsionnykh vektorakh [Module-weighted codes with summation with the least common number of undetectable errors in information vectors]. *Elektronnoe modelirovaniye* [Electronic Modeling]. 2017, vol. 39, Iss. 4, pp. 69–88. (In Russian)
- Efanov D. V. *Teoriya i metody funktsional'nogo diagnostirovaniya logicheskikh ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki na osnove ispol'zovaniya pomekhoustoychivyykh kodov s summirovaniem: disc. ... d-ra tekhn. nauk* [Theory and methods of functional diagnostics of logical devices of railway automation and telemechanics based on the use of error-correcting codes with summation: Dr. Eng. Sci. thesis]. St. Petersburg, 2017, in two volumes: vol. 1: Main content of the work, 316 p. vol. 2: Applications, 112 p. (In Russian)
- Sogomonyan E. S., Gössel M. Design of Self-Testing and On-Line Fault Detection Combinational Circuits with Weakly Independent Outputs. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1993, vol. 4, Iss. 4, pp. 267–281. DOI: 10.1007/BF00971975.
- Busaba F. Y., Lala P. K. Self-Checking Combinational Circuit Design for Single and Unidirectional Multibit Errors. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1994, vol. 5, Iss. 5, pp. 19–28. DOI: 10.1007/BF00971960.
- Morosov A., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. I. et al. Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs. *VLSI Design*, 1998, vol. 5, Iss. 4, pp. 333–345. DOI: 10.1155/1998/20389.

28. Gössel M., Ocheretny V., Sogomonyan E. et al. *New Methods of Concurrent Checking: Edition 1*. Dordrecht: Springer Science + Business Media B. V., 2008, 184 p.
29. Matrosova A. Yu., Levin I., Ostanin S. A. Self-Checking Synchronous FSM Network Design with Low Overhead. *VLSI Design*, 2000, vol. 11, Iss. 1, pp. 47–58. DOI: 10.1155/2000/46578.
30. Mehov V., Sapozhnikov V., Sapozhnikov VI. et al. Concurrent Error Detection Based on New Code with Modulo Weighted Transitions between Information Bits. *Proceedings of 7th IEEE East-West Design & Test Workshop (EWDWTW '2007)*, Erevan, Armenia, September 25–30, 2007, pp. 21–26.
31. Mexov V. B. Model' vzaimodeystviya zheleznodorozhnogo i morskogo transporta dlya povysheniya effektivnosti mul'timodal'nykh perevozok [Model of interaction between railway and sea transport to improve the efficiency of multimodal transportation]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2008, Iss. 3(40), pp. 9–15. (In Russian)
32. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov VI. Generalized Algorithm of Building Summation Codes for the Tasks of Technical Diagnostics of Discrete Systems. *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29 — October 2, 2017, pp. 365–371. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110126.
33. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov VI. Dvukhmodul'nye vzveshennye kody s summirovaniem v kol'tse vychetov po modulyu $M = 4$ [Two-module weighted codes with summation in the residue ring modulo $M = 4$]. *Trudy SPIIRAN* [Proceedings of SPIIRAN]. 2020, vol. 19, Iss. 3, pp. 674–713. DOI: 10.15622/sp.2020.19.3.8. (In Russian)
34. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V. Two-Modulus Codes with Summation of One-Data Bits for Technical Diagnostics of Discrete Systems. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2018, vol. 52, Iss. 1, pp. 1–12. DOI: 10.3103/S0146411618010029.
35. Drozd A., Kharchenko V., Antoshchuk S. et al. Checkability of the Digital Components in Safety-Critical Systems: Problems and Solutions. *Proceedings of 9th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2011)*, Sevastopol, Ukraine, 2011, pp. 411–416. DOI: 10.1109/EWDTS.2011.6116606.
36. Drozd O., Rucinski A., Zashcholkin K. et al. Resilient Development of Models and Methods in Computing Space. *Proceedings of 19th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2021)*, Batumi, Georgia, September 10–13, 2021, pp. 70–75. DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581002.