



Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

АВТОМАТИКА НА ТРАНСПОРТЕ








TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH

Том 9 Сентябрь 2023 № 3



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

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

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 08.09.2023. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 10,5. 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>Швалов Д. В.</i> Способы контроля выполнения шунтового эффекта рельсовых цепей229
Издатель ООО «Издательский Центр «РИОР» по договору № ЭА94514 от 19.12.2022	ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ <i>Баранов Л. А., Анохин А. С., Жеребятин И. А., Чжан Юнцян</i> Прогноз случайных процессов, при наличии единичных возмущений в интеллектуальных транспортных системах.....239
Главный редактор А. Б. Никитин, д-р техн. наук, профессор ПГУПС, заведующий кафедрой	<i>Дятлов В. В., Трунаев А. М.</i> Повышение экономической эффективности предприятий пассажирского транспорта моделированием трафика247
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>Грачев В. В., Федотов М. В.</i> Повышение качества обучения эталонных диагностических моделей сложных технических объектов аугментацией обучающих данных.....258
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>Гончарова Н. А.</i> Метод нахождения динамических приоритетов грузовых операций для оптимизации работы самоходных подвижных единиц в железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах274
Адрес издателя 127214, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1, оф. 402	ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ СИСТЕМЫ <i>Ефанов Д. В., Зуева М. В., Пашуков А. В.</i> Исследование характеристик обнаружения ошибок кодами Хэмминга, учет которых целесообразен при синтезе самопроверяемых устройств автоматики283
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 © ФГБОУ ВО ПГУПС, 2023	В ПОРЯДКЕ ДИСКУССИИ <i>Кушпиль И. В., Мусеев В.В.</i> Анализ состояния инфраструктуры систем сигнализации, централизации и блокировки Мурманского региона Октябрьской железной дороги298

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>Shvalov D. V.</i> Methods of Monitoring the Fulfillment of the Shunt Effect of Track Circuits238
PUBLISHER "Publishing Center "RIOR", LLC № ЭА94514, 19.12.2022	INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS <i>Baranov L. A., Anokhin A. S., Zherebyatin I. A., Zhang Yongqiang,</i> Forecasting Random Processes in Intelligent Transport Systems with Singular Perturbations245
EDITOR-IN-CHIEF Nikitin A. B., Doctor in Engineering, Professor, Head of Department	<i>Dyatlov V. V., Trunaev A. M.</i> Increasing the Economic Efficiency of Passenger Transport Enterprises by Traffic Modeling257
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>Grachev V. V., Fedotov M. V.</i> Improving the Training Quality of Reference Diagnostic Models of Complex Technical Objects by Augmentation of Training Data273
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>Goncharova N. A.</i> Method for Assigning Dynamic Priorities of Freight Operations for Optimizing the Traction Rolling Stock Using in Railway Industrial Transport and Technological Systems281
PUBLISHER'S ADDRESS 127214, Russia, Moscow, Polyarnaya str., 31Bc1, of. 402	TECHNICAL DIAGNOSTICS AND CONTROLLABLE SYSTEMS <i>Efanov D. V., Zueva M. V., Pashukov A. V.</i> Study of the Characteristics of Error Detection with Hamming Codes, the Consideration of Which is Appropriate for the Synthesis of Self-Checking Automatic Devices296
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	DISCUSSION <i>Kushpil I. V., Moiseev V. V.</i> Analysis of the State of Automation and Remote Control Systems Infrastructure in the Murmansk Region of the Oktyabrskaya Railway306

СПОСОБЫ КОНТРОЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ШУНТОВОГО ЭФФЕКТА РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ

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

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

Значение переходного сопротивления «колесо — рельс» является определяющим фактором для обеспечения шунтового эффекта рельсовых цепей. Учитывая тяжесть последствий необеспечения шунтового эффекта — аварии или крушения поездов из-за перевода стрелки под составом или открытия светофора, ограждающего занятый участок пути, необходим непрерывный мониторинг состояния рельсовых цепей (шунтовой чувствительности) с целью своевременного выявления критических значений дестабилизирующих факторов или условий функционирования. В статье рассмотрены способы автоматизации измерений сопротивления поездного шунта и способы предотвращения потери шунта (невыполнения шунтового эффекта) занятой рельсовой цепью, а также исследована возможность реализации непрерывного мониторинга выполнения шунтового эффекта (мониторинга шунтовой чувствительности) на основе модели изменения значений их параметров в процессе движения подвижных единиц по рельсовой линии. Полученные результаты могут быть использованы для решения таких аналитических и практических задач, как: расчет и исследование динамики изменения коэффициента чувствительности рельсовой цепи к фактическому поездному шунту; построение инвариантного к внешним возмущениям классификатора состояний рельсовой цепи в процессе движения поезда от момента вступления до момента освобождения рельсовой линии; организация непрерывного мониторинга шунтовой чувствительности рельсовой цепи.

Ключевые слова: рельсовая цепь; шунтовая чувствительность; модель рельсовой цепи; выполнение шунтового эффекта; технология обслуживания.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-03-229-238

▼ Введение

Значение переходного сопротивления «колесо — рельс» существенно увеличивается из-за возникновения непроводящего слоя на головках рельсов (песок, цемент, ржавчина, загрязнение, обледенение, напрессовка снега, налипание растительности) или на поверхностях колес (ржавчина, битум, мазут). Причинами возникновения непроводящего слоя могут быть, например, использование песка для улучшения сцепления колес с рельсами в момент трогания локомотива, образование на поверхностях головок рельсов изолирующей пленки при сильных морозах [1], образование на поверхностях головок рельсов изолирующего слоя вследствие высыпания или выливания из вагонов перевозимых грузов при высоких скоростях движения или неисправных вагонов, попадание на головки рельсов грязи из-за чрезмерного загрязнения балласта [2]. Отступления от норм содержания рельсовых цепей в части необеспечения шунтового эффекта приводят к крушениям поездов из-за перевода стрелки под составом или открытия светофора,

ограждающего занятый участок пути. При скоростном (высокоскоростном) движении возникают аналогичные проблемы в области обеспечения шунтовой чувствительности рельсовых цепей [3].

Учитывая тяжесть последствий необеспечения шунтового эффекта, необходим непрерывный мониторинг состояния рельсовых цепей (шунтовой чувствительности) с целью своевременного выявления критических значений дестабилизирующих факторов или условий функционирования. В соответствии с действующей технологией обслуживания визуальный контроль состояния поверхностей головок рельсов проводится либо в процессе выполнения регламентных работ, либо в процессе следования к месту выполнения работ, а визуальный контроль поверхностей колес проводится в пунктах осмотра вагонов. Современные технологии позволяют реализовать соответствующие логико-вычислительные процедуры для выявления загрязнения (наличия непроводящего слоя) на поверхностях головок рельсов и

поверхностях колес по кругу катания, но техническая реализация ряда измерительных процедур в реальном времени представляет значительную практическую проблему. В статье [4] рассмотрены способы автоматизации проверок рельсовых цепей на шунтовую чувствительность и контроля выполнения шунтового эффекта в процессе нахождения подвижной единицы на рельсовой цепи. Целью настоящей статьи является исследование возможности непрерывного мониторинга выполнения шунтового эффекта (мониторинга шунтовой чувствительности) на основе модели изменения значений их параметров в процессе движения подвижных единиц по рельсовой линии.

1. Известные предложения по автоматизации измерения сопротивления поездного шунта и по предотвращению потери шунта (предотвращению невыполнения шунтового эффекта) занятой рельсовой цепью

Исследования проблемы автоматизации измерения сопротивления поездного шунта выполнялись многими учеными и специалистами. Общий подход к решению поставленной задачи состоит в расчете искомого значения на основе измерений значений различных параметров рельсовых цепей.

В [5] предложено определять сопротивление поездного шунта следующим образом: измеряется напряжение на входе путевого приемника контролируемой рельсовой цепи в свободном состоянии и в течение всего времени ее занятия подвижным составом; по значению напряжения свободной рельсовой цепи с использованием известных значений других параметров определяется сопротивление изоляции рельсовой линии [6]; по минимальному значению напряжения при занятой рельсовой цепи и значению сопротивления изоляции определяется сопротивление поездного шунта. Недостатком такого способа, влияющим на достоверность результата, является измерение значения напряжения на входе путевого приемника, а не в рельсах, и, следовательно, рассчитывается значение не сопротивления изоляции рельсовой линии, а общего сопротивления изоляции

цепи, по которой протекает сигнальный ток, включая соединительные провода (кабельную линию). Кроме того, минимальное напряжение на путевом приемнике будет зафиксировано при минимальном значении сопротивления поездного шунта, то есть при нахождении на участке максимального количества колесных пар, а в соответствии с действующей технологией проверка выполнения шунтового эффекта производится при наложении на рельсовую линию нормативного шунта, что соответствует максимальному значению сопротивления поездного шунта — в момент вступления на участок одной колесной пары или когда на участке остается одна колесная пара.

В [7] предложено определять сопротивление поездного шунта следующим образом: методом холостого хода и короткого замыкания [6] определяется суммарное сопротивление линии связи между источником сигнального тока и согласующим трансформатором, согласующего трансформатора и соединительных проводов между согласующим трансформатором и рельсовой линией (напряжение и сила тока в режимах холостого хода и короткого замыкания измеряются на выходе источника; режим короткого замыкания реализуется путем замыкания в цепи вторичной обмотки согласующего трансформатора при помощи коммутационного устройства); при наложении на рельсовую линию поездного шунта измеряются значения напряжения и силы тока на выходе источника сигнального тока и рассчитывается суммарное сопротивление линии связи, согласующего трансформатора, соединительных проводов и поездного шунта; сопротивление поездного шунта определяется как разность двух описанных выше суммарных сопротивлений. Такой способ имеет ряд недостатков, влияющих на достоверность результата. Во-первых, при расчете суммарного сопротивления в шунтовом режиме не учитывается сопротивление рельсовой линии от точки подключения аппаратуры рельсовой цепи до точки наложения поездного шунта, что дает основания сделать вывод о применимости данного способа только при наложении поездного шунта на том конце рельсовой цепи, где производятся измерения (на питающем конце). Во-вторых,

рассматриваемый режим холостого хода фактически таковым не является, так как вторичная обмотка согласующего трансформатора имеет нагрузку, в качестве которой можно рассматривать сопротивление рельсовой линии и аппаратуры релейного конца рельсовой цепи. Кроме того, включение в схему рельсовой цепи дополнительного коммутационного устройства снижает ее надежность и требует перерасчета регулировочных таблиц.

В [8] предложено определять сопротивление поездного шунта следующим образом: на питающем конце рельсовой цепи к рельсовой линии подключается дополнительный дроссель-трансформатор через основную обмотку; при вступлении на рельсовую линию подвижной единицы измеряются напряжение на дополнительной обмотке дроссель-трансформатора и сила тока на выходе источника питания рельсовой цепи; сопротивление поездного шунта определяется как отношение напряжения между рельсами, которое рассчитывается по значению напряжения на дополнительной обмотке дроссель-трансформатора, к силе тока, протекающего по рельсовой цепи. Такой способ имеет недостатки, аналогичные предыдущему: при расчете не учитываются сопротивление рельсовой линии от точки подключения аппаратуры рельсовой цепи до точки наложения поездного шунта, сопротивление соединительных и монтажных проводов (перемычек) и кабельной линии (при ее наличии). Также недостатком является включение в схему рельсовой цепи дополнительного дроссель-трансформатора.

В [9] предложено определять сопротивление поездного шунта с учетом его местоположения в пределах рельсовой цепи следующим образом: при движении подвижной единицы определяется расстояние до нее (до первой колесной пары) от конца рельсовой цепи с помощью радиолокационного дальномера; сопротивление поездного шунта определяется как разность входного сопротивления рельсовой линии и сопротивления рельсов известной длины; входное сопротивление рельсовой линии рассчитывается по схеме последовательного подключения его и эталонного сопротивления к выходам источника сигнального тока по измеренным значениям напряжений

на эталонном сопротивлении и на входе в рельсовую линию. Недостатками такого способа являются: необходимость использования отдельного дальномера для каждой рельсовой цепи; необходимость измерения напряжения в рельсовой линии в автоматическом режиме, что практически реализовать не представляется возможным; при расчете входного сопротивления рельсовой линии не учитывается сопротивление (падение напряжения) элементов тракта передачи сигнального тока от источника в рельсовую линию.

В [10] предложено определять сопротивление поездного шунта двуслойной подвижной единицы следующим образом: на подвижной единице устанавливаются четыре датчика тока и аппаратура определения координаты (позиционирования); датчики измеряют силу тока, протекающего по рельсовой линии перед и после (по ходу движения) подвижной единицы, и протекающего по первой и второй колесным парам; по полученным значениям, известному значению входного сопротивления аппаратуры рельсовой цепи на конце, расположенном после подвижной единицы, и рассчитанным значениям сопротивления свободной части рельсовой линии определяются значения сопротивлений колесных пар и поездного шунта в целом; информация о несоответствии значения сопротивления поездного шунта нормативному передается на приборы контроля машиниста подвижной единицы и (по беспроводному каналу) на автоматизированное рабочее место эксплуатационного персонала. Достоинством такого способа является возможность выявления ложной свободности рельсовой цепи при несовпадении сигналов о состоянии путевого реле (реле под током) и о фактическом местоположении подвижной единицы (из системы позиционирования). Также в этом случае можно определить причину ложной свободности — неправильная регулировка рельсовой цепи (при наличии измерительно-вычислительных средств технического диагностирования и мониторинга) или повышенное сопротивление поездного шунта. Недостатками способа являются ограниченная область применения (только для двуслойных подвижных единиц) и необходимость реализации дополнительного беспроводного канала связи

между подвижной единицей и автоматизированным рабочим местом эксплуатационного персонала.

В [11] предложено определять сопротивление поездного шунта исходя из предположения, что напряжение на путевом приемнике в шунтовом режиме будет определяться произведением силы тока путевого генератора на сопротивление поездного шунта, что не соответствует электрической схеме параллельного включения сопротивлений поездного шунта и путевого приемника в шунтовом режиме.

Известные способы предотвращения потери шунта (невыполнения шунтового эффекта) предполагают выполнение соответствующих действий машинистами в случае обнаружения предпосылок для возникновения опасной ситуации или применение специальных дополнительных конструктивных решений.

Так, в [12] предложено на легкие подвижные единицы устанавливать дополнительное устройство, шунтирующее рельсовую линию, — соединенные металлической планкой ролики, контактирующие с внутренней частью головок рельсов. Недостаток такого решения — на каждую подвижную единицу требуется устанавливать дополнительные элементы соприкосновения с рельсами, что усложняет и снижает надежность конструкции в целом, а также усложняет процессы технического обслуживания и ремонта подвижных единиц.

В [13] предложен следующий способ: в момент фиксации наложения поездного шунта на рельсовую линию запоминается значение напряжения на путевом реле, при котором оно обесточилось; затем в течение всего времени нахождения подвижной единицы в пределах рельсовой цепи это значение напряжения поддерживается на обмотке путевого реле при помощи токорегулирующего элемента. Недостатком такого способа является введение дополнительных элементов в схему рельсовой цепи, что снижает ее надежность и требует перерасчета регулировочных таблиц. Кроме того, для поддержания напряжения на путевом реле не выше уровня, при котором оно отпускает якорь (сектор), требуется фиксация занятого состояния рельсовой цепи, то есть отпускание якоря (сектора) путевого реле. А в случае, если

рельсовая цепь не зафиксирует вступление колесной пары (путевое реле не обесточится), схема не сработает, то есть не фиксируется невыполнение шунтового эффекта.

В [14] предложено, что в случае фиксации факта потери шунта под подвижной единицей (по показаниям локомотивных устройств индикации) после экстренного торможения с применением песка машинист должен продолжать движение до восстановления шунтового эффекта, то есть до восстановления нормальной работы автоматической локомотивной сигнализации. Недостатками такого способа являются: возложение на машиниста дополнительных функций по фиксации и принятию решения о факте потери шунта; в случае нарушения нормальной работы автоматической локомотивной сигнализации становится непонятно, сколько времени машинисту следует продолжать движение; необходимость продолжать движение после применения экстренного торможения, что может противоречить условиям, вызвавшим применение экстренного торможения.

В [15] предложено оборудовать подвижную единицу устройством, которое автоматически фиксирует применение песка при экстренном торможении и выдает сигнал на прекращение подачи песка при достижении подвижной единицей установленной скорости. Также предлагается, что после прекращения подачи песка подвижная единица должна проследовать еще некоторое расстояние, достаточное для того, чтобы хотя бы одна колесная пара остановилась на чистых (не засыпанных песком) рельсах. К недостаткам такого способа можно отнести, во-первых, отсутствие проверки выполнения шунтового эффекта, во-вторых, аналогично [14], — необходимость продолжать движение после применения экстренного торможения.

В [16] и [17] представлены результаты разработки устройства для очистки поверхности катания ходовых рельсов от ржавчины или других загрязнений. Однако для принятия решения о реализации такого способа очистки необходимо зафиксировать соответствующее отклонение от норм содержания поверхностей головок рельсов.

Результаты проведенного анализа позволяют сделать следующие выводы.

1. Известные методы автоматизации измерения сопротивления поездного шунта на основе измерений значений различных параметров рельсовых цепей и последующих расчетов искомого значения не являются эффективными (точными), так как в расчетных формулах не учитывается сопротивление отдельных элементов тракта протекания сигнального тока. Кроме того, использование дополнительной согласующей, коммутационной или измерительной аппаратуры может привести к ухудшению параметров надежности рельсовых цепей.

2. Перспективными с точки зрения возможности выявления факта и причин ухудшения (невыполнения) шунтового эффекта можно считать методы на основе использования информации о значениях параметров рельсовых цепей и о фактическом местоположении подвижных единиц в пределах рельсовых цепей. При этом следует учесть, что алгоритмы принятия решений в известных средствах технического диагностирования и мониторинга не решают задачу идентификации причин, вызывающих ухудшение шунтового эффекта [18].

2. Динамическая модель рельсовой цепи в шунтовом режиме

При расчете фактических значений параметров рельсовой цепи в шунтовом режиме основными проблемами являются определение точного местоположения подвижной единицы в пределах рельсовой цепи и определение точного значения сопротивления поездного шунта. Для решения первой проблемы в задачах диагностики в [19] разработана модель классификации на основе применения метода динамического преобразования времени (dynamic time warping) для установления зависимости между напряжением на входе путевого приемника и положением поездного шунта. Для решения второй проблемы в [20] предложен метод определения состояния поездного шунта по переходному току в моменты занятия и освобождения рельсовой цепи. Принципы построения модели изменения параметров сигнального тока на входе путевого приемника в динамике движения подвижной единицы по рельсовой цепи от момента вступления до момента освобождения изложены в [21].

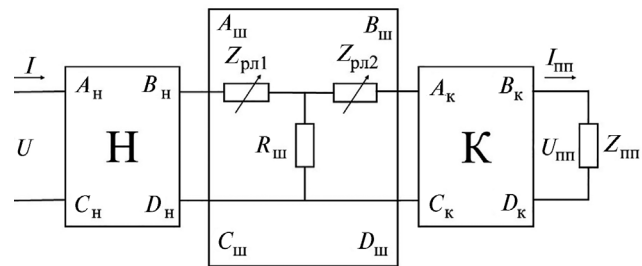


Рис. 1. Схема замещения рельсовой цепи в шунтовом режиме с учетом местоположения поездного шунта

Рассмотрим схему замещения рельсовой цепи в шунтовом режиме с учетом местоположения поездного шунта (рис. 1), на которой использованы следующие обозначения:

- U, I — напряжение, ток источника питания рельсовой цепи;
- Н и К — четырехполюсники, замещающие аппаратуру соответственно питающего и релейного конца рельсовой цепи, с коэффициентами A_H, B_H, C_H, D_H и A_K, B_K, C_K, D_K ;
- $A_ш, B_ш, C_ш, D_ш$ — коэффициенты общего четырехполюсника, замещающего рельсовую линию с наложенным на нее поездным шунтом;
- РЛ1 — свободная от подвижного состава часть рельсовой линии между поездным шунтом и питающим концом;
- РЛ2 — свободная от подвижного состава часть рельсовой линии между поездным шунтом и релейным концом;
- ПШ — поездной шунт;
- ПП — путевого приемника, $U_{пп}$ и $I_{пп}$ — соответственно напряжение и ток на входе путевого приемника.

При расчете шунтового режима рельсовой цепи коэффициент шунтовой чувствительности определяется по формуле¹:

$$K_{шн(р)} = \frac{|U_{дшн(р)}|}{|U_{фmin}|},$$

где $U_{дшн(р)}$ — допустимое напряжение источника питания в шунтовом режиме при наложении

¹ Здесь и далее базовые расчетные формулы и выражения взяты из [22].

нии нормативного шунта на питающем (релейном) конце;

$U_{\text{фmin}}$ — минимальное фактическое напряжение источника питания, определенное в результате расчетов и с учетом выходных параметров источника.

Допустимое напряжение источника питания в шунтовом режиме при наложении нормативного шунта определяется по формуле:

$$|U_{\text{дшп(р)}}| = I_{\text{пш}} |Z_{\text{пшп(р)}}|,$$

где $I_{\text{пш}}$ — ток надежного несрабатывания путевого приемника;

$Z_{\text{пшп(р)}}$ — сопротивление передачи общей схемы замещения рельсовой цепи при наложении нормативного шунта на питающем (релейном) конце.

Сопротивление передачи общей схемы замещения рельсовой цепи при наложении нормативного шунта на питающем и релейном концах рассчитывается по формулам:

$$Z_{\text{пшп}} = K'_{\text{тн}} K_{\text{тк}} \times (A_{\text{шп}} Z_{\text{вкк}} + B_{\text{шп}} + Z'_{\text{вхн}} (C_{\text{шп}} Z_{\text{вкк}} + D_{\text{шп}}));$$

$$Z_{\text{пшр}} = K'_{\text{тн}} K_{\text{тк}} \times (A_{\text{шр}} Z_{\text{вкк}} + B_{\text{шр}} + Z'_{\text{вхн}} (C_{\text{шр}} Z_{\text{вкк}} + D_{\text{шр}})),$$

где $K'_{\text{тн}}$ — обратный коэффициент снижения тока в четырехполюснике Н, $K'_{\text{тн}} = A_{\text{н}}$;

$K_{\text{тк}}$ — прямой коэффициент снижения тока в четырехполюснике К, $K_{\text{тк}} = C_{\text{к}} Z_{\text{пш}} + D_{\text{к}}$;

$Z'_{\text{вхн}}$ — обратное входное сопротивление четырехполюсника Н, $Z'_{\text{вхн}} = \frac{B_{\text{н}}}{A_{\text{н}}}$;

$Z_{\text{вкк}}$ — прямое входное сопротивление четырехполюсника К, $Z_{\text{вкк}} = \frac{A_{\text{к}} Z_{\text{пш}} + B_{\text{к}}}{C_{\text{к}} Z_{\text{пш}} + D_{\text{к}}}$;

$Z_{\text{пш}}$ — входное сопротивление путевого приемника.

Выражение для расчета сопротивления передачи общей схемы замещения рельсовой цепи при наложении поездного шунта в любой точке рельсовой линии может быть записано как:

$$Z_{\text{пш}} = K'_{\text{тн}} K_{\text{тк}} \times (A_{\text{ш}} Z_{\text{вкк}} + B_{\text{ш}} + Z'_{\text{вхн}} (C_{\text{ш}} Z_{\text{вкк}} + D_{\text{ш}})).$$

Переходя от расчетных значений параметров к фактическим, полученным в результате непрерывного мониторинга параметров рельсовой цепи, запишем выражение для расчета коэффициента шунтовой чувствительности в любой момент времени как:

$$K_{\text{ш}} = \frac{I_{\text{пш}} K'_{\text{тн}} K_{\text{тк}} |A_{\text{ш}} Z_{\text{вкк}} + B_{\text{ш}} + Z'_{\text{вхн}} (C_{\text{ш}} Z_{\text{вкк}} + D_{\text{ш}})|}{|U_{\text{шп}}|},$$

где $I_{\text{пш}}$ — ток на входе путевого приемника;

$U_{\text{шп}}$ — напряжение на выходе источника питания.

Коэффициенты общего четырехполюсника рельсовой линии с наложенным на нее поездным шунтом предлагается определять следующим образом. Учитывая, что рельсовая линия представляется в виде последовательного соединения трех четырехполюсников (РЛ1, ПШ и РЛ2 — см. рис. 2), и используя выражения для расчета коэффициентов четырехполюсников свободной рельсовой линии, найдем значения искомых коэффициентов путем последовательного перемножения матриц:

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} A_{\text{ш}} & B_{\text{ш}} \\ C_{\text{ш}} & D_{\text{ш}} \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} \text{ch}(\gamma l_1) & Z_{\text{в}} \text{sh}(\gamma l_1) \\ \frac{\text{sh}(\gamma l_1)}{Z_{\text{в}}} & \text{ch}(\gamma l_1) \end{vmatrix} \times \\ &\times \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_{\text{пш}}} & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \text{ch}(\gamma l_2) & Z_{\text{в}} \text{sh}(\gamma l_2) \\ \frac{\text{sh}(\gamma l_2)}{Z_{\text{в}}} & \text{ch}(\gamma l_2) \end{vmatrix}, \end{aligned}$$

где l_1 и l_2 — соответственно длины РЛ1 и РЛ2;

$Z_{\text{в}}$ и γ — соответственно волновое сопротивление и коэффициент распространения рельсовой линии;

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

Выполнив преобразования и введя для упрощения расчетных выражений дополнительные переменные N_1-N_5 , получим следующие выражения:

$$A_{\text{ш}} = N_1 + N_2 + N_3 N_5;$$

$$B_{\text{ш}} = Z_{\text{в}} (N_3 + N_4 (1 + N_5));$$

$$C_{\text{ш}} = \frac{1}{Z_{\text{в}}} (N_2 + N_4) + \frac{N_1}{R_{\text{пш}}};$$

$$D_{\text{ш}} = N_1 + N_2 + N_4 N_5,$$

где $N_1 = \text{ch}(\gamma l_1) \text{ch}(\gamma l_2)$; $N_2 = \text{sh}(\gamma l_1) \text{sh}(\gamma l_2)$;
 $N_3 = \text{sh}(\gamma l_1) \text{ch}(\gamma l_2)$; $N_4 = \text{ch}(\gamma l_1) \text{sh}(\gamma l_2)$;
 $N_5 = \frac{Z_{\text{в}}}{R_{\text{пш}}}.$

Рассмотрим некоторые частные случаи, возникающие в процессе движения поезда по рельсовой линии. Для определенности примем, что поезд вступает на релейный конец рельсовой цепи.

1. Вступление первой колесной пары на рельсовую линию. В этом случае сопротивление поездного шунта равно сопротивлению одной колесной пары, то есть равно сопротивлению нормативного шунта 0,06 Ом. Длины РЛ1 и РЛ2 будут равны соответственно $l_1 = L_{\text{рц}}$ и $l_2 = 0$, где $L_{\text{рц}}$ — длина рельсовой цепи. Тогда значения переменных N будут равны:

$$N_1 = \text{ch}(\gamma L_{\text{рц}}); N_2 = N_4 = 0; N_3 = \text{sh}(\gamma L_{\text{рц}}),$$

а значения коэффициентов четырехполюсника рельсовой линии:

$$A_{\text{ш}} = N_1 + N_3 N_5; B_{\text{ш}} = Z_{\text{в}} N_3; C_{\text{ш}} = \frac{N_1}{R_{\text{пш}}}; D_{\text{ш}} = N_1.$$

2. Нахождение последней колесной пары на рельсовой линии. В этом случае сопротивление поездного шунта равно сопротивлению одной колесной пары, то есть равно сопротивлению нормативного шунта 0,06 Ом. Длины РЛ1 и РЛ2 будут равны соответственно $l_1 = 0$ и $l_2 = L_{\text{рц}}$, где $L_{\text{рц}}$ — длина рельсовой цепи. Тогда значения переменных N будут равны:

$$N_1 = \text{ch}(\gamma L_{\text{рц}}); N_2 = N_3 = 0; N_4 = \text{sh}(\gamma L_{\text{рц}}),$$

а значения коэффициентов четырехполюсника рельсовой линии:

$$A_{\text{ш}} = N_1; B_{\text{ш}} = Z_{\text{в}} (N_4 (1 + N_5));$$

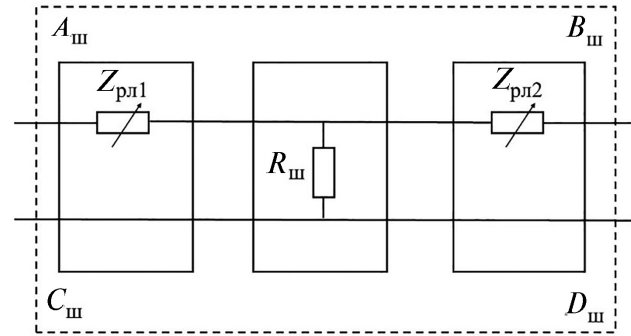


Рис. 2. Схема замещения рельсовой линии

$$C_{\text{ш}} = \frac{N_4}{Z_{\text{в}}} + \frac{N_1}{R_{\text{пш}}}; D_{\text{ш}} = N_1 + N_4 N_5.$$

3. Поезд полностью находится на рельсовой линии, длина поезда больше длины рельсовой цепи. В этом случае сопротивление поездного шунта будет определяться количеством колесных пар (n), находящихся на рельсовой линии,

то есть $R_{\text{пш}} = \frac{0,06}{n}$. Длины РЛ1 и РЛ2 будут равны 0. Тогда значения переменных N будут равны:

$$N_1 = 1; N_2 = N_3 = N_4 = 0,$$

а значения коэффициентов четырехполюсника рельсовой линии:

$$A_{\text{ш}} = D_{\text{ш}} = 1; B_{\text{ш}} = C_{\text{ш}} = 0.$$

4. Поезд полностью находится на рельсовой линии, длина поезда меньше длины рельсовой цепи. В этом случае сопротивление поездного шунта будет определяться количеством колесных пар (n), находящихся на рельсовой линии,

то есть $R_{\text{пш}} = \frac{0,06}{n}$. Длины РЛ1 и РЛ2 равны L_{12} .

Тогда значения переменных N будут равны:

$$N_1 = \text{ch}^2(\gamma L_{12}); N_2 = \text{sh}^2(\gamma L_{12});$$

$$N_3 = N_4 = \text{sh}(\gamma L_{12}) \cdot \text{ch}(\gamma L_{12}),$$

а значения коэффициентов четырехполюсника рельсовой линии:

$$A_{\text{ш}} = D_{\text{ш}} = \text{ch}^2(\gamma L_{12}) + \text{sh}^2(\gamma L_{12}) + \\ + \text{sh}(\gamma L_{12}) \text{ch}(\gamma L_{12}) \frac{Z_{\text{в}}}{R_{\text{пш}}};$$

$$B_{\text{ш}} = Z_{\text{в}} \left(\text{sh}(\gamma L_{12}) \text{ch}(\gamma L_{12}) \left(2 + \frac{Z_{\text{в}}}{R_{\text{пш}}} \right) \right);$$

$$C_{\text{ш}} = \frac{1}{Z_{\text{в}}} \left(\text{sh}^2(\gamma L_{12}) + \text{sh}(\gamma L_{12}) \text{ch}(\gamma L_{12}) + \frac{\text{ch}^2(\gamma L_{12})}{R_{\text{пш}}} \right).$$

Заключение

Модель изменения параметров сигнального тока на входе путевого приемника в динамике движения подвижной единицы по рельсовой цепи позволяет решать следующие аналитические и практические задачи.

1. Расчет коэффициента чувствительности рельсовой цепи к фактическому поезвному шунту и исследование динамики изменения коэффициента в одних и тех же точках рельсовой линии при воздействиях различных дестабилизирующих факторов, следствием которых может стать повышение удельного сопротивления рельсов или изменение удельного сопротивления балласта. При этом возможными причинами отклонений фактических значений от нормативных (расчетных для конкретных условий эксплуатации) у одной рельсовой цепи, выявленных при прохождении нескольких поездов (маневровых составов), могут быть отступления от норм содержания рельсовой цепи, а возможными причинами отклонений, выявленных у нескольких рельсовых цепей по маршруту движения только одного поезда (маневрового состава), могут быть загрязнения поверхностей колес.

2. Построение инвариантного к внешним возмущениям [2] классификатора состояний рельсовой цепи, на основе эталонных моделей изменения значений $U_{\text{пп}}$ и $I_{\text{пп}}$ в процессе движения поезда от момента вступления до момента освобождения рельсовой линии для различных диапазонов значений первичных параметров (сопротивления рельсов — от расчетного значения в сторону увеличения; сопротивления балласта — от минимального расчетного значения (1; 0,5; 0,1 Ом · км в зависимости

от типа и структуры рельсовой цепи) как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения). Эталонные значения $U_{\text{пп}}$ и $I_{\text{пп}}$ при различных значениях U и I могут быть получены на основании выражений:

$$U = A_{\text{ош}} U_{\text{пп}} + B_{\text{ош}} I_{\text{пп}}$$

$$\text{и } I = C_{\text{ош}} U_{\text{пп}} + D_{\text{ош}} I_{\text{пп}},$$

где $A_{\text{ош}}$, $B_{\text{ош}}$, $C_{\text{ош}}$, $D_{\text{ош}}$ — коэффициенты общего четырехполюсника рельсовой цепи в шунтовом режиме, полученного путем объединения всех входящих в схему замещения четырехполюсников.

3. Организация непрерывного мониторинга состояния рельсовых цепей (шунтовой чувствительности) с целью своевременного выявления критических значений дестабилизирующих факторов или критических условий функционирования. ▲

Библиографический список

1. Тарасов Е. М. Принцип построения классификатора состояний рельсовых линий множеством информативных признаков / Е. М. Тарасов // Известия Транссиба. — 2012. — № 1(9). — С. 112–118.
2. Track Circuit Shunting Performance Study // Research Results 21-13. — July 2021. — 4 p. — U. S. Department of Transportation. Federal Railroad Administration. Office of Research, Development, and Technology. — URL: <https://trid.trb.org/View/1869604>.
3. Zhang Zh. Analysis and Research on Poor Shunting of Track Circuits in High-speed Railway Stations Based on Computer Technology / Zh. Zhang, M. Shi, R. Wang // BTCS 2020. Journal of Physics: Conference Series, 1648 (2020), 042023. — DOI: 10.1088/1742-6596/1648/4/042023.
4. Швалов Д. В. Алгоритмы принятия решений для автоматизированного выполнения и планирования работ по проверке рельсовых цепей на шунтовую чувствительность / Д. В. Швалов // Автоматика на транспорте. — 2023. — Т. 9. — № 1. — С. 19–32. — DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-19-32.
5. Пат. RU 2 369 507 C1. МПК В61L 23/16. Способ и устройство определения сопротивления поездного шунта / Ю. И. Полевой, А. В. Вайшнарас; патентообладатель государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (СамГУПС) (RU). — Заявка № 2008112324/11; приоритет изобретения 31.03.2008; опубл. 10.10.2009, Бюл. № 28.

6. Брылеев А. М. Устройство и работа рельсовых цепей / А. М. Брылеев, В. А. Шишляков, Ю. А. Кравцов. — М.: Транспорт, 1966. — 264 с.
7. Пат. RU 2 750 137 С1. МПК G01R 27/04, B61L 23/00. Способ дистанционного измерения сопротивления поездного шунта / В. С. Кузьмин, А. К. Табунщиков, В. И. Линьков и др.; патентообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ) (RU). — Заявка № 2020133742; приоритет изобретения 14.10.2020; опубл. 22.06.2021, Бюл. № 18.
8. Пат. RU 2 744 490 С1. МПК B61L 23/00. Устройство измерения переходного сопротивления между каждой колесной парой и рельсами / В. С. Кузьмин, А. К. Табунщиков, В. И. Линьков и др.; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ) (RU). — Заявка № 2020133744; приоритет изобретения 14.10.2020; опубл. 10.03.2021 Бюл. № 7.
9. Пат. RU 2 745 713 С1. МПК G01R 27/02. Способ автоматического измерения сопротивления поездного шунта / В. С. Кузьмин, А. К. Табунщиков, В. И. Линьков и др.; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ) (RU). — Заявка № 2020133740; приоритет изобретения 14.10.2020; опубл. 30.03.2021, Бюл. № 10.
10. Пат. RU 2 747 077 С1. МПК G01R 27/04, B61L 25/02. Система мониторинга ложной свободности рельсовой цепи и сопротивления поездного шунта / В. С. Кузьмин, А. К. Табунщиков, В. И. Линьков и др.; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ) (RU). — Заявка № 2020133736; приоритет изобретения 14.10.2020; опубл. 26.04.2021, Бюл. № 12.
11. Пат. RU 2 748 742 С1. МПК G01R 27/04. Способ измерения сопротивления поездного шунта / В. С. Кузьмин, А. К. Табунщиков, В. И. Линьков и др.; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ) (RU). — Заявка № 2020133745; приоритет изобретения 14.10.2020; опубл. 31.05.2021, Бюл. № 16.
12. А. с. на изобретение № 48523. Приспособление к дрезинам и т. п., служащее для повышения шунтового эффекта при проходе их по рельсовым цепям / Е. В. Курдюмов. — Заявл. 10 марта 1936 г. (спр. о. перв. № 188845); опубл. 31 августа 1936 г.
13. Пат. SU 1 141 035 А1. МПК B61L 23/16. Рельсовая цепь / Ю. В. Соболев, А. С. Капуста, П. П. Золочевский и др.; патентообладатель Харьковский институт инженеров железнодорожного транспорта им. С. М. Кирова (SU). — Заявка № 3615631/27-11; приоритет изобретения 30.06.1983; опубл. 23.02.1985, Бюл. № 7.
14. А. с. №. 356185. МПК B61L 3/12. Устройство локомотивной сигнализации / В. Г. Дудин. — Заявка № 1408291/18-24; приоритет изобретения 25.11.1970; опубл. 23.10.1972, Бюл. № 32.
15. Пат. RU 2 311 307 С1. МПК B60T 8/1761, B60T 8/62. Устройство для управления торможением поезда / Б. Д. Никифоров, М. Д. Рабинович, В. М. Абрамов и др.; патентообладатель Закрытое акционерное общество «Отраслевой центр внедрения новой техники и технологий» (ЗАО «ОЦВ») (RU). — Заявка № 2006120294/11; приоритет изобретения 09.06.2006; опубл. 27.11.2007, Бюл. № 33.
16. Пат. RU 166457 U1. МПК E01B 31/17. Устройство для очистки поверхности катания ходовых рельсов / А. В. Пультяков, В. П. Мартыновский, А. Ф. Наталин и др.; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВПО ИрГУПС) (RU). — Заявка № 2016121750/11; приоритет изобретения 01.06.2016; опубл. 27.11.2016.
17. Пультяков А. В. Обеспечение шунтовой чувствительности электрических рельсовых цепей с помощью устройства для очистки поверхности катания ходовых рельсов / А. В. Пультяков, М. Э. Скоробогатов, В. П. Мартыновский и др. // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. — 2018. — Т. 1. — С. 335–338.
18. Ефанов Д. В. Динамические вопросники для организации систем поддержки принятия решений, интегрированных в программные средства диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики / Д. В. Ефанов, В. В. Хорошев // Автоматика на транспорте. — 2021. — Т. 7. — № 1. — С. 101–136. — DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-101-136.
19. Dong W. Fault Diagnosis for Compensating Capacitors of Jointless Track Circuit Based on Dynamic Time Warping / W. Dong // Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering. — Vol. 2014, Article ID 324743. — 13 p. — DOI: 10.1155/2014/324743.
20. Qi H. Study on Shunt State of Track Circuit Based on Transient Current / Huan Qi, You-Peng Zhang, Bin Zhao // WSEAS Transactions on Circuits and Systems, E-ISSN: 2224-266X. — 2015. — Vol. 14. — Pp. 399–405.
21. Швалов Д. В. Динамическая модель фазочувствительной рельсовой цепи в шунтовом режиме / Д. В. Швалов, Е. П. Плечистова, А. Д. Мамонтова // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 160-летию Белорусской железной дороги (Гомель, 24–25 ноября 2022 г.). В 2-х ч. Ч. 1; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. — Гомель: БелГУТ, 2022. — С. 234–236.
22. Аркатов В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. — М.: Транспорт, 1990. — 295 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 3, pp. 229–238
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-03-229-238

Methods of Monitoring the Fulfillment of the Shunt Effect of Track Circuits

Information about author

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

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

Abstract: The value of the transient resistance "wheel — rail" is the determining factor for ensuring the shunt effect of track circuits. Taking into account the severity of consequences of failure to ensure the shunt effect — accidents or train derailments due to a switch being thrown under a train or opening of a traffic light fencing an occupied track section, continuous monitoring of the condition of track circuits (shunt sensitivity) is necessary for timely detection of critical values of destabilising factors or operating conditions. The article discusses ways to automate measurements of train shunt resistance and ways to prevent shunt loss (non-fulfillment of the shunt effect) by an occupied track circuit. The work also examines the possibility of implementing continuous monitoring of the shunt effect (monitoring of shunt sensitivity) based on a model of changing the values of their parameters during the movement of rolling units along a rail line. The obtained results can be used to solve such analytical and practical problems as: calculation and investigation of the dynamics of change in the sensitivity coefficient of the track circuit to the actual train shunt; construction of a classifier of the track circuit states invariant to external perturbations during the train movement from the moment of entry to the moment of release of the rail line; organisation of continuous monitoring of the shunt sensitivity of the track circuit.

Keywords: track circuit; shunt sensitivity; track circuit model; shunt effect fulfillment; maintenance technology.

References

- Tarasov E. M. Printsip postroeniya klassifikatora sostoyaniy rel'sovykh liniy mnozhestvom informativnykh priznakov [The principle of constructing a classifier of states of rail lines by a set of informative features]. *Izvestiya Transsiba* [Izvestiya Transsib]. 2012, Iss. 1(9), pp. 112–118. (In Russian)
- Track Circuit Shunting Performance Study. Research Results 21-13, July 2021, 4 p. U. S. Department of Transportation. Federal Railroad Administration. Office of Research, Development, and Technology. Available at: <https://trid.trb.org/View/1869604>.
- Zhang Zh., Shi M., Wang R. Analysis and Research on Poor Shunting of Track Circuits in High-speed Railway Stations Based on Computer Technology. *BTCs 2020. Journal of Physics: Conference Series*, 1648 (2020), 042023. DOI: 10.1088/1742-6596/1648/4/042023.
- Shvalov D. V. Algoritmy prinyatiya resheniy dlya avtomatizirovannogo vypolneniya i planirovaniya rabot po proverke rel'sovykh tsepey na shuntovuyu chuvstvitel'nost' [Decision-making algorithms for automated execution and planning of work on checking rail circuits for shunt sensitivity]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2023, vol. 9, Iss. 1, pp. 19–32. DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-19-32. (In Russian)
- Polevoy Yu. I., Vayshnaras A. V. *Sposob i ustroystvo opredeleniya soprotivleniya poezdnoy shunta* [Method and device for determining the resistance of a train shunt]. Patent RF, no. 2 369 507 C1, 2009. (In Russian)
- Bryleev A. M., Shishlyakov V. A., Kravtsov Yu. A. *Ustroystvo i rabota rel'sovykh tsepey* [Construction and operation of rail circuits]. Moscow: Transport Publ., 1966, 264 p. (In Russian)
- Kuz'min V. S., Tabunshchikov A. K., Lin'kov V. I. et al. *Sposob distantsionnoy izmereniya soprotivleniya poezdnoy shunta* [A method for remote measurement of the resistance of a train shunt]. Patent RF, no. 2 750 137 C1, 2021. (In Russian)
- Kuz'min V. S., Tabunshchikov A. K., Lin'kov V. I. et al. *Ustroystvo izmereniya perekhodnogo soprotivleniya mezhdu kazhdoy kolesnoy paroy i rel'sami* [Device for measuring transient resistance between each wheel pair and rails]. Patent RF, no. 2 744 490 C1, 2021. (In Russian)
- Kuz'min V. S., Tabunshchikov A. K., Lin'kov V. I. et al. *Sposob avtomaticheskogo izmereniya soprotivleniya poezdnoy shunta* [A method for automatically measuring the resistance of a train shunt]. Patent RF, no. 2 745 713 C1, 2021. (In Russian)
- Kuz'min V. S., Tabunshchikov A. K., Lin'kov V. I. et al. *Sistema monitoringa lozhnoy svobodnosti rel'sovoy tsepi i soprotivleniya poezdnoy shunta* [Monitoring system of false freeness of the rail circuit and train shunt resistance]. Patent RF, no. 2 747 077 C1, 2021. (In Russian)
- Kuz'min V. S., Tabunshchikov A. K., Lin'kov V. I. et al. *Sposob izmereniya soprotivleniya poezdnoy shunta* [A method for measuring the resistance of a train shunt]. Patent RF, no. 2 748 742 C1, 2021. (In Russian)
- Kurdyumov E. V. *Prisposoblenie k drezinam i t. p., sluzhashchee dlya povyshe-niya shuntovogo effekta pri prokhode ikh po rel'sovym tsepyam* [Adaptation to railcars, etc., serving to increase the shunt effect during their passage along the rail circuits]. A. s. na izobrenenie № 48523, 1936. (In Russian)
- Sobolev Yu. V., Kapusta A. S., Zolochevskiy P. P. et al. *Rel'sovaya tsep'* [Rail chain]. Patent RF, no. 1 141 035 A1, 1985. (In Russian)
- Dudin V. G. *Ustroystvo lokomotivnoy signalizatsii* [Locomotive signaling device]. A. s. № 356185, 1972. (In Russian)
- Nikiforov B. D., Rabinovich M. D., Abramov V. M. et al. *Ustroystvo dlya upravleniya tormo-zheniem poezda* [Device for train braking control]. Patent RF, no. 2 311 307 C1, 2007. (In Russian)
- Pul'tyakov A. V., Martynovskiy V. P., Natalin A. F. et al. *Ustroystvo dlya ochistki poverkhnosti kataniya khodovykh rel'sov* [A device for cleaning the rolling surface of running rails]. Patent RF, no. 166457 U1, 2016. (In Russian)
- Pul'tyakov A. V., Skorobogatov M. E., Martynovskiy V. P. et al. Obespechenie shuntovoy chuvstvitel'nosti elektricheskikh rel'sovykh tsepey s pomoshch'yu ustroystva dlya ochistki poverkhnosti kataniya khodovykh rel'sov [Provision of shunt sensitivity of electric rail circuits with the help of a device for cleaning the rolling surface of running rails]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona* [Transport infrastructure of the Siberian region]. 2018, vol. 1, pp. 335–338. (In Russian)
- Efanov D. V., Khoroshev V. V. Dinamicheskie voprosniki dlya organizatsii sistem podderzhki prinyatiya resheniy, integrirovannykh v programmnye sredstva diagnostirovaniya i monitoringa ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki [Dynamic questionnaires for organizing decision support systems integrated into software tools for diagnosing and monitoring devices of railway automation]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2021, vol. 7, Iss. 1, pp. 101–136. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-101-136. (In Russian)
- Dong W. Fault Diagnosis for Compensating Capacitors of Jointless Track Circuit Based on Dynamic Time Warping. *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014, article ID 324743, 13 p. DOI: 10.1155/2014/324743.
- Qi H., Zhang Y.-P., Zhao B. Study on Shunt State of Track Circuit Based on Transient Current. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, E-ISSN: 2224-266X, 2015, vol. 14, pp. 399–405.
- Shvalov D. V., Plechistova E. R., Mamontova A. D. Dinamicheskaya model' fazochuvstvitel'noy rel'sovoy tsepi v shuntovom rezhime [Dynamic model of phase-sensitive rail circuit in shunt mode]. *Problemy bezopasnosti na transporte: materialy KhII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 160-letiyu Belorusskoy zheleznoy dorogi (Gomel', 24–25 noyabrya 2022 g.). V 2-kh ch. Ch. 1; pod obshch. red. Yu. I. Kulazhenko* [Problems of security in transport: materials of the XII Intern. scientific-practical. conf., dedicated 160th anniversary of the Belarusian Railway (Gomel, November 24–25, 2022). In 2 hours. Part 1; under total ed. Yu. I. Kulazhenko]. Gomel': BelGUT Publ., 2022, pp. 234–236. (In Russian)
- Arkatov V. S., Kravtsov Yu. A., Stepenskiy B. M. *Rel'sovye tsepi. Analiz raboty i tekhnicheskoe obsluzhivanie* [Rail chains. Analysis of work and maintenance]. Moscow: Transport Publ., 1990, 295 p. (In Russian)

УДК 004.89

ПРОГНОЗ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НАЛИЧИИ ЕДИНИЧНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

БАРАНОВ Леонид Аврамович, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой; e-mail: baranov.miit@gmail.com
АНОХИН Антон Сергеевич, студент; e-mail: antonahin26@gmail.com
ЖЕРЕБЯТИН Илья Андреевич, студент; e-mail: opoxil@mail.ru
ЧЖАН ЮНЦЯН, аспирант; e-mail: zyq0526@yandex.ru

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

Прогнозирование случайных возмущений позволяет улучшить качество управления в интеллектуальных транспортных системах, а также обеспечить эффективную работу диагностических систем. Известен ряд работ, в которых приведены модели экстраполяторов на базе многочленов Чебышева, ортогональных на множестве равноотстоящих точек с прогнозирующим многочленом, коэффициенты которого вычисляются по критерию наименьших квадратов, а также проведен анализ погрешностей прогноза случайных стационарных входных сигналов. Вместе с тем в случае нестационарных входных сигналов возможны единичные возмущения, воздействие которых на экстраполятор приводит к значительным погрешностям прогноза.

В данной статье приведен пример возникновения аддитивных возмущений, появляющихся в системах автоматического управления движения поездов; получено аналитическое выражение и проведен расчет величин погрешностей прогноза при единичных возмущениях. Анализ результатов расчета позволяет определить влияние параметров экстраполятора на величину погрешности прогноза, показать необходимость детектирования единичных возмущений и исключить их влияние на величину погрешностей прогноза.

В статье рассмотрен алгоритм детектирования единичных возмущений и их исключения в процессе прогноза; сделан вывод об эффективности использования экстраполяторов случайных возмущений с исключением влияния единичных возмущений в интеллектуальных системах автоматического управления движением поездов метрополитена.

Ключевые слова: прогнозирование; экстраполяторы; погрешности прогноза; случайные возмущения; единичные возмущения; детектирование единичных возмущений; алгоритм; интеллектуальная система; автоматическое управление; поезда метрополитена.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-03-239-246

▼ Введение

Прогнозирование случайных возмущений позволяет улучшить качество управления в технических и социальных системах [1–6], использовать достоинства методов предиктивной диагностики систем [7–14], позволяет принимать эффективные решения в условиях неопределенности [15–17].

Примером использования прогноза возмущений для выработки управления является применение экстраполятора l -го порядка в интеллектуальных системах управления движением поездов метрополитена [16]. Задача управления ставится следующим образом: необходимо, имея для каждого поезда линии плановое время прибытия и отправления с каждой станции

и получая информацию о фактическом времени прибытия и отправления каждого поезда линии с каждой станции, рассчитать для каждого n -го поезда, отправляющегося с $(j - 1)$ -й станции, время хода до j -й станции и длительность стоянки этого поезда на j -й станции так, чтобы минимизировать рассогласование между плановым и реальным графиками остановок и обеспечить тем самым $(n + 1)$ -му поезду, следующему за n -м по данному перегону, движение без необходимости ограничения скорости системами безопасности.

Дополнительно в процессе управления учитываются возможности выбора времени хода сзади идущего поезда с учетом минимизации расхода энергии на тягу. Показано, что при прочих

равных, для известного времени хода по j -му перегону минимальный интервал следования между впереди идущим n -м и сзади идущим $(n - 1)$ -м поездами линейно зависит от длительности стоянки n -го поезда на j -й станции.

В случае интенсивного пассажиропотока режим управления $(n - 1)$ -го поезда рассчитывается до прибытия n -го поезда на j -ую станцию и случайная величина отклонения реальной длительности стоянки n -го поезда на j -й станции от плановой неизвестна. Эта случайная величина (возмущение), как правило, определяется наличием большого количества пассажиров, при котором увеличивается длительность процесса входа и выхода пассажиров. Так как высокая плотность пассажиропотока, соответствующая часам пик, мгновенно не изменяется, то рассматриваемые возмущения для последовательно отстающих на j -й станции поездов коррелированы между собой.

Анализ погрешностей прогноза для различных стационарных сигналов, заданных своими автокорреляционными функциями, приведены в [17]. Учитывая возможную нестационарность случайных возмущений, разработан адаптивный экстраполятор, позволяющий автоматически изменять свою структуру в условиях нестационарности с целью уменьшения погрешности прогноза.

Алгоритм управления движением поездов на линии метрополитена, использующий прогноз возмущений, приведен в работе [18]. Вместе с тем возможны случаи единичных случайных возмущений, в частности вызванных недисциплинированностью отдельных пассажиров. Для этих условий необходимо проанализировать функционирование экстраполятора, определить погрешности прогноза, выбрать методы, позволяющие отличить стационарные возмущения от единичных.

Целью данной статьи является анализ функционирования экстраполяторов l -го порядка, построенных на базе многочленов Чебышева, ортогональных на множестве равноотстоящих точек. Коэффициенты прогнозирующего многочлена выбираются по методу наименьших квадратов [19, 20]. Результаты анализа используются для выбора алгоритма, позволяющего отличить отдельные возмущения от случайных процессов.

1. Математическая модель экстраполятора

Формализацию модели приведем на языке теории импульсных систем [19, 21]. Текущее время t определим в соответствии с формализацией теории импульсных систем в виде:

$$t = (n + \varepsilon)T,$$

где T — шаг временной дискретизации;

$n = -2, -1, 0, 1, 2, \dots$ — текущий номер шага временной дискретизации;

$0 \leq \varepsilon \leq 1$ — дробная часть шага временной дискретизации.

Пусть $x[(n + \varepsilon)T]$ — случайный процесс на входе экстраполятора. Значения этого процесса известны в моменты времени $(n - M + i)T$, где $i = 0, 1, \dots, M$; $M + 1$ — число отсчетов, предшествующих началу прогноза.

Как показано в [22], результат прогноза $z[(n + \varepsilon)T]$ на временном интервале от nT до $(n + 1)T$ определяется выражением:

$$z[(n + \varepsilon)T] = \sum_{i=0}^M x[(n - M + i)T] L_i^{\varepsilon, \text{кв}, l} [0, \varepsilon], \quad (1)$$

$$L_i^{\varepsilon, \text{кв}, l} [0, \varepsilon] = \sum_{j=0}^l \frac{\varphi_{j,m}(i) \varphi_{j,m}(M + \varepsilon)}{\varphi_{j,m}^2}, \quad (2)$$

где верхний индекс $L_i^{\varepsilon, \text{кв}, l}$ свидетельствует о том, что используется экстраполятор (э), метод наименьших квадратов (кв), порядок экстраполятора l ,

$\varphi_{j,m}(\dots)$ — многочлены Чебышева, ортогональные на множестве равноотстоящих точек, заданные следующим рекуррентным соотношением:

$$\begin{aligned} i\varphi_{j,m}(i) &= -\frac{(j+1)(M-j)}{2(2j+1)}\varphi_{j+1,m}(i) + \\ &+ \frac{M}{2}\varphi_{j,m}(i) - \frac{j(M+j+1)}{2j+1}\varphi_{j-1,m}(i). \end{aligned} \quad (3)$$

Начальные условия для (3):

$$\varphi_{0,m}(i) = 1; \quad (4)$$

$$\varphi_{1,M}(i) = 1 - \frac{2i}{M}, \quad (5)$$

где l — степень экстраполирующего многочлена $z[(n + \varepsilon)T]$, ($l \leq M$); l в дальнейшем назовем порядком экстраполятора;

$$\varphi_{j,M}^2 = \sum_{i=0}^M \varphi_{j,M}^2(i).$$

При $l = M$ экстраполирующий многочлен совпадает с многочленом, полученным по итерационной формуле Лагранжа.

В [22] доказаны следующие свойства $L_i[0, \varepsilon]$:

$$L_i^{\varepsilon, \text{KB}, l+1}[0, \varepsilon] = L_i^{\varepsilon, \text{KB}, l}[0, \varepsilon] + \frac{\varphi_{l+1,M}(i) \cdot \varphi_{l+1,M}(M + \varepsilon)}{\varphi_{l+1,M}^2}; \quad (6)$$

$$\sum_{i=0}^M L_i^{\varepsilon, \text{KB}, l}[0, \varepsilon] = 1. \quad (7)$$

Формулы многочленов Чебышева приведены в [23]. Авторами данной статьи разработан цифровой двойник экстраполятора, в котором, наряду с прочими, реализована процедура получения многочленов Чебышева и выражений $L_i^{\varepsilon, \text{KB}, l}[0, \varepsilon]$.

2. Реакция экстраполятора порядка на входной сигнал, моделирующий единичное возмущение

Единичное возмущение представим в виде:

$$x[(n + \varepsilon)T] = \begin{cases} 1 & \text{при } n = 0; \varepsilon = 0 \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (8)$$

Тогда, после подставления (8) в (1) получаются следующие соотношения:

$$\begin{aligned} z[0, \varepsilon] &= L_M^{\varepsilon, \text{KB}, l}[0, \varepsilon] \\ z[1, \varepsilon] &= L_{M-1}^{\varepsilon, \text{KB}, l}[0, \varepsilon] \\ &\dots \\ z[k, \varepsilon] &= L_{M-k}^{\varepsilon, \text{KB}, l}[0, \varepsilon] \\ &\dots \\ z[M, \varepsilon] &= L_0^{\varepsilon, \text{KB}, l}[0, \varepsilon] \\ z[n \geq M, \varepsilon] &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Откуда следует, что длительность отклика на единичное возмущение, заданное выражением (8), составляет $(M + 1)T$.

Погрешность прогноза:

$$\Theta[(n + \varepsilon)T] = z[(n + \varepsilon)T] - x[(n + \varepsilon)T]. \quad (10)$$

для единичного возмущения (8):

$$\Theta[k + \varepsilon] = \begin{cases} L_{M-k}^{\varepsilon, \text{KB}, l}[0, \varepsilon], & k = M, M-1, \dots, 0 \\ 0 & \text{при } k \in (-\infty, 0) \cup [M+1, +\infty) \end{cases}. \quad (11)$$

Графики $\Theta[k + \varepsilon]$ для различных экстраполяторов от $l = 0$ до $l = 5$ и различных $M \geq l$ приведены на рис. 1 и 2.

Анализ результатов расчета позволяет сделать следующие выводы:

- экстраполяция при единичном входном сигнале дает погрешность прогноза на $(M + 1)$ тактов. То есть увеличение количества точек, по которым производится экстраполяция, приводит к увеличению длительности воздействия погрешности единичного возмущения на прогноз;
- при фиксированном порядке экстраполятора увеличение числа точек, по которым выполняется прогноз, приводит к уменьшению модуля максимума погрешности (см. таблицу);
- при фиксированном числе точек, по которым выполняется прогноз, увеличение порядка экстраполятора ($l \leq M$) приводит к увеличению модуля максимума погрешности (см. таблицу);
- при фиксированном порядке экстраполятора, в случае $M = l$, что соответствует использованию интерполяционной формулы Лагранжа для экстраполяции, модуль максимума погрешности наибольший.

Величина модуля максимума погрешности экстраполяции при единичных возмущениях для различных M и $l \leq M$.

	$l = 0$	$l = 1$	$l = 2$	$l = 3$	$l = 4$	$l = 5$
$M = l$	1	2	3	4	10	20
$M = l + 1$	0,5	1,333	2,25	3,2	4,167	7,143
$M = 10$	0,091	0,364	0,818	1,454	2,273	3,273
$M = 40$	0,024	0,098	0,219	0,390	0,610	0,878

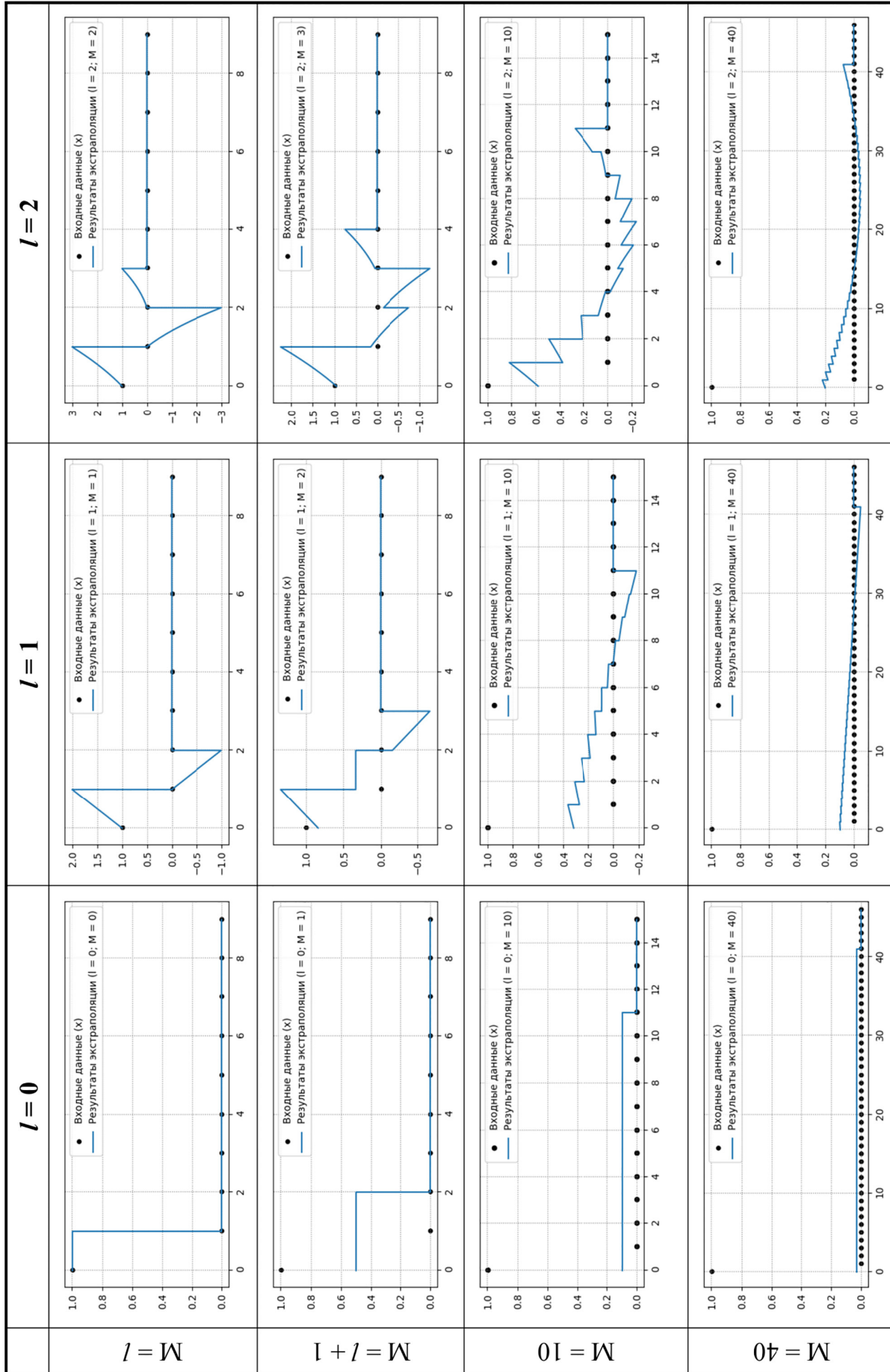


Рис. 1. Графики погрешностей прогнозов экстраполяторов степени $l = 0, 1, 2$ при единичном возмущении

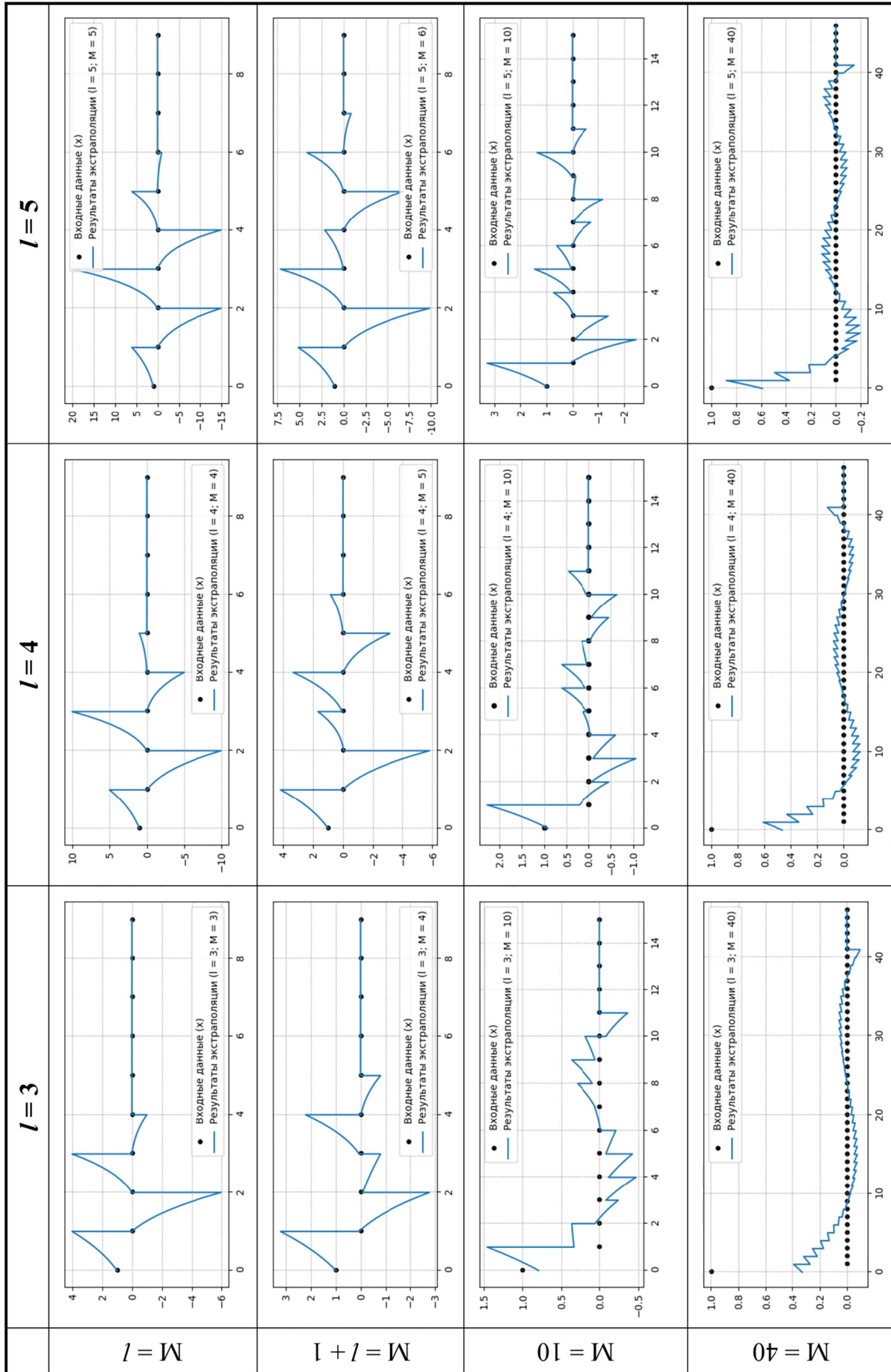


Рис. 2. Графики погрешностей прогнозов экстраполяторов степени $l = 3, 4, 5$ при единичном возмущении

Приведенные результаты свидетельствуют о необходимости использования детектора, определяющего наличие единичных возмущений при функционировании экстраполятора, работающего в реальном времени в системе управления. Учитывая, что при каждом значении $t = nT$, если $m \leq n - 1$, известно $x[mT]$, можно в момент $t = (n - 1)T$ при условии $x[nT] \geq 0$, например, предположить, что возмущение может быть единичным и использовать экстраполяцию 0 порядка, приняв $z[nT] = x[(n - 1)T]$. Если при этом $x[nT] = 0$, то предположение подтверждается и возмущение считается единичным, что далее учитывается в алгоритме работы экстраполятора. Это решение используется в разрабатываемом алгоритме централизованного управления движением поездов метрополитена.

Заключение

1. Получено аналитическое выражение, и проведен расчет величин погрешностей прогноза экстраполяторов, использующих многочлены Чебышева ортогональных на множестве равноотстоящих точек с прогнозирующим многочленом, коэффициенты которого вычислены по методу наименьших квадратов, при единичных возмущениях. Приведены графики изменения величин погрешностей прогноза во времени при единичных возмущениях.

2. Проведен анализ работы экстраполятора в условиях единичных возмущений; показана необходимость детектирования этих возмущений и исключения их влияния на величину погрешности прогноза случайных возмущений при наличии статистической связи между отсчетами этих возмущений.

3. Рассмотрен алгоритм детектирования единичных возмущений и их исключения в процедуре прогноза.

4. Экстраполяторы случайных возмущений с исключением погрешностей прогноза, вызванных единичными возмущениями, эффективно использовать в интеллектуальных системах автоматического управления, предиктивной диагностики, поддержки принятия решений.

5. Дальнейшим направлением исследования будет имитационное моделирование систем автоматического управления движения

поездов на линии метрополитена встроенным алгоритмом прогнозирования возмущений при условии исключения единичных случайных возмущений. ▲

Библиографический список

1. Petropoulos F. Forecasting: Theory and practice / F. Petropoulos, Ya. Kang, F. Li et al. // *International Journal of Forecasting*. — 2022. — Vol. 38. — Iss. 3, July—September. — Pp. 705–871. — DOI: 10.1016/j.ijforecast.2021.11.001.
2. Silitonga S. Survey on damage mechanics models for fatigue life prediction / S. Silitonga, J. Maljaars, F. Soetens et al. // *Heron*. — 2013. — Vol. 58. — Iss. 1. — Pp. 25–60.
3. Kim Y. Introduction to Kalman Filter and Its Applications / Y. Kim, H. Bang // *IntechOpen*. — 2018. — DOI: 10.5772/intechopen.80600.
4. Grewal M. S. Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB / M. S. Grewal, A. P. Andrews // *John Wiley & Sons*. — 2015. — P. 640.
5. Asadi F. Adaptive Kalman Filter for Noise Estimation and Identification with Bayesian Approach / F. Asadi, S. H. Sadati // *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mathematical and Computational Sciences*. — 2021. — Vol. 15. — Iss. 10.
6. Serradilla O. Deep learning models for predictive maintenance: a survey, comparison, challenges and prospects / O. Serradilla, E. Zugasti, J. Rodriguez et al. // *Applied Intelligence*. — 2022. — DOI: 10.1007/s10489-021-03004-y.
7. Mosavi A. Structural Damage Diagnosis and Prediction Using Machine Learning and Deep Learning Models: Comprehensive Review of Advances / A. Mosavi. — Preprints.org 2019, 2019120149. — DOI: 10.20944/preprints201912.0149.v1.
8. Byington Carl S. Handbook of Multisensor Data Fusion / S. Byington Carl, K. Garga Amulya // Ch. 23. Data Fusion for Developing Predictive Diagnostics for Electromechanical Systems // *CRC Press*, 2009.
9. Bezerra A. The use of artificial intelligence for assessing an overpass affected by Alkali-Silica Reaction (ASR) / A. Bezerra, C. Trottier, L. F. M. Sanchez // Ch. 40. Data Fusion for Developing Predictive Diagnostics for Electromechanical Systems // *CRC Press*. — 2022. — Pp. 354–361. — DOI: 10.1201/9781003322641-40.
10. Smit N. Guide for the Monitoring, Diagnosis and Prognosis of Large Motors / N. Smit, Convener, S. Bhumiwat et al. // *Cigre Working Group A1.26*. — December 2013. — P. 53.
11. Gulgec N. S. Structural Damage Detection Using Convolutional Neural Networks / N. S. Gulgec, M. Takác, S. Pakzad // *Model Validation and Uncertainty Quantification*. — 2022. — Vol. 3. — Pp. 331–337. — DOI: 10.1007/978-3-319-54858-6_33.
12. Kashevarova G. G. Technical diagnostics of reinforced concrete structures using intelligent systems / G. G. Kashevarova, Yu. L. Tonkov // *Magazine of Civil Engineering*. — 2020. — Iss. 1(93). — Pp. 13–26. — DOI: 10.18720/MCE.93.2.
13. Bulgakov A. Cyber-physical System for Diagnosing and Predicting Technical Condition of Servo-drives of Mechatronic Sliding Complex during Construction of High-

rise Monolithic Buildings / A. Bulgakov, T. Bock, T. Kruglova // 2020 Proceedings of the 37th ISARC, Kitakyushu, Japan. — Pp. 339–346.

14. Масалимов К. А. Применение двунаправленных сетей долгой краткосрочной памяти для определения износа режущего инструмента станков с числовым программным управлением в процессе эксплуатации / К. А. Масалимов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. — 2021. — Т. 9, № 4(35). — DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.014.
15. Byington C. S. Handbook of Multisensor Data Fusion / C. S. Byington, A. K. Garga // Ch. 17. Studies and Analyses within Project Correlation: An In-Depth Assessment of Correlation Problems and Solution Techniques // CRC Press, 2009.
16. Баранов Л. А. Централизованное управление движением поездов городских железных дорог современного мегаполиса / Л. А. Баранов, Е. П. Балакина, С. Е. Иконников и др. // Наука и техника транспорта. — 2020. — № 1. — С. 30–38.
17. Баранов Л. А. Влияние прогноза рассогласования на качество управления в замкнутых автоматических системах / Л. А. Баранов, О. Е. Пудовиков, Е. П. Балакина // Электротехника. — 2022. — № 9. — С. 8–15.
18. Баранов Л. А. Метрополитен Мехико. Алгоритм движения / Л. А. Баранов, П. Ю. Воробьев // Мир транспорта. — 2012. — № 4. — С. 106–113.
19. Баранов Л. А. Квантование по уровню и временная дискретизация в цифровых системах управления / Л. А. Баранов. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — С. 304.
20. Березин И. С. Методы вычислений / И. С. Березин, И. П. Жидков. — М.: Физматгиз, 1959. — Т. 1. — С. 464.
21. Цыпкин Я. З. Теория линейных импульсных систем / Я. З. Цыпкин. — М.: Физматиздат, 1963. — С. 968.
22. Баранов Л. А. Прогнозирование случайных процессов на базе многочленов, ортогональных на множестве равноотстоящих точек / Л. А. Баранов, Е. П. Балакина // Электротехника. — 2020. — № 9. — С. 39–46.
23. Милн В. Э. Численный анализ / В. Э. Милн. — М.: ИЛ, 1951. — 292 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 3, pp. 239–246
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-03-239-246

Forecasting Random Processes in Intelligent Transport Systems with Singular Perturbations

Information about authors

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

E-mail: baranov.mii@gmail.com

Anokhin A. S., Student. E-mail: antonanohin26@gmail.com

Zherebyatin I. A., Student. E-mail: opoxil@mail.ru

Zhang Yongqiang, Postgraduate Student. E-mail: zyzq0526@yandex.ru

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

Abstract: Forecasting random perturbations allows improving the control quality in intelligent transport systems and ensuring the efficient operation of diagnostic systems. Several works are known where extrapolator models based on Chebyshev polynomials orthogonal on equidistant points are presented. These models use a predictive polynomial whose coefficients are computed using the least squares criterion. Additionally, an analysis of forecast errors for random stationary input signals has been conducted. At the same time, in the case of non-stationary input signals, singular perturbations may occur, the influence of which on the extrapolator leads to significant forecast errors.

This article presents an example of the occurrence of additive perturbations that arise in automatic train control systems. An analytical expression has been derived, and calculations of forecast error magnitudes in the presence of singular perturbations have been conducted. The analysis of the calculation results allows determining the influence of extrapolator parameters on the forecast error magnitude, highlighting the necessity of detecting singular perturbations, and excluding their influence on the forecast error magnitude.

The article discusses an algorithm for detecting singular perturbations and their exclusion during the forecasting process. The conclusion is drawn about the effectiveness of using extrapolators for random perturbations with the exclusion of singular perturbations in intelligent systems for automatic train control in subway transportation.

Keywords: forecasting; extrapolators; forecast errors; random perturbations; singular perturbations; detection of singular perturbations; algorithm; intelligent system; automatic control; subway trains.

References

1. Petropoulos F., Kang Ya., Li F. et al. Forecasting: Theory and practice. International Journal of Forecasting, 2022, vol. 38, Iss. 3, July — September, pp. 705–871. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2021.11.001.
2. Silitonga S., Maljaars J., Soetens F. et al. Survey on damage mechanics models for fatigue life prediction. Heron, 2013, vol. 58, Iss. 1, pp. 25–60.
3. Kim Y., Bang H. Introduction to Kalman Filter and Its Applications. IntechOpen, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.80600.
4. Grewal M. S., Andrews A. P. Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB. John Wiley & Sons, 2015, p. 640.
5. Asadi F., Sadati S. H. Adaptive Kalman Filter for Noise Estimation and Identification with Bayesian Approach. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mathematical and Computational Sciences, 2021, vol. 15, Iss. 10.
6. Serradilla O., Zugasti E., Rodriguez J. et al. Deep learning models for predictive maintenance: a survey, comparison, challenges and prospects. Applied Intelligence, 2022. DOI: 10.1007/s10489-021-03004-y.
7. Mosavi A. Structural Damage Diagnosis and Prediction Using Machine Learning and Deep Learning Models: Comprehensive Review of Advances. Preprints.org 2019, 2019120149. DOI: 10.20944/preprints201912.0149.v1.
8. Byington C. S., Amulya K. G. Handbook of Multisensor Data Fusion / S. Byington Carl, // Ch. 23. Data Fusion for Developing Predictive Diagnostics for Electromechanical Systems // CRC Press, 2009.
9. Bezerra A., Trottier C., Sanchez L. F. M. The use of artificial intelligence for assessing an overpass affected by Alkali-Silica Reaction (ASR). Ch. 40. Data Fusion for Developing Predictive Diagnostics for Electromechanical Systems. CRC Press, 2022, pp. 354–361. DOI: 10.1201/9781003322641-40.
10. Smit N., Convener, Bhumiwat S. et al. Guide for the Monitoring, Diagnosis and Prognosis of Large Motors. Cigre Working Group A1.26. December 2013, p. 53.
11. Gulgec N. S., Takác M., Pakzad S. Structural Damage Detection Using Convolutional Neural Networks. Model Validation and Uncertainty Quantification, 2022, vol. 3, pp. 331–337. DOI: 10.1007/978-3-319-54858-6_33.

12. Kashevarova G. G., Tonkov Yu. L. Technical diagnostics of reinforced concrete structures using intelligent systems. *Magazine of Civil Engineering*, 2020, Iss. 1(93), pp. 13–26. DOI: 10.18720/MCE.93.2.
13. Bulgakov A., Bock T., Kruglova T. Cyber-physical System for Diagnosing and Predicting Technical Condition of Servo-drives of Mechatronic Sliding Complex during Construction of High-rise Monolithic Buildings. 2020 Proceedings of the 37th ISARC, Kitakyushu, Japan, pp. 339–346.
14. Masalimov K. A. Primenenie dvunapravlennykh setey dolgoy kratkosrochnoy pamyati dlya opredeleniya iznosa rezhushchego instrumenta stankov s chislovyim programmym upravleniem v protsesse ekspluatatsii [The use of bidirectional networks of long short-term memory to determine the wear of the cutting tool of machine tools with numerical control during operation]. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technologies]. 2021, vol. 9, Iss. 4(35). DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.014. (In Russian)
15. Byington C. S., Garga A. K. Handbook of Multisensor Data Fusion. Ch. 17. Studies and Analyses within Project Correlation: An In-Depth Assessment of Correlation Problems and Solution Techniques. CRC Press, 2009.
16. Baranov L. A., Balakina E. P., Ikonnikov S. E. Tsentralizovannoe upravlenie dvizheniem poezdov gorodskikh zheleznnykh dorog sovremennogo megapolisa [Centralized traffic control of urban railways in a modern metropolis]. *Nauka i tekhnika transporta* [Nauka i Tekhnika Transporta]. 2020, Iss. 1, pp. 30–38. (In Russian)
17. Baranov L. A., Pudovikov O. E., Balakina E. P. Vliyaniye prognoza rassoglasovaniya na kachestvo upravleniya v zamknutykh avtomaticheskikh sistemakh [Influence of mismatch prediction on the quality of control in closed automatic systems]. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering]. 2022, Iss. 9, pp. 8–15. (In Russian)
18. Baranov L. A., Vorob'ev P. Yu. Metropolitn Mekhiko. Algoritm dvizheniya [Metropolitan Mexico City. Movement algorithm]. *Mir transporta* [World of transport]. 2012, Iss. 4, pp. 106–113. (In Russian)
19. Baranov L. A. *Kvantovanie po urovnyu i vremennaya diskretizatsiya v tsifrovyykh sistemakh upravleniya* [Level quantization and time discretization in digital control systems]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1990, p. 304. (In Russian)
20. Berezin I. S., Zhidkov I. P. *Metody vychisleniy* [Computational methods]. Moscow: Fizmatgiz Publ., 1959, vol. 1, p. 464. (In Russian)
21. Tsypkin Ya. Z. *Teoriya lineynykh impul'snykh sistem* [Theory of linear impulse systems]. Moscow: Fizmatizdat Publ., 1963, p. 968. (In Russian)
22. Baranov L. A., Balakina E. P. Prognozirovaniye sluchaynykh protsessov na baze mnogochlenov, ortogonal'nykh na mnozhestve ravnootstoyashchikh toчек [Forecasting random processes based on polynomials orthogonal on the set of equidistant points]. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering]. 2020, Iss. 9, pp. 39–46. (In Russian)
23. Miln V. E. *Chislennyy analiz* [Numerical analysis]. Moscow: IL Publ., 1951, 292 p. (In Russian)

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА МОДЕЛИРОВАНИЕМ ТРАФИКА

ДЯТЛОВ Валерий Васильевич, старший преподаватель¹; e-mail: dyatlov57@mail.ua

ТРУНАЕВ Андрей Михайлович, канд. техн. наук, доцент кафедры²; e-mail: andrey.trunayev@mail.ru

¹Донецкая академия управления и государственной службы, кафедра «Административного права», Донецк

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

В статье рассматриваются вопросы, связанные с возможностью использования передовых технологий при оперативном управлении автомобильными транспортными потоками на линиях. Проанализированы современные направления исследований в области управления транспортными потоками. Раскрыты вопросы экономической эффективности пассажирских предприятий в условиях современных вызовов, а также выделены особенности процесса мониторинга и диспетчеризации автомобильного транспорта на примере карты основных маршрутов города Донецка. Выполнено моделирование основ функционирования и развития механизмов управления предприятиями пассажирского транспорта. Отмечена важность автоматизированных систем и информационных технологий в вопросах обеспечения условий безопасности дорожного движения. Предложена модель оптимизации автомобильного дорожного движения в городских условиях, которая решает задачи повышения экономической стабильности и эффективности предприятий автомобильного сегмента, регулирования тарифов на муниципальные пассажирские перевозки, а также безопасности дорожного движения. В результате исследования были выявлены значимые факторы повышения экономического эффекта от оптимизации дорожного движения на маршрутах следования пассажирского транспорта в городских условиях.

Ключевые слова: пассажирский транспорт; транспортный потенциал; автомобильный транспорт; муниципальный транспорт; транспортные потоки; автоматизированные системы; предприятие; экономический эффект; модель; менеджмент.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-03-247-257

▼ Введение

Транспорт является одной из крупнейших базовых отраслей хозяйства, важнейшей составной частью производственной и социальной инфраструктуры. Он является одним из важных инструментов, обеспечивающих территориальную целостность страны, играет важнейшую роль в социально-экономическом развитии городов и регионов в целом. Изучение аналитики распределения пассажиропотоков по городским маршрутам позволило спрогнозировать изменения пассажиропотока и трафика от внедрения механизма оптимизации дорожного движения на маршрутах следования пассажирского транспорта.

Выявленные транспортные проблемы, возникающие на предприятиях пассажирского транспорта, будут решаться, в том числе и путем внедрения новых информационных

технологий, таких как система управления дорожными сигналами, система навигации автомобиля, система автоматического распознавания номерных знаков и других систем, которые передают оперативные данные и обеспечивают обратную связь. Решаемые таким образом задачи позволяют увеличивать прибыль, снижать издержки на предприятиях пассажирского транспорта, что, в свою очередь, влияет на повышение безопасности.

Оптимизация дорожного движения в современных условиях при неснижении количественных и качественных показателей обеспечивает решение задач, связанных с развитием механизма управления предприятиями пассажирского автомобильного транспорта с целью достижения их социально-экономической эффективности, что позволяет устранить выявленные недостатки.

Сложившаяся экономическая обстановка в Донецкой Народной Республике (далее — Республика), требует адаптации процессов регулирования хозяйственной деятельности, и в приоритете — транспортная отрасль, которая является связующей между всеми отраслями народного хозяйства к условиям современных вызовов. Одним из главных направлений транспортной отрасли в современных условиях социально-экономической адаптации, которая обеспечивает жизнедеятельность граждан, является автомобильный сегмент транспортной отрасли. Автомобильный сегмент транспортной отрасли направлен для решения экономических задач, связанных с увеличением перевозки грузов, грузооборота и пассажиров. Пассажирский транспорт в обозначенной для исследования территории в настоящее время испытывает некоторые осложнения, и даже в современных условиях пассажирский транспорт в большей степени остается нерентабельным. С целью разрешения вопросов нерентабельности пассажирского транспорта предлагается внедрение современных технологий для оперативного управления транспортными потоками, автоматизированных систем мониторинга и диспетчеризации на автомобильном транспорте. Необходимо мотивирование деятельности организаций по повышению качества услуг, то есть государственные структуры определенными инструментами должны повлиять на развитие механизма регулирования предприятиями пассажирского транспорта Республики, для объединения элементов (технический, технологический, организационный, финансовый, экономический), направленных в единый механизм, создавая новые объекты управления дорожным движением.

Особенности формирования и реализации потенциала транспортных предприятий определяются особенностями транспорта и его продукции. Транспортная отрасль играет важную роль в функционировании и развития экономики Республики, является одной из базовых отраслей экономики, призвана удовлетворять потребности населения и общественного производства в перевозках. Транспорт призван обеспечивать территориальные связи, определяет эффективность развития и

размещения продуктивных сил в разных регионах. На формирование потенциала транспортных предприятий оказывают влияние внешние и внутренние факторы. Важнейшей особенностью транспортной отрасли является пространственно-сетевой характер расположения ее объектов, что обуславливает тесную взаимосвязь с территорией, размещением производства и системой расселения. Установлено, что потенциал транспортной отрасли как социально-экономической системы формируется под влиянием общего состояния экономики страны, политической ситуации, правовой базы состояния экологии, ускорения научно-технического прогресса, доходов потребителей, налогового регулирования, льготного кредитования для развития потенциала предприятий, спроса и предложения на рынке транспортных услуг.

Целью данного исследования является разработка инструмента по оптимизации автомобильного дорожного движения в городских условиях для повышения экономической стабильности и эффективности предприятий автомобильного сегмента РФ.

1. Исследование вопросов экономической эффективности пассажирских предприятий

Непосредственно процесс оказания транспортной услуги обеспечивается предприятием (логистической организацией). Необходимо создание системы управления городскими пассажирскими перевозками, позволяющей согласовать интересы основных субъектов и обеспечить решение существующих проблем. Авторами предлагается оптимизация системы управления городскими пассажирскими перевозками на основании решения уже ранее упомянутых проблем, а именно: развитие и реорганизация механизма управления в сфере услуг пассажирского транспорта с использованием новых методов и моделей принятия управленческих решений; совершенствование механизма обеспечения безопасности дорожного движения; совершенствование механизма регулирования тарифов пассажирских перевозок [1, 2].

Теоретический анализ литературы по изучению механизмов управления предприятиями

пассажи́рского транспорта производился, и ранее исследовались проблемы совершенствования государственного регулирования механизмов управления систем пассажирского транспорта, особенности организации транспортного процесса, зарубежный опыт государственного регулирования механизмов управления транспортными системами городов. Немаловажным был и остается вопрос взаимодействия властных и предпринимательских структур, эти вопросы наиболее полно рассмотрены в работах, касающихся исследования опыта зарубежных стран, который определяет поиск оптимальной системы взаимодействия.

Вопросами эффективности субъектов хозяйствования транспортной отрасли и повышения их рентабельности занимались отечественные и зарубежные ученые и практики: И. Ансофф [1], А. К. Берко [2], Е. В. Будрина [3], И. Н. Горячкина [4], В. В. Зырянов [5], В. С. Козлов [6–9], М. С. Комов [10], Н. А. Коньчева [4], А. Е. Кравченко [11], Н. А. Логинова [3], А. Б. Мартынушкин [4], Т. В. Мелькумова [4], В. В. Терентьев [4], В. Н. Трегубов [12], И. В. Федоскина [4], Б. В. Чегодаев [7], А. В. Шемякин [4]. В своих работах ученые рассматривают вопросы по исследованию системы стратегического и оперативного управления транспортом, различные аспекты государственного регулирования функционирования и развития транспортных инфраструктур, вопросы государственного регулирования тарифов на пассажирском транспорте. Раскрывают особенности административно-правового регулирования организации и функционирования пассажирского транспорта, принятия управленческих решений органами государственной власти и управления, а также вносят предложения по совершенствованию действующего законодательства в указанной сфере.

В исследованиях авторов А. К. Берко, В. С. Козлова, Е. В. Будриной, Н. А. Логиновой поднимаются вопросы транспортных систем, особенностей управления инфраструктурными субъектами транспортной отрасли, но вопросы регулирования движения в условиях городского движения не раскрываются в полной мере.

М. С. Комов, А. Е. Кравченко, В. Н. Трегубов исследуют вопросы транспортных потоков

использования современных систем управления в плоскости от городского пассажирского до регионального уровня, но вопросы увязывания трафика городского общественного транспорта и цифровых спутниковых технологий для повышения пропускной способности на линии не раскрываются в полной мере, а также вопрос безопасности и экономии средств городского бюджета не нашел отражения в работах ученых.

Важное место в совершенствовании всей системы пассажирского транспорта занимают развитие и реорганизация механизма управления в сфере услуг пассажирского транспорта с использованием новых методов и моделей принятия управленческих решений на основе цифровых технологий.

Общие теоретические вопросы разработки и внедрения элементов автоматизированной системы управления получили широкое рассмотрение в отечественной и зарубежной литературе авторами: А. J. R. Pawley [13], Н. J. Miller [14], K. Bengler, K. Dietmayer, B. F rber, M. Maurer, C. Stiller, H. Winner [15].

В странах Западной Европы транспортная отрасль чуть ли не единственная сфера, в которой сохраняются государственное финансирование, государственное управление и государственная собственность на имущество. Государственная управляемость транспортной системой обеспечивает подвижность населения, социальную стабильность и высокую производительность труда на различных предприятиях [1–3, 6].

Автоматизированная система управления в транспортной отрасли охватывает основные задачи и функции управления деятельностью предприятия. Она обеспечивает принятие управленческих решений на основании информации, получаемой при помощи новейших информационных систем, обеспечивает возможность ведения оперативного, бухгалтерского и управленческого учета. Она охватывает и координирует все управленческие процессы предприятия на основе единого информационного пространства.

Для того чтобы своевременно принимались соответствующие решения стратегического и тактического планирования, финансового и экономического прогнозирования и с целью

анализа всей хозяйственной деятельности, автоматизированная система транспортного предприятия должна обеспечивать информацией прежде всего высшее руководство, для оперативного планирования — руководство среднего звена, а также всех специалистов, участвующих в работе пассажирского комплекса, — диспетчеров, ревизорский аппарат, руководство оперативных структур линейного, дорожного уровня управления, маркетологов, специалистов отделов планирования и регулирования пассажирских перевозок, специалистов по продаже услуг пассажирского транспорта.

Высказывались такие мнения, что для улучшения городской мобильности нужно решать вопросы, связанные с предоставлением приоритета развитию общественного транспорта, а не строительству новых магистралей и поддержке автомобильной промышленности, дальнейшее развитие которой только усугубляет назревшие проблемы, поэтому уже сейчас надо переходить к радикальным изменениям теории развития сектора автобусного транспорта за счет выделения соответствующих средств для его развития и прежде всего за счет внедрения интеллектуальных транспортных систем, которые позволяют увеличить пропускную способность автодорог в среднем на 20 %. Внедрять и использовать автоматизированные системы мониторинга и диспетчеризации на автомобильном транспорте. Как показало опытное внедрение с использованием системы ГЛОНАСС (г. Сочи, Санкт-Петербург, Московская область, Норильск, Астраханская область, Северная Осетия, Уфа), что одним из важнейших методов регулирования транспортного спроса является информационное обеспечение участников пассажирских перевозок, эти методы должны обеспечить более равномерное распределение транспортных потоков по улично-дорожной сети, проводить учет расхода топлива, шин, аккумуляторов, нарушений правил дорожного движения маршрутными автобусами, а также осуществлять оперативное управление транспортом с вызовом работников полиции и МЧС, контролировать систему безналичной оплаты проезда с использованием транспортных карт в режиме реального времени.

Половина прошлого века определила у специализированных специалистов понимание и осознание того, что потенциальные возможности индустриальной экономики стали практически нерезультативны для стабильности экономической эффективности как отраслей, так и государства в целом. В это время стали формироваться, развиваться и распространяться способы, методы, технологии, элементы и системы интеллектуальной экономики. Данное обстоятельство привело к появлению и развитию интеллектуального менеджмента, маркетинга, логистики и других концепций управления, как показывают анализы данных статистики и тематики научных школ. Теорию и принципы менеджмента следует отличать от практики. Практика может варьироваться, но основы всегда одинаковы. Например, автомобиль, предназначенный для использования в горах или городе, будет отличаться от автомобиля, предназначенного для скоростных гонок. Но принципы и теории физической науки, используемые для проектирования обоих типов автомобилей, остаются неизменными [9].

Исследование процессов регулирования работы городского пассажирского автомобильного транспорта в Донецком регионе показали, что большая часть из имеющихся 184 светофорных объектов города работают как локальные объекты, сбивая ритм транспортных потоков, и только 78 светофоров включены в автоматизированную систему управления дорожным движением (АСУДД), т. е. координируются системой управления. Дорожно-транспортная сеть не имеет магистралей непрерывного движения. Координация потоков транспортных средств светофорными объектами, включенными в АСУДД в городе, производится только по трем магистралям — ул. Артема, ул. Университетская и проспект Ильича. Улица Университетская имеет одностороннее движение в сторону проспекта Киевского, в обратном направлении транспорт движется по параллельным магистралям — ул. Щорса и ул. Р. Люксембург, но светофорные объекты по данным направлениям в АСУДД не включены (рис. 1). Система параллельно расположенных магистралей действует только

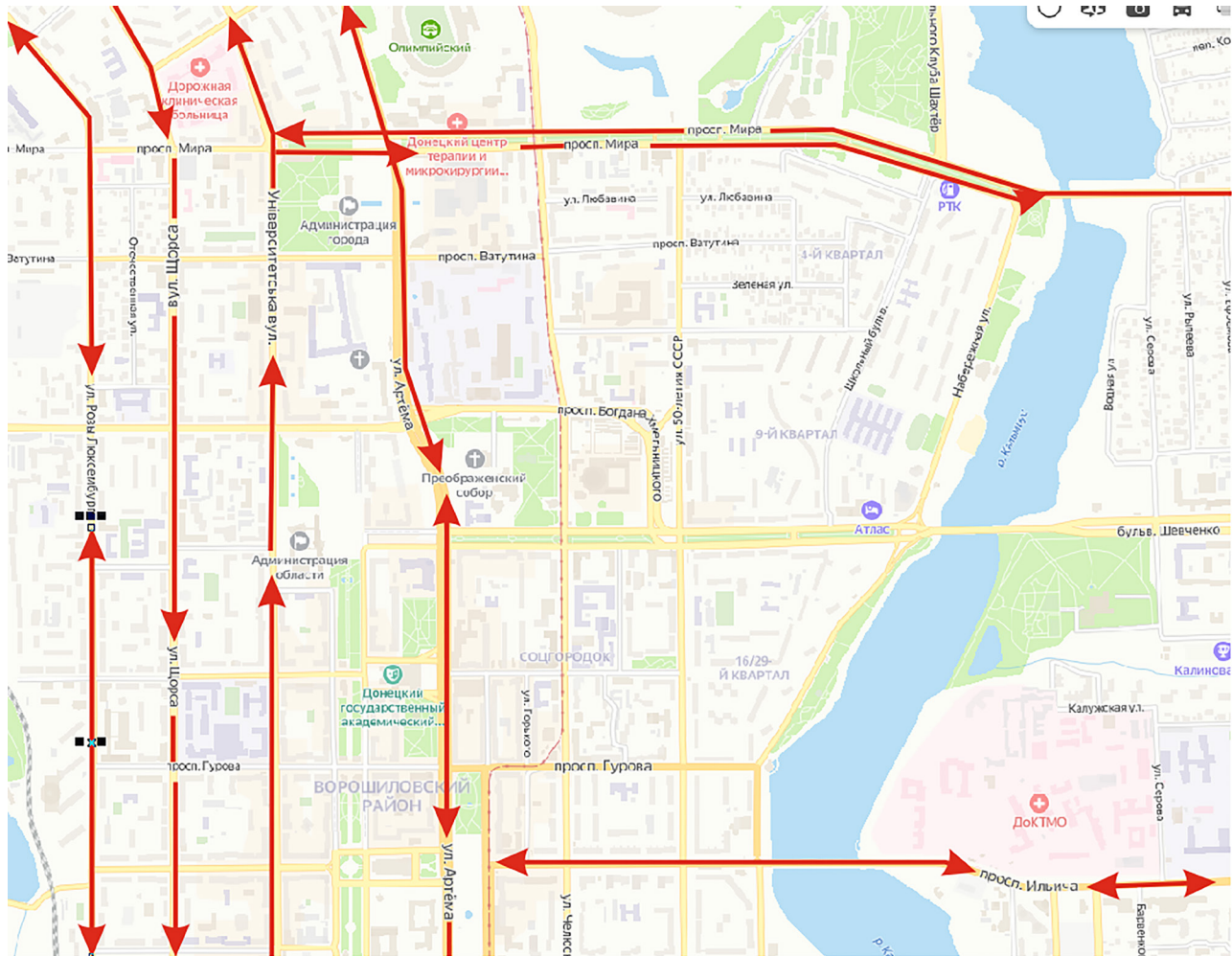


Рис. 1. Карта основных маршрутов города Донецка

в восточном направлении по проспекту Мира, бульвару Шевченко и проспекту Ильича, перераспределяя потоки в центральной части города, но и эти магистрали сходятся в районе путепровода «Мотель».

На основных направлениях транспортных потоков такая система параллельной разгрузки движения транспорта отсутствует. На основных магистралях города и в настоящее время существуют высокие уровни загрузки в часы пик, в результате чего становится невозможным процесс выделения обособленных полос для движения городского пассажирского транспорта без проведения работ по уширению проезжей части улично-дорожной сети. Выделенные полосы для движения маршрутного пассажирского транспорта обустроены по ул. Университетской, ул. 50-летия СССР и проспекту Ильича [16].

АСУДД не предусматривает функцию видеонаблюдения, а значит, возможность

предоставлять оперативную информацию о транспортных потоках, нарушениях правил дорожного движения, а также возможность обеспечить беспрепятственный проезд транспортных средств в чрезвычайных ситуациях отсутствует [17, с. 11].

2. Моделирование основ функционирования и развития механизмов управления предприятиями пассажирского транспорта

Транспортную услугу можно оптимизировать, и для этого перед специалистами ставится целый комплекс задач, чтобы с их помощью увеличить прибыль, снизить возможные издержки.

В процессе моделирования основ функционирования и развития механизмов управления предприятиями пассажирского транспорта оптимизация дорожно-транспортной структуры является вопросом повышенного

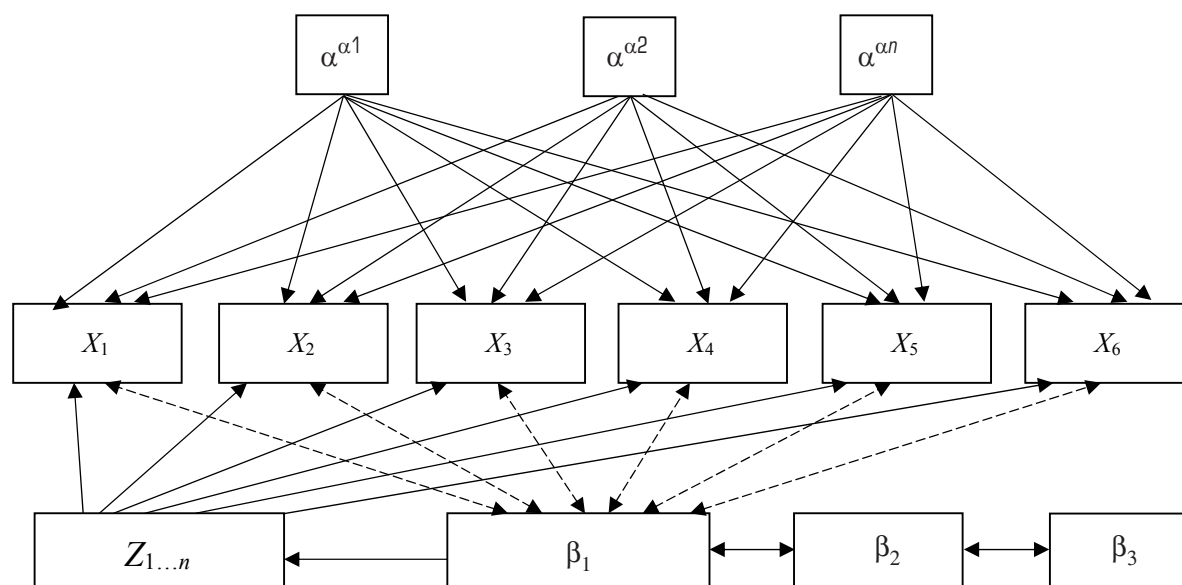


Рис. 2. Модель оптимизации автомобильного дорожного движения в городских условиях:
 $\alpha^{\alpha 1}, \alpha^{\alpha 2}, \alpha^{\alpha n}$ — глобальная навигационная спутниковая система (GPS, ГЛОНАСС); X_1 — горэлектротранспорт;
 X_2 — автобусы (маршрутные, пригородные, междугородные); X_3 — такси; X_4 — грузовой транспорт;
 X_5 — личный автотранспорт; X_6 — мототранспорт; β_1 — Центр управления дорожным движением (ЦУДД);
 β_2 — Центр обработки информации о дорожном движении (ЦОИДД); β_3 — органы внутренних дел (ОВД);
 Z_1 — контроллер приоритета движения; Z_n — светофорный объект

внимания из-за стабильной убыточности инфраструктурных субъектов хозяйствования транспортного потенциала. Вопросы повышения экономической стабильности предприятий, регулирования тарифов на пассажирские перевозки и в области безопасности дорожного движения влияют на оптимизацию транспортной логистики. Оптимизацию возможно осуществить методами транспортной логистики (рис. 2).

При этом необходимо внедрение в транспортную инфраструктуру современных автоматизированных систем, информационных технологий и использование выделенных полос движения для пассажирского транспорта. Если плотность маршрутной сети не позволяет выделить полосы движения для пассажирского транспорта на протяжении всего маршрута, то их необходимо оборудовать на подъездах к интеллектуальным светофорным объектам. Для расширенного обновления дорожно-транспортной сети необходимы капитальные инвестиции.

Оптимизация движения автобусных маршрутов имеет как экономическое, так и социальное значение.

Рассмотрим автотранспортное предприятие, реализующее рейсовые городские пассажирские перевозки. Обозначим через N количество автобусов предприятия, обеспечивающих маршрут. Тогда $X = \{x_i, i = \overline{1, N}\}$ — множество автобусов, реализующих пассажирские перевозки по маршруту (см. рис. 2).

3. Использование автоматизированных систем и информационных технологий для создания условий безопасности движения

Для определения эффективности реализации проекта по оптимизации дорожно-транспортной структуры рассчитаем в первую очередь экономию времени, затрачиваемого на один рейс выбранного маршрута.

1. Время передвижения i -го автобуса по маршруту за один рейс можно представить в виде суммы:

$$T_{H_i} = T_i + T_{св_i} + T_{п_i} + T_{пв_i}, \quad (1)$$

где T_{H_i} — общее время движения по маршруту, час;

T_i — время движения по маршруту без учета простоя, час;

$T_{св_i}$ — время простоя на светофорных объектах, час;

$T_{п_i}$ — время простоя в пробках, час;

$T_{пв_i}$ — общее время посадки, высадки пассажиров, час.

2. Время простоя i -го автобуса на светофорных объектах, размещенных на маршруте:

$$T_{св_i} = Sfr, \quad (2)$$

где S — количество светофорных объектов на маршруте, ед.;

f — длительность фазы переключения светофорного объекта, час;

r — коэффициент проезда автобуса на зеленый сигнал светофора без простоя, который можно рассчитать по формуле:

$$r = \frac{S_{пр_i}}{S}, \quad (3)$$

где $S_{пр_i}$ — количество светофорных объектов, на которых i -й маршрутный автобус простаивает, ожидая разрешающий сигнал светофора;

3. Количество рейсов, совершаемых i -м рейсовым автобусом в обычном режиме за один рабочий день ($P_{к_i}$), рассчитываем по формуле:

$$P_{к_i} = \frac{T_{р_i} - T_{об_i}}{T_{н_i}}, \quad (4)$$

где $T_{р_i}$ — время работы автобуса на маршруте за смену, час;

$T_{об_i}$ — обеденное время, час.

После оборудования выделенной полосы и установки светофорных объектов с контроллерами приоритета движения проезд светофорных объектов транспортом общего пользования будет осуществляться без простоя, кроме того, время простоя в автомобильных пробках сократится до минимума. При приближении транспорта общего пользования к светофорному объекту сигнал через терминал, находящийся на борту маршрутного автобуса, поступает в ЦУДД и ЦОИДД по спутниковой связи или через телекоммуникационную систему (GPS или ГЛОНАСС). Также могут быть

использованы датчики, встроенные в дорожное полотно. После поступления сигнала от бортового терминала ЦУДД предоставляет данные в режиме реального времени контроллеру приоритета движения, встроенному в интеллектуальный модуль управления, который подключен к светофорным объектам. После обработки информации контроллером управляющий сигнал поступает на светофорный объект. Загорается зеленый сигнал, общественный транспорт на светофоре не задерживается (см. рис. 2). Отсюда следует, что время прохождения автобуса по маршруту будет сокращено.

4. Время прохождения j -го рейса ($j = 1, \dots, P_{к_j}$) i -м автобусом по маршруту с учетом автоматизированного управления работой светофорных объектов и наличия выделенной полосы составит:

$$T_{с_i} = T_i + T_{пв_i}, \quad (5)$$

где $T_{с_i}$ — сокращенное время прохождения автобуса по маршруту, час.

5. Количество рейсов ($P_{кн_i}$), совершаемых i -м автобусом за один рабочий день с учетом работы автоматизированной системы управления увеличится:

$$P_{кн_i} = \frac{T_{р_i} - T_{об_i}}{T_{с_i}}. \quad (6)$$

6. Таким образом, дополнительное количество рейсов (ΔP_i) i -го автобуса на маршруте составит:

$$\Delta P_i = P_{кн_i} - P_{к_i}. \quad (7)$$

7. Экономический эффект транспортного предприятия будет достигаться за счет увеличения средней скорости передвижения транспорта общего пользования по маршруту, т. е. за счет увеличения количества рейсов, осуществляемой единицей автомобильного парка, а значит, и увеличения потока пассажиров. Количество дополнительно перевезенных пассажиров i -м маршрутным автобусом за один рабочий день ($\Delta Пп_i$) составит:

$$\Delta Пп_i = \Delta P_i \cdot P_{в_i} \cdot K_{з_i}, \quad (8)$$

где $Pв_i$ — номинальная вместимость i -го автобуса,

$Kз_j$ — средний коэффициент загрузки j -го рейса автобусов маршрута. При этом рейс характеризуется интенсивностью пассажиропотока, зависит от периода прохождения маршрута (t), то есть $j = f(t)$.

Здесь средний коэффициент загрузки j -го рейса рассчитывается:

$$Kз_j = \frac{\sum_{i=1}^{N_j} Kз_{ij}}{N_j}, j = \overline{1, Pкн_i}, \quad (9)$$

где $Kз_{ij}$ — коэффициент загрузки i -го маршрутного автомобильного транспортного средства на j -м рейсе;

N_j — количество автобусов j -го рейса, находящихся на маршруте в период времени t .

В свою очередь, коэффициент загрузки i -го автобуса на j -м рейсе рассчитывается по формуле:

$$Kз_{ij} = \frac{Пп_{ij}}{Pв_i}, \quad (10)$$

где $Пп_{ij}$ — количество перевезенных пассажиров за j -й рейс i -м автобусом (пас.);

8. Количество дополнительно перевезенных пассажиров всеми маршрутными автобусами с учетом работы GPS или ГЛОНАСС за один рабочий день:

$$\Delta Пп = \sum_{i=1}^N \Delta Пп_i, \quad (11)$$

9. Объем дополнительных денежных поступлений (Rp_k) транспортному предприятию за счет внедрения автоматизированной системы на основе ГЛОНАСС на одном маршруте за k -й год ее эксплуатации можно рассчитать по формуле:

$$Rp_k = \Delta Пп \cdot A \cdot 365, \quad (12)$$

где A — тариф на городских автобусных маршрутах общего пользования, которые осуществляются в режиме маршрутного такси и в обычном режиме движения (руб./пас.), рассчитывается по формуле:

$$A = (C + П) / Q, \quad (13)$$

где C — плановая себестоимость услуг (руб.);

$П$ — плановая прибыль (руб.);

Q — запланированный на год объем перевозок (пас.), обосновывается перевозчиками на основании фактических показателей работы или по результатам обследования пассажиропотоков¹.

Параметры экономической целесообразности воспроизведения услуг пассажирского автомобильного транспорта могут быть определены со стороны предприятия и потребителя услуг — пассажира, которые создают формулу предложения и спроса. Со стороны предприятия предельным является необходимая сумма капитальных инвестиций.

10. Для внедрения в транспортную инфраструктуру маршрута движения пассажирского транспорта современных автоматизированных систем, информационных технологий и устройства выделенных полос движения для пассажирского транспорта необходимы стартовые инвестиции:

$$IC = Y + N + Z + R + \beta a, \quad (14)$$

где IC — стартовые инвестиции;

Y — стоимость бортовых терминалов;

N — стоимость оборудования выделенных полос движения общественного транспорта;

Z — стоимость дополнительного оборудования с контроллером приоритета движения;

βa — стоимость оборудования ЦУДД.

11. Общая сумма инвестиций (I), вложенных в проект за m лет номинального срока эксплуатации оборудования интеллектуальных светофорных объектов складывается из:

— стартовых инвестиций (IC);

— оплаты труда работников, затраченного на первоначальную модернизацию дорожных полос и установку оборудования (W), и ежегодную оплату труда операторов ЦУДД и обслуживающего персонала (W_v);

¹ Об утверждении Методики расчета тарифов на услуги пассажирского автомобильного транспорта: Приказ Министерства транспорта Донецкой Народной Республики от 06.08.2021 № 441. — URL: <http://donmintrans.ru/dokumenty/prikazy>.

– ежегодных дополнительных инвестиций, на размер которых влияют изменения стоимости сменных расходных материалов с учетом инфляции, инновационные усовершенствования самого оборудования с целью улучшения его качественных показателей и прочие стохастические факторы. То есть:

$$I = IC + W + \sum_{v=1}^m \frac{I_v + W_v}{(1+d)^v}, \quad (15)$$

где I_v — годовые инвестиции в течение m лет;
 d — дисконтная ставка.

12. Для экономической оценки инвестиционного проекта воспользуемся методом расчета чистого дисконтированного дохода:

$$\begin{aligned} NPV &= \sum_{k=1}^n \frac{Rp_k}{(1+d)^k} - I = \\ &= \sum_{k=1}^n \frac{Rp_k}{(1+d)^k} - \left(IC + W + \sum_{v=1}^m \frac{I_v + W_v}{(1+d)^v} \right), \quad (16) \end{aligned}$$

где NPV — дисконтированный доход;

n — период расчета;

Rp_k — годовые дополнительные денежные поступления в течение n лет.

Положительное значение дисконтированного дохода ($NPV > 0$) гарантирует положительный экономический эффект предложенной инновации.

13. Период окупаемости всех затрат на маршруте движения — дисконтированный срок окупаемости проекта (DPP), определяется как минимальное значение n , при котором будет выполняться неравенство:

$$\sum_{k=1}^n \frac{Rp_k}{(1+d)^k} \geq IC + W + \sum_{v=1}^m \frac{I_v + W_v}{(1+d)^v}. \quad (17)$$

Заключение

Исследование показало, что использование автоматизированных систем и информационных технологий, осуществляющих координацию движения транспортных средств на городских магистралях, увеличит пропускную способность транспортных магистралей

городов при установке соответствующего оборудования в транспорт муниципального и специального назначения, повысит эффективность и качество работы всей транспортной системы Республики.

Транспортные проблемы, которые возникают на предприятиях пассажирского транспорта, должны решаться, в том числе и путем внедрения новых информационных технологий, таких как система управления дорожными сигналами, система навигации автомобиля, система автоматического распознавания номерных знаков и других систем, которые передают оперативные данные и обеспечивают обратную связь. Решаемые таким образом задачи позволят увеличить прибыль, снизить возможные издержки на предприятиях пассажирского транспорта, что, в свою очередь, будет сказываться на качестве оказываемых услуг по перевозке пассажиров.

Моделирование оптимизации дорожного движения обеспечит решение задач, связанных с развитием механизма управления предприятиями пассажирского автомобильного транспорта с целью достижения их социально-экономической эффективности, что позволит устранить ряд имеющихся недостатков. В результате это приведет к положительным финансово-экономическим показателям и, как следствие, значительному увеличению коэффициента годности материально-технической базы предприятий.

В качестве повышения экономической эффективности предприятий пассажирского транспорта в городах также можно предложить следующее:

- в федеральном законодательстве конкретизировать полномочия органов региональной власти и органов местного самоуправления в части организации пассажирских перевозок;
- разработать, адаптировать и установить федеральные стандарты по определению уровня качества транспортного обслуживания;
- адаптировать тарификацию на транспортные услуги с уровнем цен на топливо и техническое оснащение, а также с учетом социального положения субъектов;

- органам местного самоуправления обеспечить надлежащий контроль за деятельностью государственных и негосударственных автоперевозчиков на городских маршрутах;
- для снижения себестоимости перевозки осуществлять с применением газового топлива, более дешевого по сравнению с бензином и дизтопливом;
- муниципальным унитарным предприятиям организовать оптовые закупки запасных частей для частных автоперевозчиков, оказывающих услуги по перевозке пассажиров;
- органам региональной власти и органам местного самоуправления принять меры по повышению качества транспортных и пассажирских перевозок.

Библиографический список

1. Ансофф И. Новая корпоративная стратегия / И. Ансофф. — СПб.: Питер Ком, 2005. — 206 с.
2. Берко А. К. Состояние организации перевозок пассажиров городским пассажирским транспортом Донецкой Народной Республики / А. К. Берко, Р. П. Лизогуб // Менеджер. — 2019. — № 4(90). — С. 184–190.
3. Будрина Е. В. Механизм управления системой городского пассажирского транспорта / Е. В. Будрина, Н. А. Логина // Транспорт Российской Федерации. — 2012. — № 3-4 (40-41).
4. Горячкина И. Н. Экономическое обоснование эффективности и качества пассажирских перевозок автомобильным транспортом: монография / И. Н. Горячкина, Н. А. Коннычева, А. Б. Мартынушкин и др. // ЗАО «Университетская книга». — Рязань: РГАТУ, 2019 — 129 с.
5. Зырянов В. В. Коэффициент эталонности пространственно-геометрических характеристик маршрута / В. В. Зырянов // Мир транспорта и технологических машин. — Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, 2022. — С. 46–53.
6. Козлов В. С. Разработка новых и адаптация существующих инструментов по формированию процессов управления в организациях сферы услуг: монография / В. С. Козлов. — Донецк: ГОУ ВПО «ДонАУиГС», 2020. — 260 с.
7. Козлов В. С. Синергетический эффект от интеграционного развития субъектов экономической деятельности в транспортной сфере / В. С. Козлов, Б. В. Чегодаев // Менеджер. — 2020. — № 1(91). — Донецк: Изд-во ГОУ ВПО «ДонАУиГС», 2020. — С. 68–76.
8. Козлов В. С. Пути повышения эффективности автотранспортного предприятия // Международная научно-практическая конференции «Транспорт: наука, образование, производство» (Транспорт-2019). Ростовский государственный университет путей сообщения, 23–26 апреля 2019 г. — Ростов-на-Дону, 2019. — С. 140–143.
9. Козлов В. С. Исследование концепции менеджмента как универсального процесса и явления / В. С. Козлов // Менеджер. — 2019. — № 4(90). — Донецк: Изд-во ГОУ ВПО «ДонАУиГС», 2019. — С. 178–184.
10. Комов М. С. Роль транспорта в развитии региональных интеграционных процессов в мировой экономике / М. С. Комов // Региональные проблемы преобразования экономики. — 2018. — № 8. — С. 192–199.
11. Кравченко А. Е. Теория пассажирских транспортных систем на автомобильном транспорте в курортных зонах: монография / А. Е. Кравченко. — Краснодар: Издательство ФГБОУ ВПО «КубГУ», 2011. — 400 с.
12. Трегубов В. Н. Методы и модели логистической синхронизации на пассажирском транспорте: монография / В. Н. Трегубов. — Саратов: Изд-во Саратовск. гос. техн. ун-та, 2009. — 288 с.
13. Pawley A. J. R. Automatic systems for vehicle location, traffic signal priority and passenger information / A. J. R. Pawley // Bus'86: Int. Conf., London, 9–10 Sept. — London, 1986. — Pp. 67–73.
14. Miller H. J. Geographic Information Systems for Transportation / H. J. Miller, Sh.-L. Shaw. — Oxford University Press, 2001.
15. Bengler K. Three Decades of Driver Assistance Systems: Review and Future Perspectives / K. Bengler, K. Dietmayer, B. Färber et al. // IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine. — 2014. — Iss. 6(4). — Pp. 6–22.
16. Дятлов В. В. Эффективность участия государственных структур в развитии механизма управления предприятиями пассажирского транспорта / В. В. Дятлов // Менеджер. — Донецк: ГОУ ВПО «ДОНАУиГС». — 2021. — Вып. 4(98). — С. 3–11.
17. Белов Ю. В. Совершенствование организации дорожного движения городского пассажирского транспорта г. Донецка на основе концепции интеллектуальной транспортной системы (ITS) / Ю. В. Белов, А. В. Науменко, И. А. Яблунская // Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. — 2017. — № 4. — С. 10–14.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 3, pp. 247–257
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-03-247-257

Increasing the Economic Efficiency of Passenger Transport Enterprises by Traffic Modeling

Information about authors

Dyatlov V. V., Senior Lecturer¹. E-mail: dyatlov57@mail.ua

Trunayev A. M., PhD in Engineering, Associate Professor². E-mail: andrey.trunayev@mail.ru

¹Donetsk Academy of Management and Public Administration, Department of Administrative Law, Donetsk

²Rostov State Transport University, Department of Automation and Remote Control on Railways, Rostov-on-Don

Abstract: The article addresses the issues related to the possibility of using advanced technologies for real-time management of automotive traffic flows on routes. Modern directions of research in the field of traffic flow management have been analyzed. The article discusses the issues of economic efficiency of passenger enterprises in the context of modern challenges, as well as highlights the peculiarities of monitoring and dispatching processes for automotive transport using the example of the main routes map of Donetsk city. Modeling of the core functions and development mechanisms of passenger transport enterprise management has been carried out. The importance of automated systems and information technologies in ensuring road traffic safety is emphasized. A model for optimizing urban road traffic has been proposed, aiming to address the challenges of increasing the economic stability and efficiency of automotive enterprises, regulating tariffs for municipal passenger transportation, and enhancing road traffic safety. As a result of the study, significant factors for increasing the economic impact of optimizing road traffic on passenger transport routes in urban conditions have been identified.

Keywords: passenger transport; transport potential; automotive transport; municipal transport; traffic flows; automated systems; enterprise; economic effect; model; management.

References

1. Ansoff I. *Novaya korporativnaya strategiya* [New corporate strategy]. St. Petersburg: Piter Kom Publ., 2005, 206 p. (In Russian)
2. Berko A. K., Lizogub R. P. Sostoyaniye organizatsii perevozok passazhirovo gorodskim passazhirskim transportom Donetskoy Narodnoy Respubliki [The state of the organization of transportation of passengers by urban passenger transport of the Donetsk People's Republic]. *Menedzher* [Manager]. 2019, Iss. 4(90), pp. 184–190. (In Russian)
3. Budrina E. V., Loginova N. A. Mekhanizm upravleniya sistemoy gorodskogo passazhirskogo transporta [The mechanism for managing the system of urban passenger transport]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2012, Iss. 3-4 (40-41). (In Russian)
4. Goryachkina I. N., Konycheva N. A., Martynushkin A. B. et al. *Ekonomicheskoe obosnovaniye effektivnosti i kachestva passazhirskikh perevozok avtomobil'nykh transportom: monografiya* [Economic substantiation of the efficiency and quality of passenger transportation by road: monograph]. ZAO "Universitetskaya kniga". Ryazan': RGATU Publ., 2019, 129 p. (In Russian)
5. Zyryanov V. V. Koeffitsient etalonnosti prostranstvenno-geometricheskikh kharakteristik marshruta [The coefficient of standardization of the spatial-geometric characteristics of the route]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin* [World of Transport and Technological Machines]. Orlovskiy gosudarstvennyy universitet im. I. S. Turgenyeva, 2022, pp. 46–53. (In Russian)
6. Kozlov V. S. *Razrabotka novykh i adaptatsiya sushchestvuyushchikh instrumentov po formirovaniyu protsessov upravleniya v organizatsiyakh sfery uslug: monografiya* [Development of new and adaptation of existing tools for the formation of management processes in service organizations: monograph]. Donetsk: GOU VPO "DonAUIGS" Publ., 2020, 260 p. (In Russian)
7. Kozlov V. S., Chegodaev B. V. Sinergeticheskiy effekt ot integratsionnogo razvitiya sub"ektov ekonomicheskoy deyatel'nosti v transportnoy sfere [Synergetic effect from the integration development of economic entities in the transport sector]. *Menedzher* [Manager]. 2020, Iss. 1(91). Donetsk: GOU VPO "DonAUIGS" Publ., 2020, pp.68–76. (In Russian)
8. Kozlov V. S. *Puti povysheniya effektivnosti avtotransportnogo predpriyatiya. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo" (Transport-2019). Rostovskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya, 23–26 aprelya 2019 g.* [Ways to improve the efficiency of a motor transport enterprise. International scientific and practical conference "Transport: science, education, production" (Transport-2019)]. Rostov-on-Don, 2019, pp. 140–143. (In Russian)
9. Kozlov V. S. Issledovanie kontseptsii menedzhmenta kak universal'nogo protsessa i yavleniya [Research of the concept of management as a universal process and phenomenon]. *Menedzher* [Manager]. 2019, Iss. 4(90). Donetsk: Izd-vo GOU VPO "DonAUIGS", 2019, pp. 178–184. (In Russian)
10. Komov M. S. Rol' transporta v razvitii regional'nykh integratsionnykh protsessov v mirovoy ekonomike [The role of transport in the development of regional integration processes in the world economy]. *Regional'nye problemy preobrazovaniya ekonomiki* [Regional problems of transformation of the economy]. 2018, Iss. 8, pp. 192–199. (In Russian)
11. Kravchenko A. E. *Teoriya passazhirskikh transportnykh sistem na avtomobil'nom transporte v kurortnykh zonakh: monografiya* [The theory of passenger transport systems in road transport in resort areas: monograph]. Krasnodar: Izdatel'stvo FGBOU VPO "KubGTU" Publ., 2011, 400 p. (In Russian)
12. Tregubov V. N. *Metody i modeli logisticheskoy sinkhronizatsii na passazhirskom transporte: monografiya* [Methods and models of logistic synchronization in passenger transport: monograph]. Saratov: Saratovsk. gos. tekhn. un-t Publ., 2009, 288 p. (In Russian)
13. Pawley A. J. R. Automatic systems for vehicle location, traffic signal priority and passenger information. *Bus'86: Int. Conf., London, 9–10 Sept. London, 1986*, pp. 67–73.
14. Miller H. J., Shaw Sh.-L. *Geographic Information Systems for Transportation*. Oxford University Press, 2001.
15. Bengler K., Dietmayer K., Färber B. et al. Three Decades of Driver Assistance Systems: Review and Future Perspectives. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2014, Iss. 6(4), pp. 6–22.
16. Dyatlov V. V. *Effektivnost' uchastiya gosudarstvennykh struktur v razvitii mekhanizma upravleniya predpriyatiyami passazhirskogo transporta* [Efficiency of participation of state structures in the development of the mechanism for managing passenger transport enterprises]. *Menedzher* [Manager]. Donetsk: GOU VPO "DONAUIGS" Publ., 2021, Iss. 4(98), pp. 3–11. (In Russian)
17. Belov Yu. V., Naumenko A. V., Yablunovskaya I. A. Sovershenstvovanie organizatsii dorozhnogo dvizheniya gorodskogo passazhirskogo transporta g. Donetska na osnove kontseptsii intellektual'noy transportnoy sistemy (ITS) [Improving the organization of traffic of urban passenger transport in Donetsk based on the concept of an intelligent transport system (ITS)]. *Vestnik Donetskoy akademii avtomobil'nogo transporta* [Bulletin of the Donetsk Academy of Automobile Transport]. 2017, Iss. 4, pp. 10–14. (In Russian)

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБУЧЕНИЯ ЭТАЛОННЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ АУГМЕНТАЦИЕЙ ОБУЧАЮЩИХ ДАННЫХ

ГРАЧЕВ Владимир Васильевич, д-р техн. наук, доцент, профессор¹; e-mail: v_grach@mail.ru
ФЕДОТОВ Михаил Владимирович, канд. техн. наук, заведующий²; e-mail: fedotov-mv@vnikti.com

¹Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I, кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство», Санкт-Петербург

²АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава», лаборатория диагностики, Коломна

Одной из серьезных проблем, ограничивающих возможность применения интеллектуальных методов обработки диагностической информации в задачах диагностики сложных технических объектов, является сложность формирования обучающей выборки. Эффективным способом решения проблемы является аугментация (искусственное расширение) обучающих данных. Особенностью обучающих выборок в задачах технической диагностики является неизвестный вид их распределения в пространстве признаков, при том что для обеспечения качественного обучения диагностической модели дополнительные «синтетические» данные должны быть распределены аналогично реальной обучающей выборке. Возможность определения параметров распределения данных обучающей выборки в процессе обучения с последующим воспроизведением этих параметров в сгенерированных выборках может быть реализована в генеративных моделях на основе вариационных автоэнкодеров и генеративно-состязательных сетей. В задачах интеллектуальной классификации состояния объекта диагностирования с размеченными обучающими выборками для генерации дополнительных данных предпочтительным является использование условных (conditional) генеративно-состязательных сетей. Актуальной задачей является оценка однородности обучающей и сгенерированной выборок, по результатам которой определяется длительность (количество эпох) процесса обучения генеративной модели. В работе предложен и обоснован оригинальный способ оценки однородности многомерных выборок на основе G- и F-функций Рипли (Ripley). На его основе определен количественный показатель для контроля качества и продолжительности обучения генеративной модели. Эффективность предложенного способа подтверждается на примере решения задачи аугментации обучающих данных для эталонной диагностической модели газовоздушного тракта тепловозного дизеля.

Ключевые слова: модель машинного обучения; обучающая выборка; интеллектуальный классификатор; объект диагностирования; генеративно-состязательные сети; аугментация данных; контроль однородности многомерных выборок; пространственный анализ; функция Ripley.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-03-258-273

▼ Введение

В настоящее время методы машинного обучения (МО) с успехом применяются для решения широкого круга задач в самых различных областях деятельности, таких как медицина, экономика, лингвистика, интернет, мультимедиа, автоматизация управления техническими системами и т. д.

Одним из перспективных направлений применения таких методов является диагностика сложных технических объектов. Интенсивное развитие систем непрерывного мониторинга оборудования в различных областях техники привело к появлению значительных объемов измерительной информации,

характеризующей текущее техническое состояние как оборудования в целом, так и основных его узлов. При этом использовать для обработки этой информации известные методы тестовой диагностики, основанные на применении аналитических эталонных диагностических моделей соответствующих видов оборудования, как правило, не удается.

Основные сложности связаны, во-первых, с ограничениями размерности и информативности вектора контролируемых параметров в системах бортовой диагностики крупносерийных технических объектов, к которым относятся железнодорожный тяговый подвижной состав, и, во-вторых, отсутствием возможности

реализации специальных тестовых режимов работы объекта диагностирования (ОД) в процессе его эксплуатации.

Применение моделей машинного обучения в качестве эталонных диагностических моделей позволяет преодолеть эти сложности за счет большого количества изменяемых структурных параметров модели, значения которых определяются в результате ее обучения на реальных данных, полученных в результате мониторинга ОД в различных режимах его эксплуатации и различных технических состояниях.

Однако высокие абсолютные показатели надежности сложных ОД, к которым относится практически любая железнодорожная техника¹, как правило, не позволяют сформировать обучающую выборку достаточного объема для всех классов их состояния. Задача дополнительно осложняется наличием технологического разброса характеристик оборудования, который во многих случаях исключает возможность использования модели, обученной на данных оборудования одного ОД, для диагностирования оборудования другого однотипного ОД.

Одним из способов решения проблемы недостаточного объема обучающих данных в задачах МО является модификация обучающей выборки с использованием технологии аугментации данных (*data augmentation*) [1].

Под аугментацией данных понимают совокупность методов увеличения объема и качества обучающей выборки с целью повышения обобщающей способности модели МО [2].

Цели работы состоят в следующем:

- анализ известных подходов к формированию обучающих выборок моделей МО с использованием методов аугментации данных;
- выбор метода аугментации данных для решения задач технической диагностики сложного оборудования;
- апробация выбранного метода на примере задачи диагностирования газовойоздушного тракта дизеля с использованием интеллектуального классификатора.

¹ ГОСТ 31187—2011. Тепловозы магистральные Общие технические требования. — М.: Стандартинформ, 2012. — 18 с.

1. Постановка задачи

Процесс функционирования ОД представляет собой отображение вида:

$$H: X(t) \xrightarrow{R(t)} Y(t),$$

где $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ — вектор входных параметров ОД, независимых от его технического состояния;

$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_l\}$ — вектор зависимых выходных параметров, характеризующих качество функционирования ОД в соответствии с его назначением;

$R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ — вектор структурных параметров ОД, характеризующих его техническое состояние;

m, l, n — размерность векторов.

Измерительная информация, регистрируемая системой бортовой диагностики ОД в определенном его техническом состоянии, может быть представлена векторами $Z_x(t) = \{z_{x1}, z_{x2}, \dots, z_{xr}\}$ и $Z_y(t) = \{z_{y1}, z_{y2}, \dots, z_{yp}\}$ измеренных значений входных и выходных параметров с размерностью соответственно r и p , при этом, как правило, $r \ll m$ и $p \ll l$.

В процессе эксплуатации ОД средства бортовой диагностики с определенной периодичностью Δt во всех режимах регистрируют значения компонент векторов $Z_x(t_i)$ и $Z_y(t_i)$, где $i = 1, 2, \dots, k$ — номер отсчета.

В результате по истечении времени T образуется совокупность

$$\{(Z_x(t_1), Z_y(t_1)), (Z_x(t_2), Z_y(t_2)), \dots, (Z_x(t_k), Z_y(t_k))\}$$

из k пар векторов измеренных значений входных и выходных параметров. После нормализации значений компонент векторов и приведения их к интервалу $[0, 1]$ эта совокупность может рассматриваться как $(r + p)$ -мерное распределение точек в области пространства нормированных контролируемых параметров ОД (рис. 1). Закон распределения $P(z_{x1}, z_{x2}, \dots, z_{xr}, z_{y1}, z_{y2}, \dots, z_{yp})$ определяется как физическими принципами функционирования ОД, так и его текущим техническим состоянием.

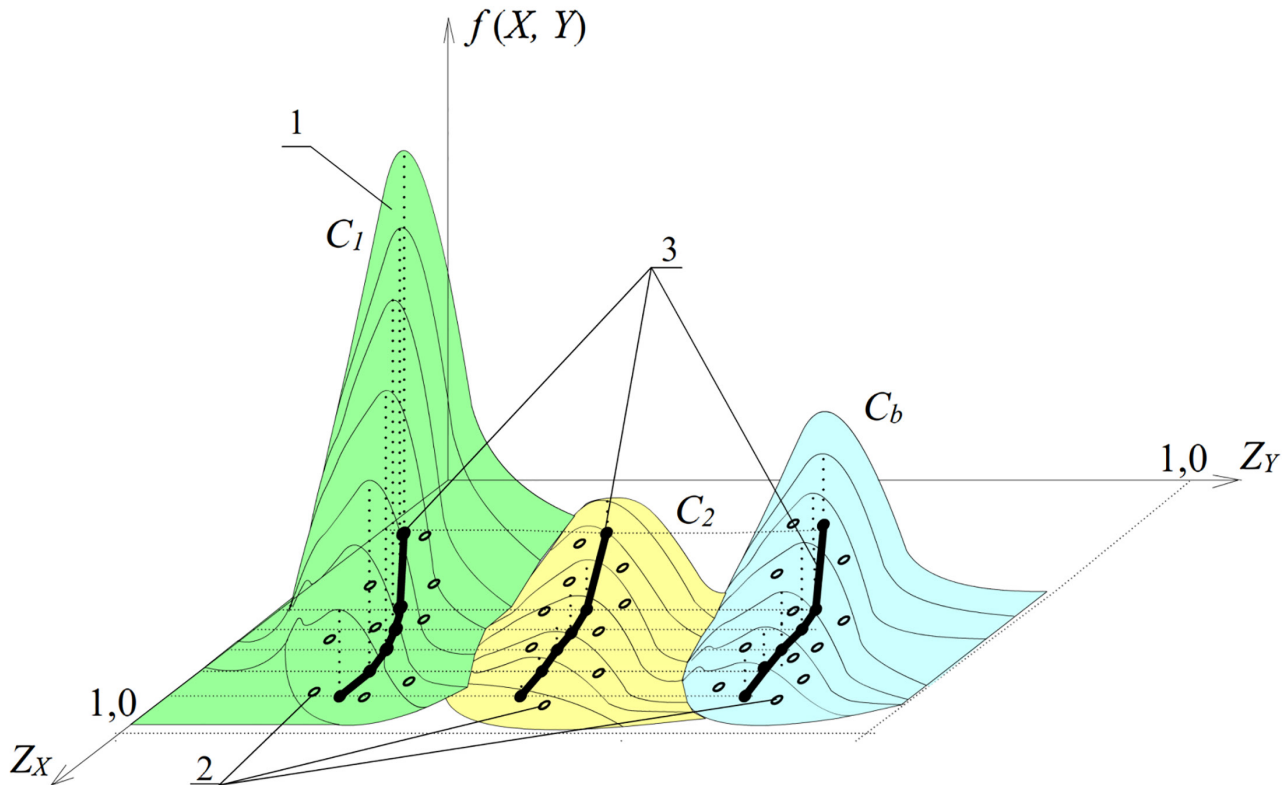


Рис. 1. Распределение векторов состояния ОД в пространстве контролируемых параметров для различных классов c_1, c_2, \dots, c_b технического состояния:
 1 — плотность вероятности текущего состояния ОД; 2 — измеренные векторы состояния;
 3 — векторы состояния, рассчитанные аналитической моделью ОД

Ассоциируя техническое состояние ОД с отказами отдельных его узлов и деталей, можно описать его алфавитом классов $C = \{c_0, c_1, \dots, c_b\}$, где c_0, c_1, \dots, c_b — категориальные переменные, соответствующие различным видам отказов ОД или их сочетаниям (класс c_0 соответствует его работоспособному состоянию). Алфавит C и перечень контролируемых параметров ОД (векторы Z_x, Z_y) должны формироваться таким образом, чтобы каждому классу c_j алфавита C соответствовало уникальное распределение $P_{c_j}(z_{x1}, z_{x2}, \dots, z_{xr}, z_{y1}, z_{y2}, \dots, z_{yp})$ точек отсчетов в пространстве нормированных контролируемых параметров ОД. В противном случае, т.е. при наличии отказов с идентичными распределениями отсчетов, они будут неразличимы на данном наборе контролируемых параметров.

Процесс диагностирования в общем случае представляет собой отображение вида:

$$Diagn: \{Z_x, Z_y\} \xrightarrow{\theta} C, \quad (1)$$

называемое *классификатором* технического состояния ОД.

При использовании интеллектуальных классификаторов на базе алгоритмов машинного обучения определение компонент вектора θ настраиваемых параметров модели классификатора осуществляется в ходе ее обучения. В процессе обучения на вход модели последовательно подаются векторы $(Z_x(t_i), Z_y(t_i))$, $i = 1, 2, \dots, k$ параметров ОД, соответствующие различным классам его состояния из алфавита C , определяются отклики классификатора C^* , в зависимости от величины разности $C - C^*$ корректируются значения компонент вектора θ .

Для обеспечения достаточной точности классификации обученной моделью объем обучающей выборки должен составлять, по разным оценкам, от нескольких десятков до нескольких сотен векторов (точек поверхности $f(Z_x, Z_y)$ на каждый класс состояния ОД из алфавита C (рис. 1).

Однако сложные технические объекты, к которым относятся практически все наземные

транспортные объекты и в том числе подвижной состав железных дорог, характеризуются высокими абсолютными показателями надежности. Так, согласно ГОСТ 31187—2011, параметр потока отказов для магистральных грузовых тепловозов не должен превышать $11 \cdot 10^{-6}$ км, т. е. допускается не более 11 отказов локомотива за 4–5 лет нормальной эксплуатации. Соответственно, для отдельных видов оборудования тепловоза этот показатель не превышает $0,01–0,05 \cdot 10^{-6}$ км. Учитывая традиционно низкую контролепригодность как локомотива в целом, так и отдельных видов его оборудования, такие показатели надежности практически исключают возможность формирования выборки достаточного объема по результатам эксплуатации. Стационарные средства тестового диагностирования некоторых видов оборудования локомотива (подшипниковые узлы колесно-моторных блоков, изоляция тяговых электродвигателей, рабочий процесс в цилиндрах дизеля) позволяют получить ограниченное количество входных векторов для отдельных классов состояния оборудования (точки 2 на рис. 1). Однако их, как правило, недостаточно для качественного обучения диагностической модели вида (1).

Одним из способов решения проблемы входных данных является использование для расчета обучающих выборок аналитических моделей ОД [1, 2]. Результатом такого расчета является $(r + p)$ -мерная кривая (3 на рис. 1), характеризующая функционирование ОД.

Совокупность точек кривых 3 всех классов алфавита S может использоваться для обучения модели (1). При этом необходимый объем обучающей выборки обеспечивается либо расчетом нужного количества точек, либо, в случае высокой трудоемкости расчета, их интерполяцией.

Очевидно, данный подход к формированию обучающей выборки возможен только в тех случаях, когда существует аналитическая модель процесса функционирования ОД, точность которой достаточна для получения достоверных количественных оценок значений Z_y его контролируемых выходных параметров.

Кроме того, в этом случае обученная модель машинного обучения будет представлять собой одну из реализаций аналитической модели со

всеми присущими ей недостатками, основными из которых являются:

- ограниченный перечень входных параметров ОД, учитываемых моделью (как правило, совпадающий с $Z_{x_{1..r}}, r \ll m$), и отсутствие, в связи с этой ограниченностью, случайной составляющей в результатах расчета выходных параметров $Z_{y_{1..p}}$, присутствующей в реальном ОД и обусловленной действием неучтенных факторов;
- ограниченная область режимов функционирования ОД (как правило, близкая к номинальному режиму), для которых подтверждается адекватность модели.

Следствием этих недостатков будет недостаточная обобщающая способность обученных таким образом моделей, т. е. их способность правильно функционировать за пределами обучающей выборки [3].

Таким образом, актуальной задачей является повышение качества обучения эталонных диагностических моделей сложных технических объектов при ограниченных объемах обучающей выборки.

Одним из эффективных способов решения проблемы ограниченных объемов обучающих данных в задачах МО является их аугментация, т. е. изменение объема и качества выборки с использованием специальных методов [4].

2. Методы аугментации обучающих данных в задачах машинного обучения

Все методы, применяемые в задачах МО для повышения качества обучающих данных, могут быть разделены на две группы (рис. 2) [4]:

- методы, модифицирующие исходную выборку без ее расширения;
- методы, генерирующие дополнительные («синтетические») векторы данных, которые включаются в исходную выборку, увеличивая ее объем.

Первая группа методов применяется преимущественно в задачах цифрового анализа изображений с использованием сверточных (*convolutional*) нейронных сетей (*CNN*). Поскольку именно такие задачи составляют основную часть задач МО, методы этой группы получили наибольшее распространение.



Рис. 2. Классификация методов аугментации данных в задачах МО

Простейшим способом модификации изображения является его геометрическая трансформация, подразумевающая поворот (*flip*) изображения относительно горизонтальной, вертикальной оси и оси, перпендикулярной плоскости изображения, а также их комбинация [5], с сохранением метки класса. Такой способ модификации данных достаточно эффективен в задачах поиска и выделения изображений определенного вида (например, машинное чтение текста).

Остальные методы используются при решении более сложных задач, как, например, проверка соответствия предъявленного изображения его единственному образцу, который и используется для формирования обучающей выборки.

Изменение контрастности изображений осуществляется изменением параметров фильтра одного или нескольких сверточных слоев сети [6]. Удаление фрагментов исходного изображения осуществляется маскированием матриц пикселей изображения (входного вектора сети *CNN*) случайно размещаемой маской определенного (как вариант, случайного) размера с элементами, равными 0 (черный цвет), 255 (белый цвет) или случайным значениям [7]. Изменение цвета предполагает случайную коррекцию всех элементов RGB матриц изображения,

имитирующую ее искажение в процессе копирования [8].

Общей особенностью всех описанных методов аугментации данных, применяемых в задачах цифрового анализа изображений, является как случайный характер разброса параметров образцов исходной выборки (отличий в изображениях, используемых для обучения моделей), так и случайный по отношению к параметрам образцов характер их модификации в процессе аугментации. В реальных задачах, связанных с анализом изображений, разброс параметров исходных данных (изображений) также случаен, поэтому описанные подходы к формированию обучающих выборок позволяют повысить точность и обобщающую способность применяемых моделей.

Однако, несмотря на случайный характер изменения значений диагностических параметров (Z_x, Z_y) сложного технического объекта (ОД) в процессе его эксплуатации (кривые *I* на рис. 1), вид и показатели их многомерного распределения $P(Z_x, Z_y)$ (математическое ожидание и дисперсия) отнюдь не случайны. Они определяются конструкцией ОД и физическими принципами его функционирования, режимами эксплуатации или тестирования, классом технического состояния $C = \{c_0, c_1, c_2, \dots, c_b\}$ и часто используются в

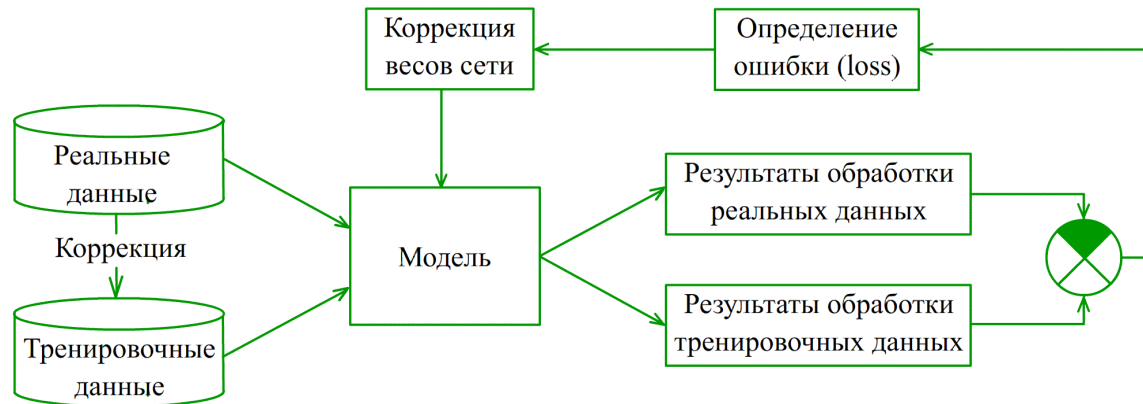


Рис. 3. Схема состязательного (*adversarial*) обучения модели

качестве диагностических признаков текущего состояния ОД.

Очевидно, цель аугментации данных в задачах технической диагностики (повышение качества обучения эталонных диагностических моделей) может быть достигнута только в том случае, если показатели распределения сгенерированных «синтетических» данных $P_g(Z_x, Z_y)$ будут равны показателям распределения исходной измеренной выборки $P(Z_x, Z_y)$, которые неизвестны и не могут быть определены аналитически вследствие недостаточного объема выборки при ее, как правило, относительно большой размерности.

Не менее очевидным представляется тот факт, что такое равенство не может быть достигнуто случайными изменениями значений параметров (Z_x, Z_y) исходной выборки, в связи с чем описанные выше методы неприменимы в большинстве задач технической диагностики.

Вторая группа методов аугментации увеличивает объем обучающей выборки за счет генерирования новых векторов исходных данных. Генерация может осуществляться случайными изменениями векторов исходной выборки с последующим включением новых векторов в ее состав.

Этот прием применяется при состязательном обучении (*adversarial training*) сетей [9] (рис. 3), которое используется в целях повышения устойчивости нейросетевых моделей к так называемым состязательным атакам (*adversarial attack*) [10, 11].

Суть таких атак сводится к умышленной подаче на вход модели векторов данных из

периферийных областей пространства признаков, находящихся за пределами распределения обучающей выборки. Формируются эти векторы изменениями (как правило, незначительными) значений отдельных признаков в реальных корректных данных. Результатом таких изменений являются большие ошибки отклика моделей, которые в ряде случаев могут приводить к значительным финансовым и иным потерям.

Для повышения устойчивости модели к состязательным атакам обучающая выборка дополняется векторами данных, полученными изменением отдельных признаков или их групп. В процессе обучения модели на ее вход подаются как реальные данные, так и тренировочные данные (*Adversarial Data*), полученные коррекцией реальных данных. Веса нейронов модели изменяются в направлении уменьшения вероятности ошибки классификации данных (отнесения измененного входного вектора к реальной выборке).

Несмотря на то, что подход к формированию обучающей выборки при состязательном обучении отличается от описанных выше методов, в нем по-прежнему сохраняется случайный (по отношению к реальной выборке) характер изменения входных данных.

Совершенно иначе решается задача увеличения объема обучающей выборки генеративными моделями на основе автоэнкодеров (*AE*) и генеративно-состязательных нейронных сетей (*GAN*).

Автоэнкодер представляет собой нейронную сеть прямого распространения (рис. 4) [12],

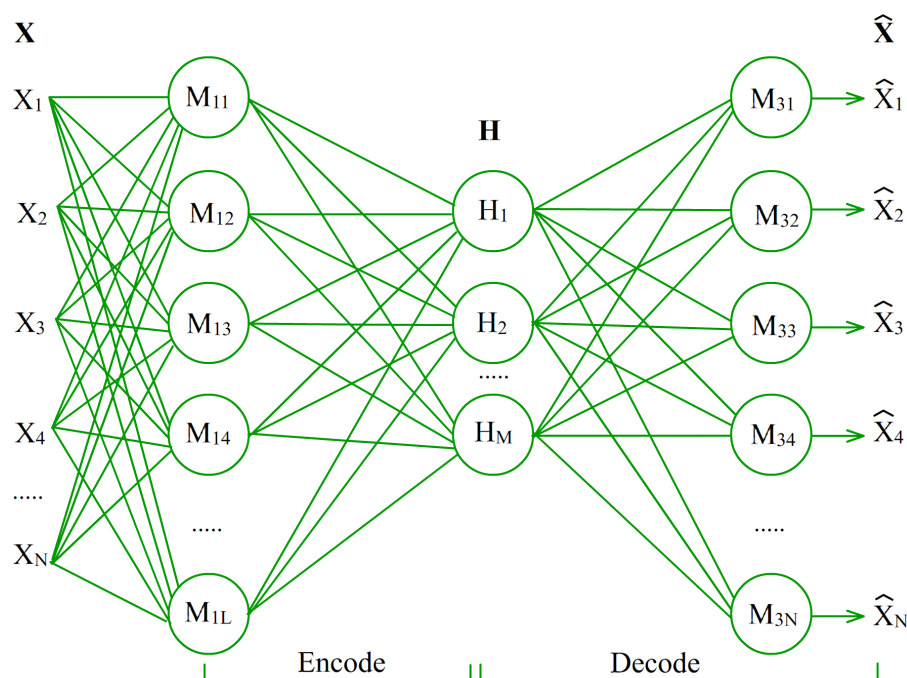


Рис. 4. Схема автоэнкодера (АЕ)

которая восстанавливает входной сигнал на выходе. У нее имеется по меньшей мере один скрытый слой, выходы которого определяют точку скрытого (*Latent*) пространства H , формируемого в процессе обучения сети.

Таким образом, входной вектор X размерности N , предъявляемый обученной сети, отображается (*Encode*) в скрытое пространство H размерности M , ($M < N$), из которого затем восстанавливается (*Decode*) выходной вектор \hat{X} с некоторой ошибкой, обусловленной пониженной размерностью пространства H .

Для генерации новых данных на вход обученного декодера подается случайный вектор размерности M , который преобразуется в вектор \hat{X} размерности N . Поскольку параметры распределения отображения обучающей выборки в скрытом пространстве H неизвестны, распределение сгенерированных данных может не совпадать с распределением данных в обучающей выборке, поэтому АЕ в задачах аугментации данных практически не применяются.

Этот недостаток устраняется в вариационных автоэнкодерах (VAE) [12] (рис. 5), которые являются развитием простых АЕ. Вариационные автоэнкодеры формируют скрытое пространство в виде нормального распределения

вероятности, показатели которого (математическое ожидание и дисперсия) определяются в результате обучения сети энкодера. Другая сеть (декодер) преобразует случайные векторы (сэмплы) из этого распределения в выходные векторы \hat{X} . Энкодер и декодер обучаются в едином цикле, после окончания обучения декодер представляет собой полноценную генеративную модель, показатели распределения выходных данных которой близки к аналогичным показателям исходной выборки.

Генеративно-сопоставительные сети (GAN) были предложены в 2014 году [13] и в настоящее время активно исследуются на предмет применения их в приложениях различного назначения.

GAN состоит из двух нейронных сетей (рис. 6).

Первая из них (генератор) формирует случайные векторы Z из заданного распределения $P(Z)$ (как правило, нормального, вида $N(0,1)$) и генерирует из них объекты $X_p = G(Z)$, которые идут на вход второй сети (дискриминатор или критик). Вместе с ними на вход дискриминатора подаются объекты X_s из имеющейся выборки. Выходом дискриминатора является вероятность $D(X)$ принадлежности входного объекта реальной выборке.

Генератор и дискриминатор обучаются отдельно, но в рамках одной сети (рис. 6).

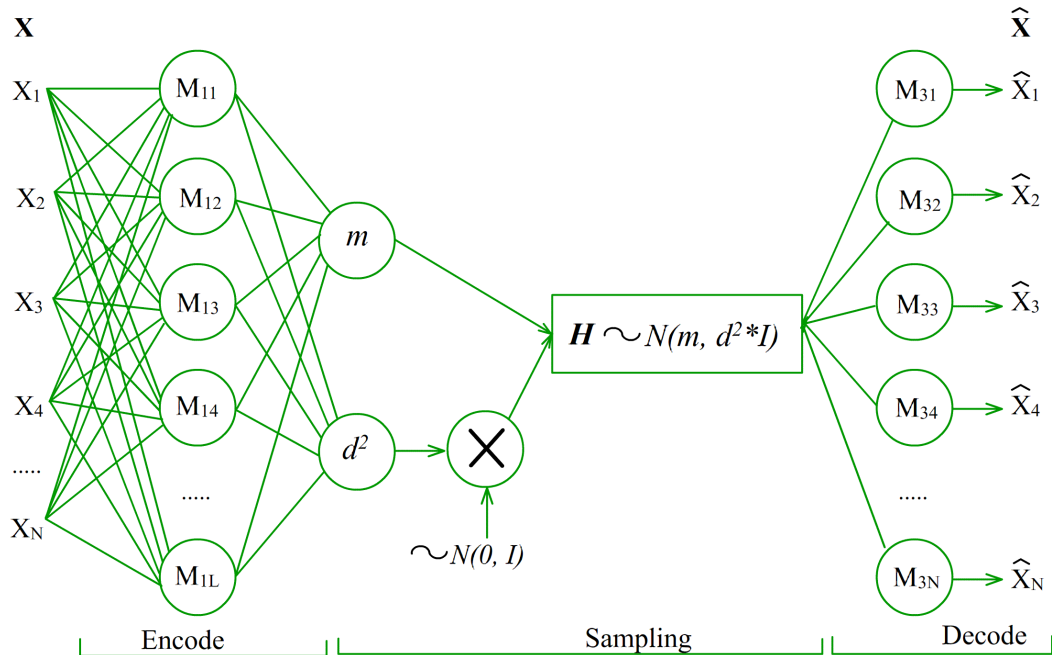


Рис. 5. Схема вариационного автоэнкодера (VAE)

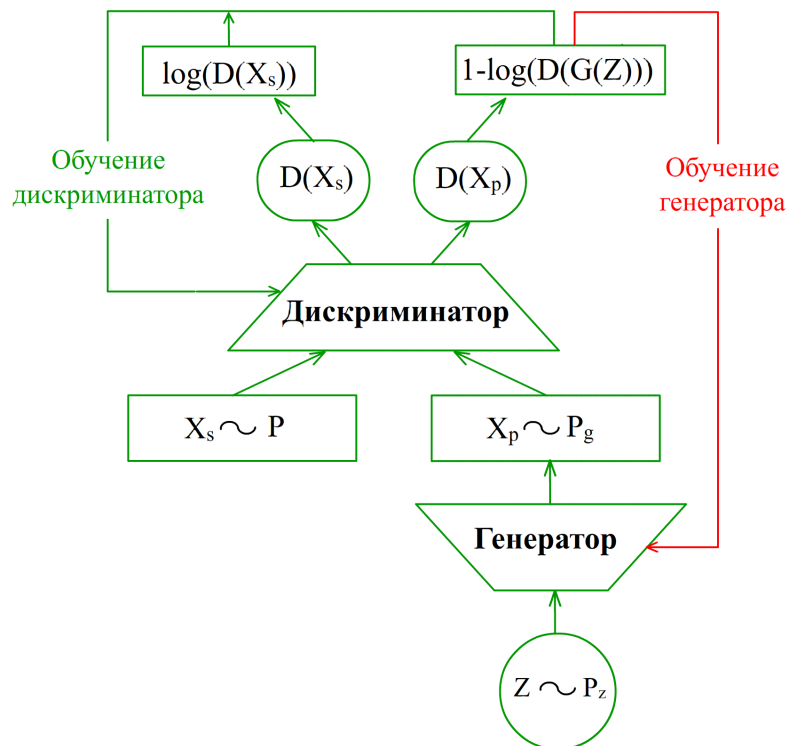


Рис. 6. Схема генеративно-сопоставительной сети (GAN)

Вначале делаются k шагов обучения дискриминатора, на каждом из которых веса его нейронов θ_d корректируются в сторону уменьшения кросс-энтропии:

$$\theta_d = \theta_d - \nabla_{\theta_d} \cdot (\log_2(D(X_s)) + \log_2(1 - D(G(z)))) \tag{2}$$

где $D(X_s)$ — вероятность правильной классификации предъявленного реального объекта X_s ;
 $D(G(z))$ — вероятность ошибочной классификации сгенерированного объекта (т. е. вероятность того, что он будет принят дискриминатором за реальный объект).

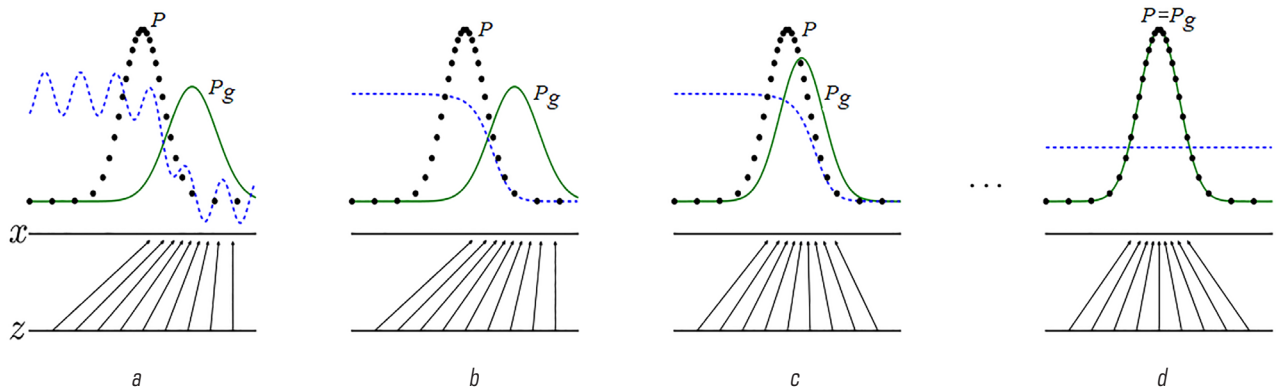


Рис. 7. Процесс обучения генеративно-сопоставительной сети

..... — вероятность отнесения дискриминатором входного объекта к множеству реальных объектов;
..... — распределение реальных данных; —— — распределение сгенерированных данных;
a, b, c, d — стадии обучения

Затем выполняется шаг обучения генератора, при этом его веса θ_g корректируются в сторону увеличения $\log_2(D(G(z)))$, что эквивалентно уменьшению $\log_2(1 - D(G(z)))$:

$$\theta_g = \theta_g + \nabla_{\theta_g} \cdot \log_2(1 - D(G(z))). \quad (3)$$

По мере обучения дискриминатора и генератора вероятность отнесения дискриминатором искусственных (*artificial*) векторов данных, сгенерированных генератором, к реальным объектам, увеличивается от нуля до предельного значения 0,5, соответствующего равенству распределений $P(x)$ реальных и $P_g(x)$ сгенерированных данных (рис. 7) [13]. При этом, как следует из рисунка, распределение сгенерированных данных стремится к распределению исходной выборки, что особенно важно для задач, в которых показатели распределения характеризуют особенности исследуемых явлений или процессов.

После завершения обучения генератор может использоваться для генерации искусственных данных с распределением, соответствующим исходной выборке, из векторов с нормально распределенными значениями компонентов, подаваемых на его вход.

Как отмечено выше, автоматическое совмещение распределения исходной и сгенерированной выборки характерно и для вариационных автоэнкодеров, однако, как показывают результаты решения одних и тех же задач с применением *VAE* и *GAN*, последние обеспечивают существенно более высокое качество обучения

моделей с использованием сгенерированных данных, особенно в задачах с небольшой размерностью пространства входных признаков, к которым в большинстве своем и относятся задачи технической диагностики.

Парадигма генеративно-сопоставительных сетей продолжает активно развиваться, дополняясь все новыми вариантами конфигурации сетей. Большой интерес для задач классификации состояний ОД представляют условные (*conditional*) *GAN* (*CGAN*) [14].

В этих сетях размерность пространства входных признаков m увеличивается до $(m + n)$, где n — количество классов (меток) данных в исходной выборке. В дополнительном пространстве для каждого из объектов входной выборки размещается категоризованная переменная, соответствующая метке его класса.

Сеть (дискриминатор и генератор) обучается на расширенном пространстве признаков размерности $(m + n)$, при этом каждый входной вектор размерности m , подаваемый на вход как дискриминатора (реальный), так и генератора (случайный), дополняется посредством операции конкатенации категоризованной переменной размерности n , соответствующей метке класса реального объекта.

После завершения обучения на вход генератора подаются расширенные векторы, образованные конкатенацией случайного вектора размерности m и категоризованной переменной метки класса, для которого требуется сгенерировать очередной искусственный вектор данных.

Как следует из рис. 7, качество функционирования сети *GAN* оценивается отличием распределений реальной обучающей выборки $P(x)$ и выборки сгенерированных данных $P_g(x)$. Результат этой оценки зависит от выбранной меры подобия распределений. В базовой версии *GAN* в качестве такой меры используется дивергенция Дженсена — Шеннона [15].

Эффективность и устойчивость процесса обучения сети *GAN* (*CGAN*) существенно повышается при использовании для этой цели метрики Вассерштейна (*Wassershtein*) [16] (*CWGAN*) в сочетании с параметрическим (посредством штрафной функции — *Gradient Penalty*) ограничением величины градиента критика (*CWGAN-GP*).

Таким образом, использование различных конфигураций генеративно-сопоставительных сетей является перспективным направлением повышения эффективности обработки диагностической информации в интеллектуальных системах технической диагностики.

3. Использование сети типа *CWGAN-GP* для аугментации обучающей выборки в задаче диагностирования газозоудного тракта тепловозного дизеля

При решении задачи диагностирования газозоудного тракта дизеля (ГВТ) [17] сформирован алфавит классов состояний, включающий восемь классов (включая исправное), для которых с помощью аналитических моделей рабочего процесса дизеля рассчитана обучающая выборка входных признаков общим объемом 102 четырехмерных вектора, фрагмент которой после нормализации представлен в таблице. Таким образом, на каждый класс состояния приходится в среднем не более 13 векторов обучающей выборки, при том что, как отмечено выше, для качественного обучения модели машинного обучения на каждый класс состояния требуется от нескольких десятков до нескольких сотен векторов входных признаков.

Расширение выборки аналитическим расчетом дополнительных точек не имеет смысла, поскольку такие точки не несут дополнительной информации о внутренних параметрах объекта ввиду отсутствия случайной

Фрагмент нормализованной обучающей выборки для модели ГВТ дизеля

\overline{G}_B	$\overline{\pi}_K$	\overline{T}_T	\overline{n}_{TK}	Class	Количество векторов
0,8951	0,8571	0,3429	0,9769	0	5
0,8114	0,7600	0,2709	0,9260	0	
0,7250	0,6857	0,1965	0,8302	0	
0,6059	0,6071	0,1009	0,6730	0	
0,5056	0,5457	0,0179	0,5356	0	
0,3318	0,3000	0,1062	0,0599	1	10
0,2937	0,3000	0,1500	0,0573	1	
0,6212	0,6786	0,4218	0,8078	1	
0,4178	0,3500	0,4206	0,1470	1	
0,1585	0,2429	0,3044	0,0051	2	
0,0538	0,2143	0,5124	0,0000	2	12
0,3896	0,6014	0,6915	0,6299	2	
0,3356	0,3243	0,5147	0,0952	2	
0,7499	0,7729	0,3353	0,9331	3	
0,6922	0,6886	0,2353	0,8315	3	
0,5739	0,6186	0,1265	0,6906	3	10
0,5500	0,6357	0,1500	0,7218	3	
0,6872	0,8129	0,3941	0,9562	4	
0,6357	0,7114	0,2853	0,8606	4	
0,5098	0,6371	0,1794	0,7198	4	
0,4665	0,6443	0,2176	0,7283	4	35
0,7703	0,7214	0,2412	0,8838	5	
0,6310	0,6243	0,1206	0,7100	5	
0,5244	0,5643	0,0059	0,5743	5	
0,5253	0,5657	0,0088	0,5772	5	

Примечания: \overline{G}_B — расход воздуха, $\overline{\pi}_K$ — степень повышения давления в компрессоре, \overline{T}_T — температура газа перед турбиной, \overline{n}_{TK} — частота вращения ротора турбокомпрессора.

составляющей их координат в пространстве признаков, обусловленной влиянием неучтенных в модели внешних и внутренних влияющих факторов.

Учитывая наличие в обучающей выборке групп векторов, соответствующих различным классам состояния ГВТ, для генерации новых данных целесообразно использовать условную генеративную сеть.

Для решения задачи была построена сеть типа *CWGAN-GP* со следующей структурой [18]:

- генератор (4 + 8) – 380 – 520 – 400 – 370 – 340 – 240 – 4 с функцией активации нейронов скрытых слоев ‘*selu*’, выходного слоя – ‘*sigmoid*’;
- критик (4 + 8) – 333 – 366 – 455 – 333 – 233 – 133 – 1 с функцией активации нейронов скрытых слоев ‘*selu*’, выходного слоя – ‘*sigmoid*’.

Одной из серьезных проблем, решаемых в задачах генерации данных, является проблема оценки результатов работы модели и непосредственно связанная с ней проблема определения продолжительности обучения.

В дискриминативных моделях эти проблемы сводятся к оценке точности отнесения вектора входных данных к определенной области пространства признаков, заданной перечислением входящих в нее векторов обучающей выборки (задачи классификации) или аналитическим описанием (задачи восстановления регрессии), с помощью известных наборов метрик.

Результатом работы генеративных моделей являются не отдельные «синтетические» векторы данных, а их распределение, которое должно соответствовать распределению векторов обучающей выборки (рис. 7). Соответственно, оценка качества обучения генеративной модели должна сводиться к количественной оценке различия распределений обучающей и сгенерированной моделью выборок данных.

Для оценки сходства распределений вероятностей двух переменных (двух выборок) могут использоваться дивергенции и метрики (Кульбака — Лейблера, Дженсена — Шеннона, Брегмана, Вассерштейна и др.), параметрические и непараметрические критерии однородности [19]. Недостатком методов первой группы является отсутствие универсальных пороговых

значений, определяющих степень различия распределений.

Для многомерных распределений в наибольшей степени разработаны параметрические критерии однородности нормально распределенных выборок, а также тесты для проверки нормальности распределения. Известные многомерные непараметрические критерии, во-первых, весьма сложны, а во-вторых, требуют наличия выборки достаточного объема.

В связи с этим представляется целесообразным исследовать возможность использования для оценки однородности исходной обучающей и сгенерированной выборок методов пространственного анализа данных [20]. Эта возможность основана на предположении о компактном расположении векторов обучающей выборки в ограниченной области пространства признаков. Поскольку объем обучающей выборки всегда конечен, границы этой области всегда определены с точностью, зависящей от количества векторов в выборке.

Ближайшим соседом (*nearest neighbor*) точки x является такая точка $N(x)$, для которой выполняется условие:

$$d_{x,N(x)} \leq d_{x,j}, \forall j \in X - x, \quad (4)$$

где d — расстояние между точками выборки в пространстве признаков.

Величина $d_{x,N(x)}$ называется расстоянием до ближайшего соседа (*nearest neighbor distance*) (*NND*) точки x . Множество таких расстояний, соответствующее всем точкам выборки X , характеризует компактность ее расположения в пространстве признаков.

Пусть W^X является некоторой обобщенной количественной мерой расстояния *NND* выборки X в пространстве признаков, которая возрастает по мере увеличения плотности выборки (уменьшения *NND*).

Пусть V^{XY} является некоторой обобщенной количественной мерой расстояния между векторами двух различных выборок X и Y в пространстве признаков, которая возрастает по мере уменьшения расстояния между векторами выборок.

Пусть X_S и X_G — исходная (обучающая) и сгенерированная выборки соответственно.

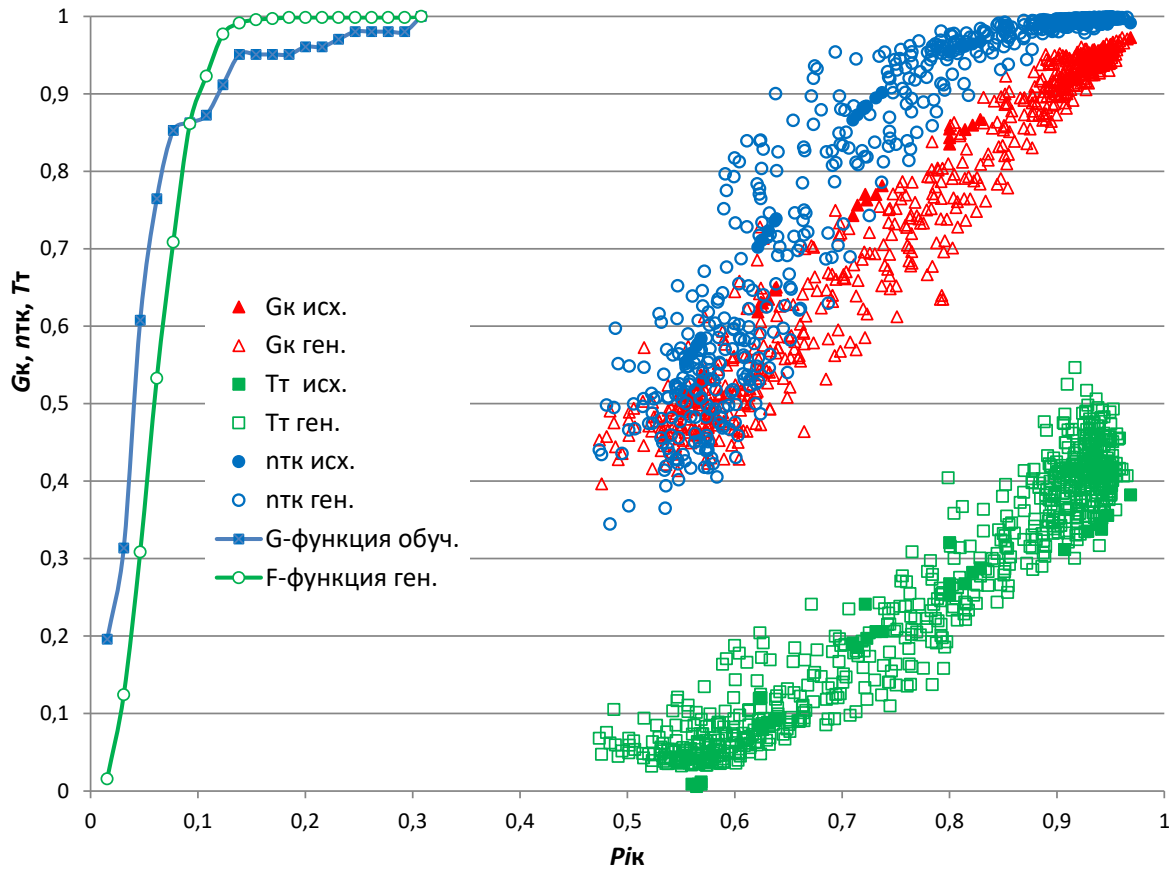


Рис. 8. Исходная обучающая и сгенерированная выборки параметров ГВТ дизеля после 500 эпох обучения. G_k , T_k , T_t , P_{ik} — нормализованные значения расхода воздуха, частоты вращения ротора турбокомпрессора, температуры отработавших газов, степени повышения давления в нагнетателе

Тогда условие однородности выборок X_S и X_G может быть записано в виде:

$$V^{X_S X_G} \geq W^{X_S}, \quad (5)$$

т. е. расстояние между векторами сгенерированной и исходной выборки в пространстве признаков не должно превосходить NND расстояния векторов исходной выборки.

В качестве обобщенных мер W^X и V^{XY} могут бы применены G - и F -функции Рипли (Ripley), используемые в задачах пространственного кластерного анализа точечных процессов [20].

G -функция определяется следующим образом.

Для данного расстояния d значение функции $G(d)$ представляет собой долю векторов выборки, для которых NND расстояние d_i меньше или равно d :

$$G(d) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N I(d_i \leq d), \quad (6)$$

где N — количество векторов в выборке;

I — индикаторная функция, равная 1, если операнд истинен, 0 в противном случае.

Зависимость $G = f(d)$ представляет собой монотонно возрастающую функцию распределения NND расстояния в выборке, характеризующую компактность расположения ее точек в пространстве признаков.

В отличие от G -функции, определяемой для расстояний до ближайших точек внутри выборки X , F -функция определяется для расстояний от точек выборки X до ближайших к ним точек выборки Y , отличной от X :

$$F(d) = \frac{1}{N_X} \cdot \sum_{i=1}^{N_X} \sum_{j=1}^{N_Y} I(d_{ij} \leq d), \quad (7)$$

где N_X, N_Y — количество точек в выборках X и Y .

Пусть определены G -функция (6) для обучающей выборки X_S и F -функция (7) для сгенерированной выборки X_G на множестве D значений расстояния d , $D = \{d_1, d_2, \dots, d_k\}$, причем

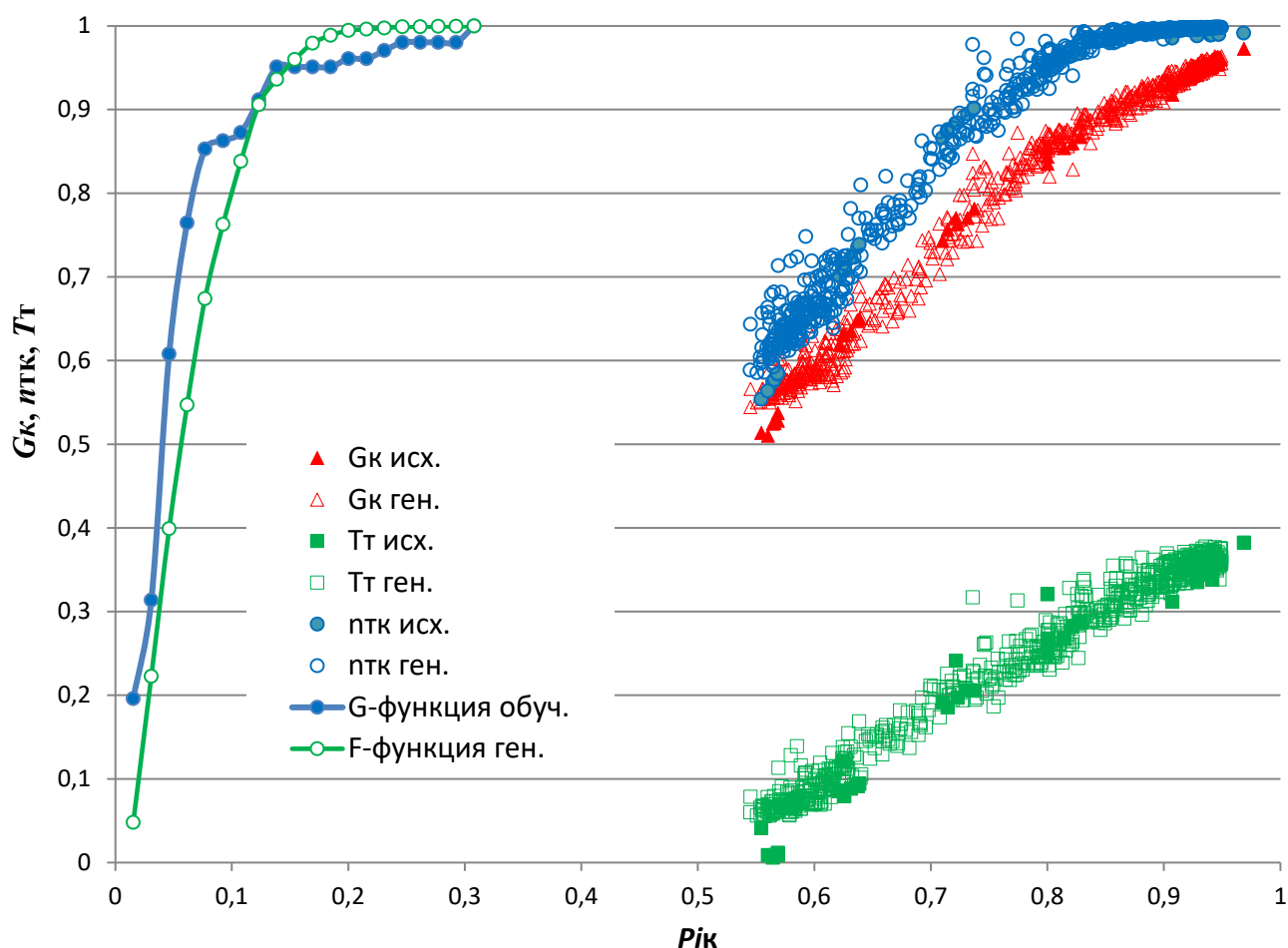


Рис. 9. Исходная обучающая и сгенерированная выборки параметров ГВТ дизеля после 5000 эпох обучения. Обозначения соответствуют рис. 8

$$(d_k - d_{k-1}) = \frac{d_{X_S}^{\max}}{k} = \text{const},$$

где k — количество интервалов.

Тогда условием однородности выборок X_S и X_G является выполнение неравенства:

$$F(d) \geq G(d), \forall d \in D, \quad (8)$$

т. е. кривая функция распределения расстояний от точек выборки X_G до ближайших точек выборки X_S не должна располагаться ниже кривой функции распределения NND расстояния выборки X_S .

На рис. 8–10 приведены плоские проекции фрагментов исходной обучающей и сгенерированной выборок входных векторов эталонной модели ГВТ дизеля, соответствующих одному из классов состояния, на разных

стадиях обучения сети *CWGAN-GP*. При расчете NND расстояния использовалась Евклидова метрика. В общем случае, учитывая возможную мультиколлинеарность входных признаков в задачах технической диагностики, более универсальным решением представляется использование метрики Махаланобиса.

Как следует из рисунков, по мере обучения генератора увеличивается компактность «синтетической» выборки и смещение области ее расположения в пространстве признаков к области расположения исходной обучающей выборки, что приводит к повышению уровня кривой F -функции.

Через 11 500 эпох обучения практически все сгенерированные точки находятся в области расположения исходной обучающей выборки, вследствие чего уровень F -функции «синтетической выборки» в области малых расстояний

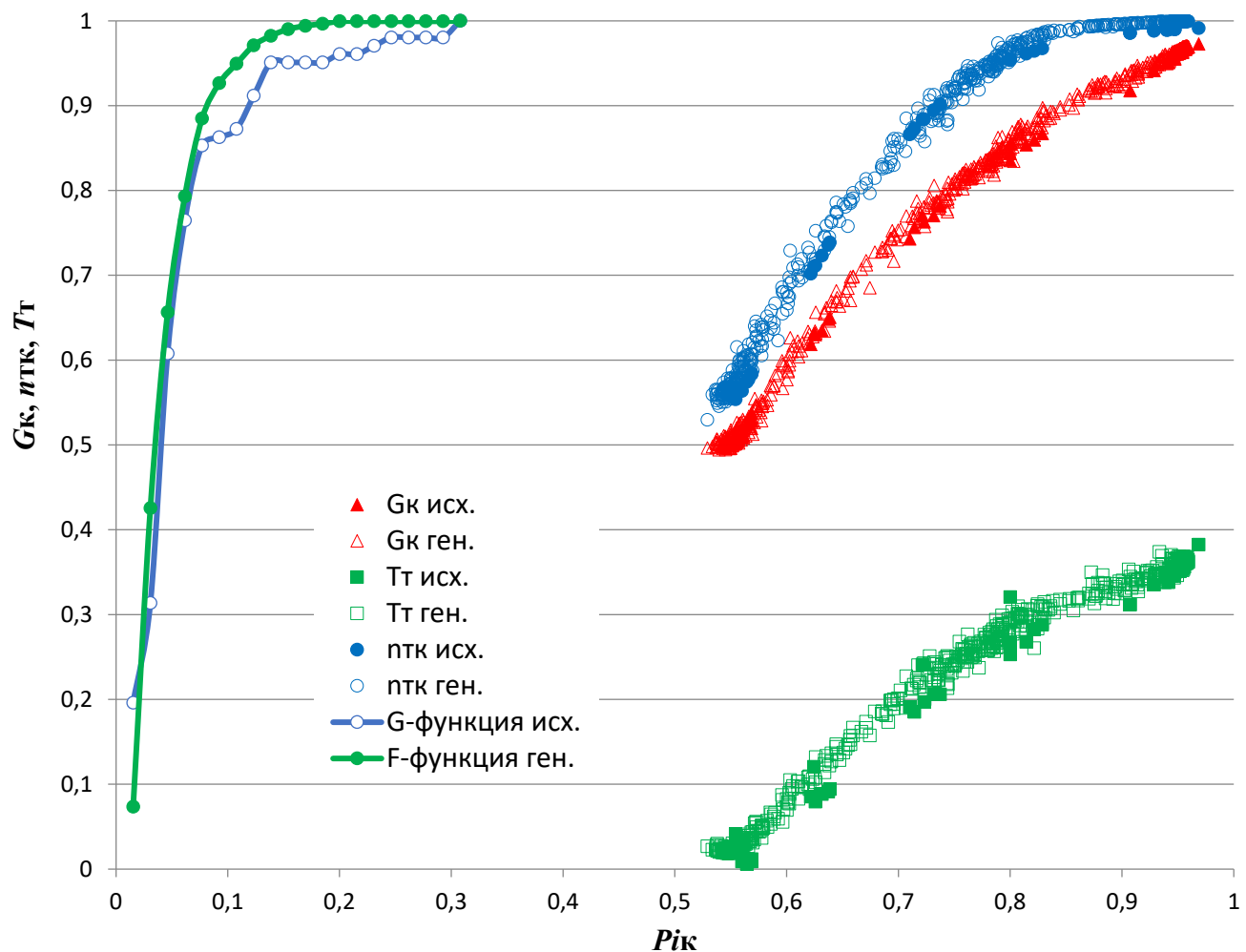


Рис. 10. Исходная обучающая и сгенерированная выборки параметров ГВТ дизеля после 11 500 эпох обучения

повышается до уровня G -функции исходной выборки, свидетельствуя о достижении приемлемого качества работы генератора и возможности завершения процесса обучения сети.

Заключение

Одной из наиболее серьезных проблем, ограничивающих возможность применения интеллектуальных методов обработки диагностической информации в задачах диагностики сложных технических объектов, является сложность формирования обучающей выборки по всем классам состояния объекта в объеме, достаточном для качественного обучения эталонных диагностических моделей или классификаторов, ввиду высоких абсолютных показателей надежности таких объектов.

Эффективным способом решения проблемы является аугментация (искусственное

расширение) обучающих данных. Особенностью обучающих выборок в задачах технической диагностики является в общем случае неизвестный вид их распределения в пространстве признаков, при том что для обеспечения качественного обучения диагностической модели дополнительные «синтетические» данные, очевидно, должны быть распределены аналогично реальной обучающей выборке.

В результате выполненного анализа существующих методов аугментации данных установлено, что возможность определения параметров распределения данных обучающей выборки в процессе обучения с последующим воспроизведением этих параметров в сгенерированных выборках может быть реализована в генеративных моделях на основе вариационных автоэнкодеров (VAE) и генеративно-состязательных сетей (GAN). При этом лучшие

результаты достигаются при использовании *GAN*.

В задачах интеллектуальной классификации состояния объекта диагностирования с размеченными обучающими выборками для генерации дополнительных данных предпочтительным является использование условных (*conditional*) сетей *GAN* (*CGAN*).

Серьезной проблемой, возникающей при решении практических задач, связанных с генерированием дополнительных данных по имеющемуся образцу (обучающей выборке небольшого объема), является оценка однородности обучающей и сгенерированной выборок, результатами которой определяется длительность (количество эпох) процесса обучения генеративной модели.

В работе предложен и обоснован оригинальный способ оценки однородности многомерных выборок на основе *G*- и *F*-функций Рипли (*Ripley*), используемых в задачах пространственного кластерного анализа точечных процессов. На его основе определен количественный показатель для контроля качества и продолжительности обучения генеративной модели.

Эффективность предложенного метода подтверждается на примере решения задачи аугментации обучающих данных для эталонной диагностической модели газовоздушного тракта тепловозного дизеля. ▲

Библиографический список

1. Федотов М. В. Предиктивная аналитика технического состояния систем тепловозов с использованием нейросетевых прогнозных моделей / М. В. Федотов, В. В. Грачев // Бюллетень результатов научных исследований. — 2021. — № 3. — С. 102–114. — DOI: 10.20295/2223-9987-2021-3-102-114.
2. Федотов М. В. Способы повышения качества обучения нейросетевых диагностических моделей сложных технических объектов / М. В. Федотов, А. Л. Шарапов, В. В. Грачев // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте ИММВ-2022: Сборник научных трудов XI Международной научно-практической конференции. В 2 томах, Коломна, 16–19 мая 2022 года. Том 1. — Коломна: Общероссийская общественная организация «Российская ассоциация искусственного интеллекта», 2022. — С. 258–267.
3. Воронцов К. В. Лекции по теории обобщающей способности / К. В. Воронцов. — URL: <http://www.ccas.ru/voron/download/Generalization.pdf> (дата обращения: 07.05.2023).
4. Shorten C. A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning / C. Shorten, T. M. Khoshgoftaar // Journal of Big Data. — 2019. — Vol. 6, Article number: 60. — URL: <https://journalofbigdataspringeropen.com/articles/10.1186/s40537-019-0197-0> (дата обращения: 07.05.2023).
5. Krizhevsky A. ImageNet classification with deep convolutional neural networks / A. Krizhevsky, I. Sutskever, G. E. Hinton // Adv Neural Inf Process Syst. — 2012. — Iss. 25. — Pp. 1106–1114.
6. Guoliang K. PatchShufe regularization / K. Guoliang, D. Xuanyi, Z. Liang et al. // arXiv preprint, 2017.
7. Zhun Z. Random erasing data augmentation / Z. Zhun, Z. Liang, K. Guoliang // arXiv e-prints, 2017.
8. Ken C. Return of the devil in the details: delving deep into convolutional nets / C. Ken, S. Karen, V. Andrea et al. // Proceedings of BMVC. — 2014.
9. Чернобровов А. Как обмануть нейросеть или что такое Adversarial attack / А. Чернобровов. — 2020. — URL: <https://www.chernobrovov.ru/articles/kak-obmanut-nejroset-ili-chto-takoe-adversarial-attack.html> (дата обращения: 07.05.2023).
10. Seyed-Mohsen M. D. A simple and accurate method to fool deep neural networks / M. D. Seyed-Mohsen, F. Alhussein, F. Pascal et al. — ArXiv preprint, 2016.
11. Jiawei S. One pixel attack for fooling deep neural networks / S. Jiawei, W. Danilo, K. Sakurai // arXiv preprints, 2018.
12. Сурцук М. Автоэнкодеры в Keras / М. Сурцук. — 2017. — URL: <https://habr.com/ru/articles/331382/> (дата обращения: 07.05.2023).
13. Goodfellow I. J. Generative Adversarial NetWork / I. J. Goodfellow, J. Pouget-Abadie, M. Mirza et al. — Reprint arXiv: 1406.2661-2014.
14. Mehdi M. Conditional Generative Adversarial Nets / M. Mehdi, S. Osindero // arXiv:1411.1784. — 2014.
15. Как найти сходство между двумя распределениями вероятностей с помощью Python. — 2023. — URL: <https://questu.ru/articles/352904/> (дата обращения: 21.06.2023).
16. Ссылка на функцию расстояния Вассерштейна в Python. — 2023. — URL: <https://question-it.com/questions/15429235/sslka-na-funksiju-rasstojanija-vasserstajna-v-python> (дата обращения: 21.06.2023).
17. Грачев В. В. Диагностирование газовоздушного тракта тепловозного дизеля с использованием интеллектуального классификатора / В. В. Грачев, М. В. Федотов, А. В. Грищенко и др. // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — № 2. — С. 124–140. — DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-124-140.
18. Фостер Д. Генеративное глубокое обучение. Творческий потенциал нейронных сетей / Д. Фостер. — СПб.: Питер, 2020. — 336 с.
19. Методы измерения расстояния и подобия. — 2023. — URL: <https://russianblogs.com/article/62221539035/> (дата обращения: 22.06.2023).
20. Rey S. Distance Based Statistical Method for Planar Point Patterns / S. Rey, W. Kang. — URL: https://pysal.org/notebooks/explore/pointpats/distance_statistics.html (дата обращения: 01.07.2023).

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 3, pp. 258–273
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-03-258-273

Improving the Training Quality of Reference Diagnostic Models of Complex Technical Objects by Augmentation of Training Data

Information about authors

Grachev V. V., Doctor in Engineering, Associate Professor, Professor¹.

E-mail: v_grach@mail.ru

Fedotov M. V., PhD in Engineering, Head of the Diagnostic Laboratory².

E-mail: fedotov-mv@vnikti.com

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Department of Locomotives and Locomotive Fleet, Saint Petersburg

²JSC “Scientific Research and Design and Technological Institute of Rolling Stock”, Diagnostic Laboratory of the Reliability and Diagnostic Department, Kolomna

Abstract: One of the most serious problems limiting the possibility of using intelligent methods of processing diagnostic information in the tasks of diagnosing complex technical objects is the difficulty of forming a training sample for all classes of the state of the object in an amount sufficient for high-quality training of reference diagnostic models or classifiers, due to high absolute reliability indicators of such objects. An effective way to solve the problem is to augment (artificially expand) training data. A feature of training samples in technical diagnostics tasks is the generally unknown type of their distribution in the space of features, while additional “synthetic” data should be distributed similarly to the actual training set to ensure high-quality training of the diagnostic model. As a result of the analysis of existing data augmentation methods, it was established that the possibility of determining data distribution parameters of the training sample in the course of training with subsequent reproduction of these parameters in the generated samples can be implemented in generative models based on variational autoencoders (VAE) and generative-adversarial networks (GAN). At the same time, the best results are achieved using GAN. In the tasks of intelligent classification of the state of a diagnostic object with marked training samples for generating additional data, it is preferable to use conditional GAN (CGAN). A serious problem that arises in solving practical problems related to the generation of additional data on the available sample (training sample of a small volume) is the assessment of the uniformity of the training and generated samples, the results of which determine the duration (number of eras) of the training process of the generative model. The paper proposes and substantiates an original method of estimating uniformity of multidimensional samples based on Ripley’s G and F functions used in spatial cluster analysis of point processes. Based on it, a quantitative indicator has been determined for quality control and training duration of the generative model. The efficiency of the proposed method is confirmed by the example of solving the problem of augmentation of training data for the reference diagnostic model of the gas-air path of a diesel locomotive.

Keywords: machine learning model; training sample; intelligent classifier; diagnostic object; generative adversarial networks; data augmentation; multidimensional samples uniformity control; spatial analysis; Ripley’s function.

References

- Fedotov M. V., Grachev V. V. Prediktivnaya analitika tekhnicheskogo sostoyaniya sistem teplovozov s ispol'zovaniem neyrosetevykh prognoznykh modeley [Predictive analytics of the technical condition of diesel locomotive systems using neural network predictive models]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2021, Iss. 3, pp. 102–114. DOI: 10.20295/2223-9987-2021-3-102-114. (In Russian)
- Fedotov M. V., Sharapova L., Grachev V. V. Sposoby povysheniya kachestva obucheniya neyrosetevykh diagnosticheskikh modeley slozhnykh tekhnicheskikh ob'ektov [Methods for improving the quality of training of neural network diagnostic models of complex technical objects]. *Integriruyemye modeli i myagkie vychisleniya v iskusstvennom intellekte IMM-2022: Sbornik nauchnykh trudov XI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. V 2 tomakh, Kolomna, 16–19 maya 2022 goda. Tom 1* [Integrated models and soft computing in artificial intelligence IMM-2022: Collection scientific works of the XI International Scientific and Practical Conference. In 2 volumes, Kolomna, May 16–19, 2022. Vol. 1]. Kolomna: Obshcherossiyskaya obshchestvennaya organizatsiya “Rossiyskaya assotsiatsiya iskusstvennogo intellekta” Publ., 2022, pp. 258–267. (In Russian)
- Vorontsov K. V. *Lektsii po teorii obobshchayushchey sposobnosti* [Lectures on the theory of generalizing ability]. Available at: <http://www.ccas.ru/voron/download/Generalization.pdf> (accessed: May 7, 2023). (In Russian)
- Shorten C., Khoshgoftaar T. M. A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning. *Journal of Big Data*, 2019, vol. 6, article number: 60. Available at: <https://journalofbigdataspringeropen.com/articles/10.1186/s40537-019-0197-0> (accessed: May 7, 2023).
- Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Adv Neural Inf Process Syst.*, 2012, Iss. 25, pp. 1106–1114.
- Guoliang K., Xuanyi D., Liang Z. et al. PatchShufe regularization, arXiv preprint, 2017.
- Zhun Z., Liang Z., Guoliang K. Random erasing data augmentation, arXiv e-prints, 2017.
- Ken C., Karen S., Andrea V. et al. Return of the devil in the details: delving deep into convolutional nets. *Proceedings of BMVC*, 2014.
- Chernobrovov A. *Kak obmanut' neyroset' ili chto takoe Adversarial attack* [How to deceive a neural network or what is an Adversarial attack]. 2020. Available at: <https://www.chernobrovov.ru/articles/kak-obmanut-nejroset-ili-chto-takoe-adversarial-attack.html> (accessed: May 7, 2023). (In Russian)
- Seyed-Mohsen M. D., Alhussein F., Pascal F. et al. A simple and accurate method to fool deep neural networks, arXiv preprint, 2016.
- Jiawei S., Danilo W., Sakurai K. One pixel attack for fooling deep neural networks, arXiv preprints, 2018.
- Surtsukov M. *Avtoenkodery v Keras* [Autoencoders in Keras]. 2017. Available at: <https://habr.com/ru/articles/331382/> (accessed: May 7, 2023). (In Russian)
- Goodfellow I. J., Pouget-Abadie J., Mirza M. et al. Generative Adversarial NetWork. Reprint arXiv: 1406.2661-2014.
- Mehdi M., Osindero S. Conditional Generative Adversarial Nets, arXiv:1411.1784, 2014.
- Kak naiti skhodstvo mezhu dvumya raspredeleniyami veroyatnostey s pomosh'yu Python* [How to find similarity between two probability distributions using Python]. 2023. Available at: <https://questu.ru/articles/352904/> (accessed: June 21, 2023). (In Russian)
- Ssylka na funktsiyu rasstoyaniya Vassershtejna v Python* [Reference to the Wasserstein distance function in Python]. 2023. Available at: <https://question-it.com/questions/15429235/ssylka-na-funktsiyu-rasstojaniya-vassershtejna-v-python> (accessed: June 21, 2023). (In Russian)
- Grachev V. V., Fedotov M. V., Grishchenko A. V. et al. Diagnostirovanie gazovozdushnogo trakta teplovoznogo dizelya s ispol'zovaniem intellektual'nogo klassifikatora [Diagnosis of the gas-air path of a diesel locomotive using an intelligent classifier]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2022, Iss. 2, pp. 124–140. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-124-140. (In Russian)
- Foster D. *Generativnoe glubokoe obuchenie. Tvorcheskij potentsial neyronnykh setey* [Generative deep learning. Creative potential of neural networks]. St. Petersburg: Piter Publ., 2020, 336 p. (In Russian)
- Metody izmereniya rasstoyaniya i podobiya* [Methods for measuring distance and similarity]. 2023. Available at: <https://russianblogs.com/article/62221539035/> (accessed: June 22, 2023). (In Russian)
- Rey S., Kang W. Distance Based Statistical Method for Planar Point Patterns. Available at: https://pysal.org/notebooks/explore/pointpats/distance_statistics.html (accessed: July 1, 2023).

УДК 656.2.025.4 + 004.891

МЕТОД НАХОЖДЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРИОРИТЕТОВ ГРУЗОВЫХ ОПЕРАЦИЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ САМОХОДНЫХ ПОДВИЖНЫХ ЕДИНИЦ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

ГОНЧАРОВА Наталья Александровна, инженер¹; аспирант²; e-mail: nataliegoncharova@list.ru

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Лаборатория № 6 НИО-101, Москва

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

Рассматривается применение аппарата нечеткой логики в задачах оптимизации последовательности выполнения операций, требующих задействования самоходных подвижных единиц на промышленном железнодорожном транспорте. Проанализированы последствия использования в качестве приоритетов операций константных значений, вычисленных аналитическим путем. Описываются тип дисциплины очереди и специфика ограничений на пребывание заявок в очереди, характерные для железнодорожных промышленных транспортно-технологических систем. Исследуются преимущества и недостатки существующих методов выстраивания в очередь грузовых операций, предусмотренных суточным планом работы, в железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах. Выявлены ограничения, возникающие при использовании методов классической теории расписаний. Нахождение оптимальной последовательности операций в железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах предполагает планирование движения для нескольких подвижных единиц одновременно, что не рассматривается в классической теории графов. Классическая задача нахождения кратчайшего пути и ее известные алгоритмы решения работают только со статичными графами, а для железнодорожных промышленных транспортно-технологических систем характерны быстрые изменения состояния графа. Проанализированы проблемы, вызванные динамичностью состояния графа в железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах. Применение методов нечеткой логики позволит выстраивать оптимальную последовательность выполнения операций на базе неполной и неточной информации и решать ряд задач оперативного планирования грузовых операций без точных вычислений. Ожидаемым результатом применения метода нахождения динамических приоритетов операций, реализованного в нейро-нечетком модуле, является повышение адаптивности оперативного планирования грузовой работы и сокращение времени задействования и потребного количества самоходных подвижных единиц.

Ключевые слова: оперативное управление вагонопотоком; время ожидания в очереди; дисциплина очереди; назначение приоритетов; оптимизация задействования подвижных единиц; нейро-нечеткий модуль.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-03-274-282

▼ Введение

Несогласованность ритмов производственных и транспортных процессов создает дополнительную сложность в прогнозировании интенсивности потока событий в железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах. Кроме того, растет степень влияния дестабилизирующих факторов на работу таких систем. Постоянно нарастающая неравномерность образования вагонопотоков делают актуальным поиск эффективных

методов планирования грузовой работы [1–3]. Наиболее важным, по мнению автора, является качество оперативного планирования. Одно из направлений повышения его качества — совершенствование методов выстраивания в очередь технологических операций, предусмотренных суточным планом работы. В современных условиях адаптивность методов планирования грузовой работы является необходимым условием устойчивости системы к влиянию дестабилизирующих факторов.

В большинстве железнодорожных интеллектуальных транспортных систем основным информационным объектом до сих пор остается вагон [4–7], а выполняемые с ним операции представлены в базах данных как реквизиты (параметры) этого объекта. В то же время первое место в рейтинге причин нарушения сроков доставки грузов (46,1 % от общего количества просрочек) занимают причины, связанные с недостаточностью собственного парка локомотивов предприятия, отсутствием или ожиданием локомотива и (или) локомотивной бригады перевозчика [8]. Сложности в процессе своевременной обработки вагонопотоков во многом являются следствием проблем неэффективного использования локомотивов и локомотивных бригад. Проблемы нерационального использования локомотивного парка создают риски неравномерного поступления порожних вагонов под погрузку, сгущенного прибытия порожних вагонов на станционные пути, непроизводительных простоев в ожидании подачи вагонов на пути необщего пользования. Для обеспечения ритмичности работы железнодорожных промышленных транспортно-технологических систем необходим поиск адаптивных технологий планирования работы локомотивного парка.

1. Проблемы и ограничения существующих подходов к определению оптимальной очередности технологических операций на промышленном железнодорожном транспорте

Задачи определения оптимальной очередности операций, выполняемых в железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах, традиционно исследуются в теории массового обслуживания, теории управляемых марковских процессов и теории расписаний.

Рассматриваемые в данной статье железнодорожные промышленные транспортно-технологические системы относятся к многоканальным системам массового обслуживания с очередью. В современных технических системах встречается три вида дисциплины очереди — со случайным выбором заявки из

очереди на обслуживание, с выбором заявки из очереди в зависимости от ее приоритета и с выбором заявки в зависимости от порядка ее поступления в очередь [9]. В железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах используется дисциплина очереди, комбинирующая второй и третий виды. В большинстве систем на пребывание заявок в очереди накладывается ряд ограничений по длине очереди, времени пребывания заявки в очереди, общему времени пребывания заявки в системе и т. п. В железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах эти ограничения обусловлены требованиями по соблюдению сроков доставки, штрафами за сверхнормативный простой вагонов, нормативами времени выполнения грузовых операций.

Наиболее часто для решения задач определения оптимальной очередности выполнения технологических операций используются методы сокращенного перебора (методы ветвей и границ). Широко распространено применение метаэвристических алгоритмов, которые находят решение, близкое к оптимальному, за приемлемое время. Недостатком таких алгоритмов является отсутствие оценок качества полученного решения [10].

Анализ существующих подходов выявил ряд ограничений в решении задач определения оптимальной очередности выполнения технологических операций на промышленном железнодорожном транспорте. Согласно теории расписаний, эта задача относится к типу «Построение расписания для приборов» (Machine Scheduling) с назначением требований исполнителям, в то же время классическая теория расписаний не рассматривает задачи минимизации количества исполнителей. Решение рассматриваемой задачи предполагает планирование движения для нескольких подвижных единиц одновременно, что не рассматривается в классической теории графов. Классическая задача нахождения кратчайшего пути и ее известные алгоритмы решения (алгоритм Дейкстры и др.) работают только со статическими графами, а для железнодорожных промышленных транспортно-технологических систем характерны быстрые изменения состояния графа.

Железнодорожный путь может многократно в течение короткого промежутка времени менять статус занятости, и текущая занятость пути не отменяет возможности его скорого дальнейшего использования [11]. Динамичность и изменение состояния графа создают дополнительную вычислительную нагрузку. Задачи поиска некоторых оптимальных путей в нечетком графе исследованы в [12].

В задаче определения оптимальной очередности выполнения технологических операций используется большое количество критериев, что увеличивает размерность задачи. Задачи дискретной оптимизации при количестве требований более 60 относятся к трудным и экстремально трудным недетерминированным полиномиальным задачам в терминах теории расписаний. Если вычислительных средств недостаточно для решения задачи, то следует реформировать не задачу (терять ее адекватность), а совершенствовать программно-техническое обеспечение процесса моделирования [13].

В большинстве методов совершенствования оперативного управления вагонопотоками в железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах в качестве приоритетов операций используются константные значения, вычисленные аналитическим путем. Использование констант в качестве приоритетов приводит к постоянному откладыванию задач, не обладающих высокой приоритетностью, но добавленных в очередь давно. Это создает риск невыполнения таких операций в условиях постоянного поступления более значимых задач.

Недостаточность функционала существующих стационарных систем управления движением для решения задач организации, планирования, контроля и коррекции транспортных технологических процессов отмечается в [14, 15]. В зарубежных странах нейросетевое моделирование активно используется для совершенствования работы железнодорожных транспортно-технологических систем [16–20]. В последние годы оно начинает развиваться и в России. В [21, 22] классифицируются научные проблемы, которые могут решаться с использованием искусственных нейронных сетей. На магистральном транспорте уже есть примеры

успешного использования нейросетевых технологий. Например, в [23] описано применение аппарата искусственных нейронных сетей в работе сортировочной станции. В [24] приведен пример использования нейро-нечеткого моделирования и генетического алгоритма для создания автоматизированной системы управления формированием оптимальных маршрутов движения поездов. В [25] рассматривается применение вероятностной нейронной сети для прогнозирования динамических показателей, характеризующих перевозочный процесс. На промышленном железнодорожном транспорте процесс внедрения инновационных технологий идет более медленными темпами, чем на магистральном, подобные разработки носят точечный характер и имеют ограниченные возможности тиражирования [26].

На современном этапе применение классических графоаналитических методов и методов теории массового обслуживания в планировании грузовой работы становится недостаточным, необходимо дополнять их методами принятия решений на основе неточных и неполных данных. Современные интеллектуальные транспортные системы позволяют интегрировать опыт и знания специалистов в алгоритмы управления. Применение методов нечеткой логики позволит принимать оптимальные решения на базе неполной и неточной информации и решать ряд задач планирования грузовых операций без точных вычислений.

2. Цель и задачи разработки нейро-нечеткого модуля расчета оптимальной последовательности выполнения технологических операций

В данной работе рассматриваются методы выстраивания в очередь грузовых операций, требующих задействования тяговых подвижных единиц, с целью сокращения времени выполнения операций и количества обслуживаемых устройств. Целью исследования является оптимизация задействования подвижных единиц для выполнения суточного плана грузовой работы в железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах. Для достижения цели необходимо решение следующих задач:

- разработка оптимальной последовательности выполнения технологических операций с подвижными единицами;
- разработка метода расчета динамических приоритетов для каждой операции.

При выстраивании грузовых операций в очередь нечеткими понятиями являются «приоритет задачи» и «время ожидания задачи в очереди на выполнение». В данной статье под приоритетом задачи будем понимать величину x_{ij}^k , характеризующую степень срочности выполнения технологической операции. Эта переменная может принимать любое значение в интервале от 0 до 1:

$$x_{ij}^k \in \{0,1\},$$

где $i..j$ — заявки на выполнение операций, поступающие в систему;

k — номер итерации процесса расчета приоритетов.

В железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах эти значения задаются маневровым диспетчером, и процесс определения приоритетности операций часто носит интуитивный характер. В памяти оперативных работников накапливаются типовые ситуации и рациональные решения к ним. Для приобретения навыков принятия правильных решений в условиях ограниченного времени в среднем требуется несколько лет накопления опыта. Четко сформулировать принципы успешной работы маневрового диспетчера не представляется возможным. Уже в 1980-х гг. при разработке первой системы горочной автоматизации возникла ситуация, когда усложнение математики, заложенной в алгоритмы управления, перестало повышать эффективность регулирования скоростей скатывания отцепов. При этом опытные операторы принимали эффективные решения в самых сложных технологических ситуациях [27].

В данной работе предлагается метод нахождения динамических приоритетов, сокращающий время использования подвижных единиц, реализованный в нейро-нечетком модуле. Процесс выстраивания оптимальной последовательности операций, выполняемых тяговым подвижным составом, осложняется

необходимостью нахождения не только зависимости конечного приоритета, но и общего вида функции.

3. Динамический процесс вычисления величины приоритета грузовых операций нейро-нечетким модулем

Вычисление конечного приоритета задачи нейро-нечетким модулем требует учета двух величин — времени ожидания задачи в очереди и собственного приоритета задачи:

$$F = \sum_k \sum_{i,j} t_{ij}^k x_{ij}^k \rightarrow \min,$$

где t_{ij}^k — время ожидания операции в очереди на выполнение;

x_{ij}^k — приоритет, присваиваемый операции, поступившей в систему. Необходимо соблюдение следующих условий:

$$x_{ij}^k \in \{0,1\},$$

$$\sum_i x_{ij}^k \leq 1,$$

$$\sum_j x_{ij}^k \leq 1,$$

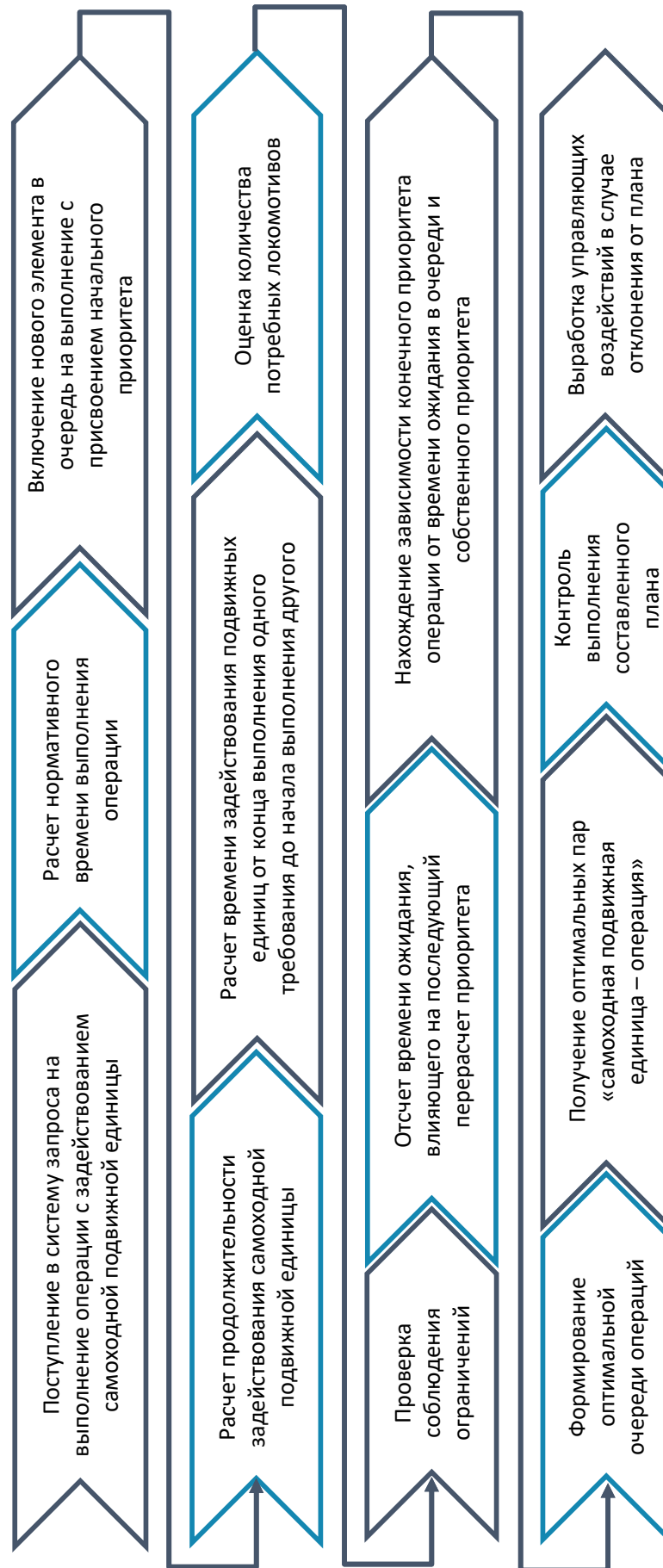
$$\sum_{i,j} x_{ij}^k = N,$$

где k — номер итерации процесса расчета приоритетов;

N — количество задействованных тяговых единиц.

Динамический процесс вычисления величины приоритета позволяет оптимизировать порядок выполнения грузовых операций. На первом этапе производится расчет оптимального пути движения состава, который позволяет уменьшить время эксплуатации локомотивного парка. На втором этапе происходит расчет времени выполнения операций и оптимальной последовательности выполнения операций (посредством расчета динамического приоритета задач).

Последовательность действий, выполняемых для разработки расписания задействования



Последовательность разработки нейро-нечетким модулем расписания задействования самоходных подвижных единиц

самоходных подвижных единиц с целью минимизации времени и ресурса тягового подвижного состава, представлена на рисунке.

Пересчет приоритетов происходит каждый раз, когда в систему поступает запрос на выполнение новой операции, требующей задействования самоходных подвижных единиц. Таким образом, реализуется k итераций процесса расчета приоритетов. Примеры расчета нечетким модулем приоритетов операций и оценка достоверности полученных результатов для транспортно-технологических систем крупных промышленных предприятий с большими объемами погрузки (выгрузки) представлены в [28], в последующих исследованиях будет рассмотрен вычислительный пример, проведена верификация данного модуля для систем со средней и малой интенсивностью грузовой работы.

Заключение

Ожидаемым результатом применения предлагаемого метода расчета динамических приоритетов операций является минимизация времени использования самоходных подвижных единиц в железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах и сокращение их потребного количества.

Предлагаемый метод позволит решать задачу выстраивания операций в очередь как задачу линейного программирования симплекс-методом при заданных ограничениях. Полученные нейро-нечетким модулем значения будут использоваться как коэффициенты в задаче линейного программирования для определения оптимальных пар «локомотив — операция».

К достоинствам предлагаемого метода можно отнести универсальность, широкие возможности тиражирования, а также отсутствие необходимости длительного обучения оперативного персонала приемам работы с нейро-нечетким модулем расчета приоритетности выполнения операций. Совершенствование программно-технического обеспечения процесса принятия решений в оперативной работе позволит сократить число ошибок, связанных с человеческим фактором.

Дальнейшим направлением исследования станет разработка таких методик расчета приоритетности операций, которые позволят учитывать вопросы принадлежности подвижных

единиц. Это поможет сократить расходы предприятия на привлечение подвижного состава, находящегося в собственности сторонних организаций. ▲

Библиографический список

1. Шаров В. А. Новые риски при реализации единого интегрированного планирования на железнодорожном транспорте общего пользования / В. А. Шаров // Наука и техника транспорта. — 2016. — № 2. — С. 87–93.
2. Подорин А. А. Анализ и моделирование вагонопотоков для задач организации железнодорожных перевозок на основе статистических и прогнозных данных в условиях их неоднородности / А. А. Подорин, С. Л. Щепанов, Д. В. Рубцов // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2021): труды Четырнадцатой международной конференции. — Москва, 27–29 сентября 2021 года / Под общ. ред. С. Н. Васильева, А. Д. Цвиркуна. — М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2021. — С. 1037–1041. — DOI: 10.25728/6989.2021.59.54.001.
3. Бедрин Д. С. Трансформация методологии планирования и прогнозирования перевозок грузов на железнодорожном транспорте / Д. С. Бедрин // Бюллетень результатов научных исследований. — 2020. — № 4. — С. 5–23. — DOI: 10.20295/2223-9987-2020-4-5-23.
4. Золотарев С. А. Методика формирования состава грузового поезда на путях промышленных предприятий вагонами различных операторов / С. А. Золотарев, А. Д. Сиразетдинова // Бюллетень транспортной информации. — 2017. — № 8(266). — С. 3–7.
5. Бельницкий Д. С. Проблема избыточного парка грузовых вагонов / Д. С. Бельницкий, А. П. Иванов, И. Н. Панкратов и др. // Вестник транспорта. — 2015. — № 4. — С. 19–21.
6. Югина О. П. Особенности эффективного использования приватного вагонного парка операторской компании / О. П. Югина, С. Ю. Соснин // Вестник УрГУПС. — Екатеринбург: УрГУПС, 2017. — № 1(33). — С. 84–90.
7. Сергеева Т. Г. Современные методы управления парком частных вагонов / Т. Г. Сергеева // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — № 1. — С. 95–102. — DOI: 10.20295/2223-9987-2022-1-95-102.
8. Солоп И. А. Причинно-следственный анализ выполнения надежности доставки грузов железнодорожным транспортом в адрес потребителей Южного региона и портов Азово-Черноморского бассейна / И. А. Солоп, Е. А. Чеботарева // Инженерный вестник Дона. — 2018. — № 3(50). — С. 54.
9. Булыгина О. В. Назначение приоритетов в технологических хабах на основе имитационного моделирования и нечеткой логики / О. В. Булыгина, А. А. Емельянов,

- Н. З. Емельянова // Прикладная информатика. — 2017. — Т. 12. — № 5(71). — С. 71–92.
10. Могилев А. А. Обзор методов решения задач теории расписаний / А. А. Могилев // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. — 2019. — № 4(37). — С. 19–32.
11. Багинова В. В. Применение алгоритмов маршрутизации агента при разработке дискретно-событийных имитационных моделей с использованием инструментов железнодорожной библиотеки Anylogic / В. В. Багинова, Д. В. Кузьмин // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. — 2023. — № 2(58). — С. 109–118. — DOI: 10.20291/2079-0392-2023-2-109-118.
12. Сперанский Д. В. Поиск оптимальных путей в нечетких графах / Д. В. Сперанский // Автоматика на транспорте. — 2022. — Т. 8. — № 4. — С. 418–426. — DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-418-426.
13. Числов О. Н. Нейросетевое исследование транспортных систем / О. Н. Числов, Н. Н. Лябах, М. В. Колесников и др. // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2021. — № 10. — С. 9–13. — DOI: 10.36535/0236-1914-2021-10-2.
14. Ефанов Д. В. Принципы автоматизации процессов управления движением на железных дорогах промышленных предприятий / Д. В. Ефанов // Транспорт Российской Федерации. — 2019. — № 6(85). — С. 27–33.
15. Lekarev A. G. The Integrated Approach to Automation and Digitalization of the Transport Processes in the Industrial Enterprises / A. G. Lekarev, M. G. Ammosov, D. V. Efanov et al. // Proceedings of 18th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2020), Varna, Bulgaria, September 4–7, 2020. — Pp. 346–350. — DOI: 10.1109/EWDTS50664.2020.9224687.
16. Tang R. A Literature Review of Artificial Intelligence Applications in Railway Systems / R. Tang, L. De Donato, N. Bešinović et al. // Transportation Research. Part C: Emerging Technologies. — 2022. — DOI: 10.1016/j.trc.2022.103679.
17. Bešinović N. Artificial Intelligence in Railway Transport: Taxonomy, Regulations, and Applications / N. Bešinović et al. // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Sept. 2022. — Vol. 23. — Iss. 9. — Pp. 14011–14024. — DOI: 10.1109/TITS.2021.3131637.
18. Cerreto F. Application of Data Clustering to Railway Delay Pattern Recognition / F. Cerreto, B. F. Nielsen, O. A. Nielsen et al. // Journal of Advanced Transportation. — 2018. — Vol. 2018, Article ID 6164534. — 18 p. — DOI: 10.1155/2018/6164534.
19. Zhu Yo. Dynamic railway timetable rescheduling for multiple connected disruptions / Yo. Zhu, R. Goverde // Transportation Research. Part C: Emerging Technologies. — 2021. — Iss. 125. — DOI: 10.1016/j.trc.2021.103080.
20. Binder S. The multi-objective railway timetable rescheduling problem / S. Binder, Yo. Maknoon, M. Bierlaire // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. — 2016. — Iss. 78. — DOI: 10.1016/j.trc.2017.02.001.
21. Сивицкий Д. А. Анализ опыта и перспектив применения искусственных нейронных сетей на железнодорожном транспорте / Д. А. Сивицкий // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2021. — № 2(57). — С. 33–41. — DOI: 10.52170/1815-9265_2021_57_33.
22. Понятов А. А. Возможности применения нейросетевых технологий на железнодорожном транспорте / А. А. Понятов // Актуальные проблемы современного транспорта. — 2022. — № 2-3(9-10). — С. 62–70.
23. Обухов А. Д. Применение нейросетевых технологий в управлении сортировочной станцией / А. Д. Обухов // Автоматика, связь, информатика. — 2017. — № 7. — С. 14–16
24. Dolgopolov P. Optimization of train routes based on neuro-fuzzy modeling and genetic algorithms / P. Dolgopolov, D. Konstantinov, L. Rybalchenko et al. // Procedia Computer Science. — 2019. — Iss. 149. — Pp. 11–18. — DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.101.
25. Краковский Ю. М. Бинарное прогнозирование динамических показателей на основе методов машинного обучения / Ю. М. Краковский, О. К. Куклина // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. — 2023. — № 62. — С. 50–55. — DOI: 10.17223/19988605/62/5.
26. Гончарова Н. А. Специфика оперативного управления вагонопотоками в железнодорожных промышленных транспортно-технологических системах / Н. А. Гончарова // Транспортные системы: сборник материалов Международной научной онлайн-конференции для молодых ученых и аспирантов, Санкт-Петербург, 29 ноября 2022 года. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2023. — С. 74–77. — DOI: 10.18720/SPBPU/2/id23-14.
27. Колесников В. И. Интеллектуализация транспортных процессов на основе гибридных технологий и мульти-агентных систем / В. И. Колесников, С. М. Ковалев, В. Н. Иванченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2012. — № 1(45). — С. 107–113.
28. Bogdanova L. Neuro-fuzzy-based mathematical model of dispatching of an industrial railway junction / L. Bogdanova, S. Nagibin, D. Loskutov // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. — 2023. — Vol. 12. — Iss. 1. — Pp. 502–513. — DOI: 10.11591/eei.v12i1.4055.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 3, pp. 274–282
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-03-274-282

Method for Assigning Dynamic Priorities of Freight Operations for Optimizing the Traction Rolling Stock Using in Railway Industrial Transport and Technological Systems

Information about author

Goncharova N. A., Engineer¹; Postgraduate Student².

E-mail: nataliegoncharova@list.ru

¹Laboratory № 6, Research Department № 101, Moscow Aviation Institute, Moscow

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

Abstract: The application of fuzzy logic is considered in optimizing the sequence of operations that involve the traction rolling stock using in industrial railway transportation. The consequences of using constant values calculated analytically as operation priorities have been analyzed. The article describes the queue discipline type and the features of restrictions for waiting time of requests in the queue in railway industrial transport and technological systems. The advantages and disadvantages of existing methods for queuing freight operations provided for daily schedule in railway industrial transport and technological systems are investigated. It is revealed that the use of classical scheduling theory methods has obstacles. Finding the optimal sequence of operations in railway industrial transport and technological systems involves simultaneous movement planning for multiple mobile units, which is not considered in classical graph theory. The classical problem of the shortest way finding and its known solving algorithms deal only with static graphs, while railway industrial transport and technological systems are characterized by rapid changes in the graph's state. The problems caused by the dynamic nature of the graph's state in railway industrial transport and technological systems have been analyzed. The fuzzy logic methods application makes it possible to determine an optimal sequence of operations based on incomplete and imprecise information and to solve freight operational planning tasks without precise calculations. The expected result of applying the method for assigning dynamic operation priorities implemented in the neuro-fuzzy module is an increase in the adaptability of freight operations planning, reducing the required number of locomotives and declining the time of traction rolling stock using.

Keywords: operational traffic control; queue waiting time; queue discipline; priorities calculating; rolling stock assignment optimization; neuro-fuzzy module.

References

1. Sharov V. A. Noveye riski pri realizatsii edinogo integrirovannogo planirovaniya na zheleznodorozhnom transporte obshchego pol'zovaniya [New risks in the implementation of a single integrated planning for public railway transport]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2016, Iss. 2, pp. 87–93. (In Russian)
2. Podorin A. A., Shchepanov S. L., Rubtsov D. V.; pod obshch. red. S. N. Vasil'eva, A. D. Tsvirkuna Analiz i modelirovanie vagonopotokov dlya zadach organizatsii zheleznodorozhnykh perevozok na osnove statisticheskikh i prognozykh dannykh v usloviyakh ikh neodnorodnosti [Analysis and modeling of car flows for the problems of organizing rail transportation based on statistical and forecast data in conditions of their heterogeneity]. *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem (MLSD'2021): trudy Chetyrnadtsatoy mezhdunarodnoy konferentsii. Moskva, 27–29 sentyabrya 2021 goda* [Management of the development of large-scale systems. (MLSD'2021): Proceedings of the Fourteenth International Conference. Moscow, September 27–29, 2021]. Moscow: Institut problem upravleniya im.
3. V. A. Trapeznikova RAN Publ., 2021, pp. 1037–1041. DOI: 10.25728/6989.2021.59.54.001. (In Russian)
3. Bedrin D. S. Transformatsiya metodologii planirovaniya i prognozirovaniya perevozok gruzov na zheleznodorozhnom transporte [Transformation of the methodology of planning and forecasting cargo transportation on railway transport]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2020, Iss. 4, pp. 5–23. DOI: 10.20295/2223-9987-2020-4-5-23. (In Russian)
4. Zolotarev S. A., Sirazetdinova A. D. Metodika formirovaniya sostava gruzovogo poezda na putyakh promyshlennykh predpriyatiy vagonami razlichnykh operatorov [The method of forming the composition of a freight train on the tracks of industrial enterprises by cars of various operators]. *Byulleten' transportnoy informatsii* [Bulletin of transport information]. 2017, Iss. 8(266), pp. 3–7. (In Russian)
5. Bel'nitskiy D. S., Ivanov A. P., Pankratov I. N. Problema izbytochnogo parka gruzovykh vagonov [The problem of an excess fleet of freight cars]. *Vestnik transporta* [Science journal of transportation]. 2015, Iss. 4, pp. 19–21. (In Russian)
6. Yugrina O. P., Sosnin S. Yu. Osobennosti effektivnogo ispol'zovaniya privatnogo vagonnogo parka operatorskoy kompanii [Features of the effective use of the private rolling stock of the operating company]. *Vestnik UrGUPS* [Bulletin of UrGUPS]. Ekaterinburg: UrGUPS Publ., 2017, Iss. 1(33), pp. 84–90. (In Russian)
7. Sergeeva T. G. Sovremennyye metody upravleniya parkom privatnykh vagonov [Modern methods of managing the fleet of private cars]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2022, Iss. 1, pp. 95–102. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-1-95-102. (In Russian)
8. Solop I. A., Chebotareva E. A. Prichinno-sledstvennyy analiz vypolneniya nadezhnosti dostavki gruzov zheleznodorozhnym transportom v adres potrebiteley Yuzhnogo regiona i portov Azovo-Chernomorskogo basseyna [Cause-and-effect analysis of the implementation of the reliability of cargo delivery by rail to consumers in the Southern region and ports of the Azov-Black Sea basin]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2018, Iss. 3(50), pp. 54. (In Russian)
9. Bulygina O. V., Emel'yanov A. A., Emel'yanova N. Z. Naznachenie prioritetov v tekhnologicheskikh khabakh na osnove imitatsionnogo modelirovaniya i nechetkoy logiki [Prioritization in technology hubs based on simulation and fuzzy logic]. *Prikladnaya informatika* [Applied Informatics]. 2017, vol. 12, Iss. 5(71), pp. 71–92. (In Russian)
10. Mogilev A. A. Obzor metodov resheniya zadach teorii raspisaniy [Review of methods for solving scheduling problems]. *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie* [Informatics, computer science and engineering education]. 2019, Iss. 4(37), pp. 19–32. (In Russian)
11. Baginova V. V., Kuz'min D. V. Primenenie algoritmov marshrutizatsii agenta pri razrabotke diskretno-sobytiynykh imitatsionnykh modeley s ispol'zovaniem instrumentov zheleznodorozhnoy biblioteki Anylogic [Application of agent routing algorithms in the development of discrete-event simulation models using the tools of the Anylogic railway library]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State University of Communications]. 2023, Iss. 2(58), pp. 109–118. DOI: 10.20291/2079-0392-2023-2-109-118. (In Russian)
12. Speranskiy D. V. Poisk optimal'nykh putey v nechetkikh grafakh [Search for optimal paths in fuzzy graphs]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2022, vol. 8, Iss. 4, pp. 418–426. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-418-426. (In Russian)
13. Chislov O. N., Lyabakh N. N., Kolesnikov M. V. Neyrosetevoye issledovanie transportnykh sistem [Neural network research of transport systems]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyy informatsionnyy sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific information collection]. 2021, Iss. 10, pp. 9–13. DOI: 10.36535/0236-1914-2021-10-2. (In Russian)
14. Efanov D. V. Printsipy avtomatizatsii protsessov upravleniya dvizheniem na zheleznnykh dorogakh promyshlennykh predpriyatiy [Principles of automation of

- traffic control processes on the railways of industrial enterprises]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2019, Iss. 6(85), pp. 27–33. (In Russian)
15. Lekarev A. G., Ammosov M. G., Efanov D. V. et al. The Integrated Approach to Automation and Digitalization of the Transport Processes in the Industrial Enterprises. Proceedings of 18th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTSS'2020), Varna, Bulgaria, September 4–7, 2020, pp. 346–350. DOI: 10.1109/EWDTSS0664.2020.9224687.
 16. Tang R., Donato L. De, Bešinović N. et al. A Literature Review of Artificial Intelligence Applications in Railway Systems. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*, 2022. DOI: 10.1016/j.trc.2022.103679.
 17. Bešinović N. et al. Artificial Intelligence in Railway Transport: Taxonomy, Regulations, and Applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Sept. 2022, vol. 23, Iss. 9, pp. 14011–14024. DOI: 10.1109/TITS.2021.3131637.
 18. Cerreto F., Nielsen B. F., Nielsen O. A. et al. Application of Data Clustering to Railway Delay Pattern Recognition. *Journal of Advanced Transportation*, 2018, vol. 2018, Article ID 6164534, 18 p. DOI: 10.1155/2018/6164534.
 19. Zhu Yo., Goverde R. Dynamic railway timetable rescheduling for multiple connected disruptions. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*, 2021, Iss. 125. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103080.
 20. Binder S., Maknoon Yo., Bierlaire M. The multi-objective railway timetable rescheduling problem. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, Iss. 78. DOI: 10.1016/j.trc.2017.02.001.
 21. Sivitskiy D. A. Analiz opyta i perspektiv primeneniya iskusstvennykh neyronnykh setey na zheleznodorozhnom transporte [Analysis of the experience and prospects for the use of artificial neural networks in railway transport]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State University of Communications]. 2021, Iss. 2(57), pp. 33–41. DOI: 10.52170/1815-9265_2021_57_33. (In Russian)
 22. Ponyatov A. A. Vozможности primeneniya neyrosetevykh tekhnologiy na zheleznodorozhnom transporte [Possibilities of using neural network technologies in railway transport]. *Aktual'nye problemy sovremennogo transporta* [Actual problems of modern transport]. 2022, Iss. 2-3(9-10), pp. 62–70. (In Russian)
 23. Obukhov A. D. Primenenie neyrosetevykh tekhnologiy v upravlenii sortirovochnoy stantsiy [Application of neural network technologies in the management of marshalling yards]. *Avtomatika, svyaz', informatika* [Automation, communication, informatics]. 2017, Iss. 7, pp. 14–16. (In Russian)
 24. Dolgoplov P., Konstantinov D., Rybalchenko L. et al. Optimization of train routes based on neuro-fuzzy modeling and genetic algorithms. *Procedia Computer Science*. 2019, Iss. 149, pp. 11–18. DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.101.
 25. Krakovskiy Yu. M., Kuklina O. K. Binarnoe prognozirovanie dinameskikh pokazateley na osnove metodov mashinnogo obucheniya [Binary forecasting of dynamic indicators based on machine learning methods]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Tomsk State University Bulletin. Management, computer technology and informatics]. 2023, Iss. 62, pp. 50–55. DOI: 10.17223/19988605/62/5. (In Russian)
 26. Goncharova N. A. Spetsifika operativnogo upravleniya vagonopotokami v zheleznodorozhnykh promyshlennykh transportno-tekhnologicheskikh sistemakh [Specifics of the operational management of car flows in railway industrial transport and technological systems]. *Transportnye sistemy: sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchnoy onlayn-konferentsii dlya molodykh uchenykh i aspirantov, Sankt-Peterburg, 29 noyabrya 2022 goda* [Transport systems: collection of materials of the International scientific online conference for young scientists and graduate students, St. Petersburg, November 29, 2022]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskii universitet Petra Velikogo Publ., 2023, pp. 74–77. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id23-14. (In Russian)
 27. Kolesnikov V. I., Kovalev S. M., Ivanchenko V. N. Intelktualizatsiya transportnykh protsessov na osnove gibridnykh tekhnologiy i mul'tiagentnykh sistem [Intelligentization of transport processes based on hybrid technologies and multi-agent systems]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Communications]. 2012, Iss. 1(45), pp. 107–113. (In Russian)
 28. Bogdanova L., Nagibin S., Loskutov D. Neuro-fuzzy-based mathematical model of dispatching of an industrial railway junction. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. — 2023, vol. 12, Iss. 1, pp. 502–513. DOI: 10.11591/eei.v12i1.4055.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОБНАРУЖЕНИЯ ОШИБОК КОДАМИ ХЭММИНГА, УЧЕТ КОТОРЫХ ЦЕЛЕСООБРАЗЕН ПРИ СИНТЕЗЕ САМОПРОВЕРЯЕМЫХ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ

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

ЗУЕВА Марина Владимировна, аналитик данных⁵; e-mail: marina-seo-media@yandex.ru

ПАШУКОВ Артем Валерьевич, старший преподаватель кафедры³; e-mail: art_pash@mail.ru

¹ООО «НИПИ «ТрансСтройбезопасность», Санкт-Петербург

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

⁵ПАО «Банк «Санкт-Петербург», Санкт-Петербург

Исследуются особенности применения кодов Хэмминга при синтезе устройств автоматике с обнаружением неисправностей. Такие устройства подразумевают организацию схем встроенного контроля для обнаружения возникающих неисправностей косвенно по результатам вычислений значений рабочих функций. При реализации схемы встроенного контроля могут использоваться различные методы. В настоящем исследовании фокус смещен на вопросы синтеза схем встроенного контроля по методу логической коррекции сигналов (методу логического дополнения). Этот метод подразумевает преобразование всех или части сигналов, поступающих от объекта диагностирования, в схеме встроенного контроля таким образом, чтобы формируемое после блока коррекции сигналов кодовое слово принадлежало заранее выбранному блоковому равномерному коду. В исследовании рассматривается применение классических кодов Хэмминга для этих целей. Применение метода логической коррекции сигналов позволяет напрямую получать значения информационных символов кодовых слов кодов Хэмминга как значения на рабочих выходах объекта диагностирования, а проверочные символы получать путем коррекции сигналов с части рабочих выходов. Однако можно использовать также и преобразования значений рабочих функций для получения информационных символов, что расширяет число способов организации схемы встроенного контроля. В статье установлены ранее не известные абсолютные и относительные показатели обнаружения ошибок в кодовых словах кодами Хэмминга с учетом их разделения по видам (по числу искажений нулевых и единичных бит) и кратностям. Экспериментальные результаты с тестовыми комбинационными схемами подтверждают эффективность применения метода логической коррекции сигналов с контролем вычислений по кодам Хэмминга для синтеза схем встроенного контроля. Полученные в работе результаты расширяют теорию синтеза самопроверяемых цифровых устройств и вычислительных систем и на практике могут быть применены при совершенствовании методов синтеза устройств автоматике с обнаружением неисправностей.

Ключевые слова: устройства автоматике с обнаружением неисправностей; самопроверяемое цифровое устройство; метод логической коррекции сигналов; код Хэмминга; обнаружение ошибок в кодовых словах; необнаруживаемая ошибка; синтез схемы встроенного контроля.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-03-283-297

▼ Введение

Современные микроэлектронные и микропроцессорные устройства автоматике, используемые как в промышленности, так и на транспорте, не обходятся без применения кодовой защиты как на аппаратном, так и на

программном уровнях [1, 2]. При этом далеко не все коды из всего многообразия помехозащищенных и помехоустойчивых кодов могут эффективно применяться для защиты устройств и результатов вычислений. Существует три основных параметра для кода,

которые должны учитываться при проектировании цифровых устройств — избыточность кода, сложность и глубина кодера и декодера [3]. Более того, в ряде приложений необходимо также учитывать возможности реализации кодирующего и декодирующего оборудования с контролепригодными структурами, а также обеспечения при функционировании конечного устройства формирования необходимого множества тестовых комбинаций [4]. Часто в данных задачах применяются блочные равномерные двоичные коды: коды Хэмминга, Рида — Маллера, циклические коды, разнообразные коды с суммированием и другие [5, 6].

Одним из известных и часто используемых кодов для построения вычислительных систем является код Хэмминга [7]. Данный код позволяет обнаруживать любые одно- и двукратные ошибки, а также обладает возможностью коррекции любых однократных искажений при относительно простых кодерах/декодерах. Эти особенности кодов Хэмминга определили их широкое применение для защиты при хранении данных, например в RAID 2¹, а также в ECC-памяти² [8]. Также данные коды используются в конвертерах сигналов [9] и при передаче данных между узлами систем управления [10]. Отдельного внимания заслуживают вопросы применения кодов Хэмминга при синтезе диагностического обеспечения, самопроверяемых и отказоустойчивых цифровых систем [11–14].

В ставшей уже классической в теории синтеза цифровых вычислительных систем монографии [5] описываются особенности использования кодов Хэмминга при синтезе самопроверяемых схем встроенного контроля (СВК). Отмечены аспекты реализации самопроверяемых схем декодирования. Однако, как показывают исследования, свойства кодов Хэмминга, проявляющиеся при синтезе

цифровых систем, к настоящему времени изучены не в полной мере.

Важной особенностью кодов Хэмминга, которая проявляется при синтезе полностью самопроверяемых СВК, является то, что функции, описывающие проверочные символы, не являются монотонными. Это связано с применением для их вычисления элементов сложения по модулю $M = 2$ (элементов XOR^3) и свойств самой функции неравнозначности [15]. Именно поэтому коды Хэмминга нельзя применять при организации полностью самопроверяемых схем с контролем объектов диагностирования по группам монотонно независимых выходов [16, 17] и отдельно объектов с монотонной реализацией структур (на всех выходах которых реализуются монотонные функции) [18, 19]. Поэтому коды Хэмминга могут эффективно использоваться при организации СВК аналогично тому, как применяются классические коды паритета — по группам независимых выходов [6]. Однако при этом целесообразно организовывать контроль по группам выходов, на которых возможны одно- и двукратные ошибки, а другие ошибки исключены [20]. Существует и возможность контроля устройств по единой группе таких выходов, что потребует специальной модификации структур устройств аналогично тому, как это делается для реализации устройств с независимыми выходами [6].

Известны исследования [21, 22], которые посвящены анализу характеристик обнаружения ошибок кодами Хэмминга на случай возникновения их только в информационных символах при условии отсутствия ошибок в проверочных символах. Это актуально, когда информационные и проверочные символы реализуются физически разными устройствами. В монографии [23] свойства кодов Хэмминга обобщены, а также приведены алгоритмы синтеза полностью самопроверяемых цифровых устройств на их основе. Далее они развиваются, например, в [24]. Однако во всех данных работах коды Хэмминга рассматриваются именно в тех

¹ RAID (redundant arrays of independent disks) — избыточный массив независимых дисков. Существует несколько уровней модели RAID. В RAID 2 хранилище данных построено с использованием чередования дисков, в дополнение к которому выделены некоторые отдельные диски, хранящие информацию о проверке и исправлении ошибок.

² ECC (error-correcting code memory) — тип компьютерной памяти с автоматической коррекцией ошибок.

³ Использование данных элементов обусловлено тем, что они дают возможность преобразования любой логической функции в другую. Как альтернатива могут быть применены и элементы $XNOR$.

приложениях, когда функции, вычисляемые на выходах объектов диагностирования, отождествляются с информационными символами и в СВК дополняются (именно «дополняются» без какой-либо коррекции!) проверочными.

Существует так называемый метод логической коррекции сигналов (ЛКС), или метод логического дополнения, для организации СВК, подразумевающий не дополнение информационных символов проверочными, а получение значений бит кодовых слов путем преобразования значений рабочих функций объекта диагностирования с помощью элементов коррекции [25]. В качестве элементов преобразования выступают элементы сложения по модулю $M = 2$ (элементы *XOR*). Основное преимущество метода ЛКС состоит в возможностях гибкого выбора контрольных функций преобразования при получении символов кода в целях уменьшения структурной избыточности СВК.

При использовании метода ЛКС в СВК значения, формируемые на выходах объекта диагностирования, корректируются, что означает, что ошибка на одном или нескольких его выходах, вызванная неисправностями различной физической природы, может транслироваться в любой из битов кодового слова. Поэтому метод ЛКС в основном развивался в двух направлениях: 1) касаясь применения контроля вычислений по признаку самодвойственности вычисляемых в СВК функций [26, 27]; 2) касаясь применения для контроля вычислений по принадлежности формируемых векторов кодовым словам неразделимых кодов [28, 29]. При использовании же делимых кодов (к ним относится и код Хэмминга) требуется учет того, что ошибки на выходах объекта диагностирования в произвольном случае могут транслироваться и на информационные, и на проверочные символы в СВК.

Известны исследования, касающиеся установления свойств блочных кодов при использовании их совместно с методом ЛКС при синтезе СВК, в которых изучены характеристики классических и модифицированных кодов с суммированием. К примеру, в статьях [30, 31] освещены характеристики классических и модульных кодов с суммированием, проявляющиеся при их использовании в процессе

синтеза СВК по методу ЛКС. В частности, показано, что если разделить в СВК функции объекта диагностирования, которые формируют информационные символы, и функции, которые вычисляют проверочные символы, то можно существенно (в разы!) сократить число необнаруживаемых ошибок в кодовых словах. Установленные свойства кодов с суммированием позволяют эффективно использовать их при синтезе СВК по методу ЛКС.

Целью данной работы является освещение результатов исследования показателей обнаружения ошибок в кодовых словах кодами Хэмминга, которые могут учитываться при синтезе СВК по методу ЛКС. Данные показатели дополняют установленные в [32] особенности обнаружения ошибок в кодовых словах кодами Хэмминга.

1. Структуры схем встроенного контроля на основе метода логической коррекции сигналов

В [21–23] подробно исследованы характеристики обнаружения ошибок в информационных символах кодами Хэмминга при безошибочности проверочных символов. Это, как отмечалось выше, актуально, когда устройства, формирующие информационные и проверочные символы, имеют отдельную реализацию, а неисправности, возникающие в них, влияют соответственно только на информационные или только на проверочные символы. Именно такая физическая реализация используется при организации СВК по традиционной структуре (рис. 1) [5, 6]. В ней любая одиночная неисправность в аппаратных средствах не может привести к искажениям одновременно и в информационных, и в проверочных символах.

Устройство $F(x)$ на рис. 1 — это объект диагностирования. Для контроля вычислений использована СВК. В ней информационные символы $f_1, f_2, \dots, f_{m-1}, f_m$ в СВК дополняются проверочными символами $g_{m+1}, g_{m+2}, \dots, g_{n-1}, g_n$. Их значения вычисляются блоком контрольной логики $G(x)$. Контроль соответствия вычисленных информационных и проверочных символов в процессе эксплуатации устройства с СВК осуществляет самопроверяемый тестер *TSC* (*totally self-checking checker*) [4].

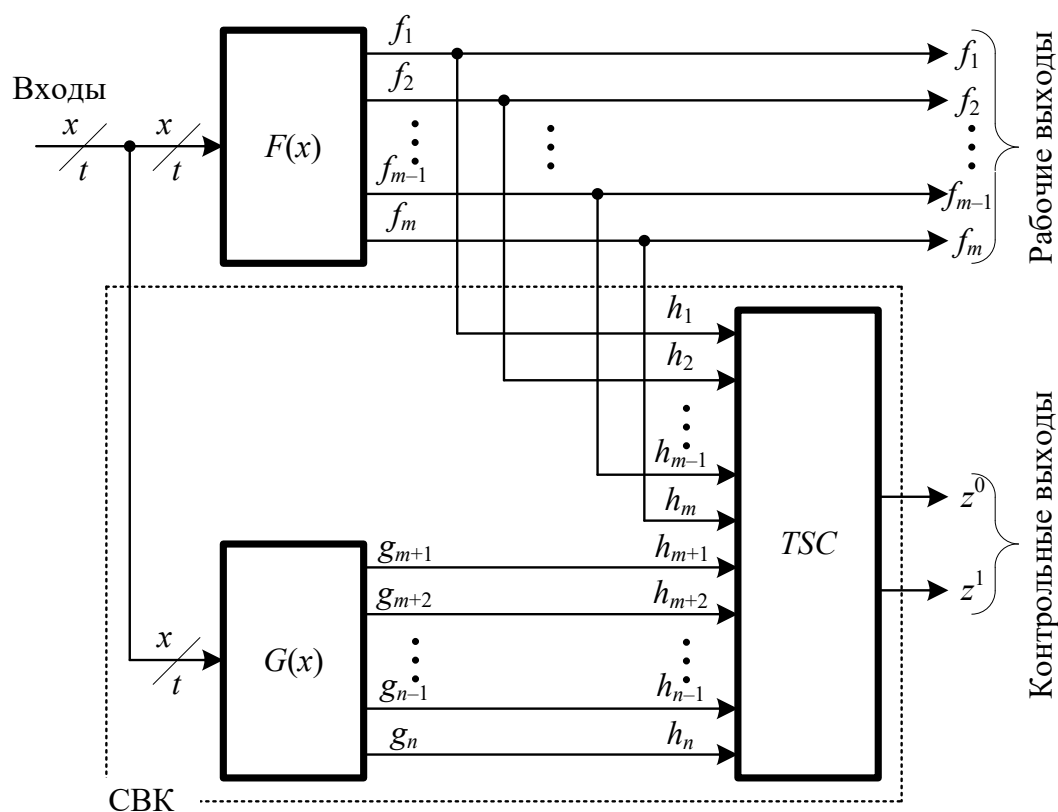


Рис. 1. Традиционная структура организации СВК с применением кода Хэмминга

Ошибки в проверочных символах обнаруживаются сразу же, так как на входах TSC будет зафиксировано несоответствие значений информационных и проверочных символов. Ошибка же в информационных символах обнаруживается только в том случае, если приводит к трансформации кодового слова в кодовое слово, не принадлежащее выбранному коду (в нашем случае — коду Хэмминга). Если же искаженное кодовое слово выбранному коду принадлежит, ошибка обнаружена не будет. Отсюда становится ясным, что свойства обнаружения ошибок в информационных символах кодовых слов напрямую определяют и особенности синтеза полностью самопроверяемых устройств по традиционной структуре.

В структуре же самопроверяемого устройства с СВК, реализованной по методу ЛКС (рис. 2), кодовые слова кода Хэмминга формируются несколько иначе. Часть выходов объекта диагностирования напрямую подключается к входам тестера, а часть — корректируется в специальном блоке коррекции сигналов (БКС) на элементах преобразования

(элементах XOR). Таким образом, на преобразуемые функции влияют неисправности, возникающие и в блоке $F(x)$, и в блоке $G(x)$. На рис. 2 показан вариант, при котором m рабочих функций формируют значения информационных символов кода Хэмминга, а $n-m$ проверочных определяются блоком контрольной логики $G(x)$. В этом случае неисправности в последнем влияют только на вычисления значений проверочных символов, а неисправности в объекте диагностирования могут влиять на вычисления значений и информационных, и проверочных символов. Структура рис. 2 может быть построена не для любого кода Хэмминга. В работах [33, 34] показано, что для случаев $n = 2^j$, $j \in \mathbb{N}$, $j \geq 3$, код Хэмминга не строится, соответственно, требуется еще один дополнительный бит. Он вычисляется без каких-либо преобразований блоком $G(x)$. Возможен и вариант, при котором большая, чем $n-m$ часть функций объекта диагностирования, будет корректироваться в СВК.

В тех же статьях [33, 34] описан алгоритм синтеза СВК по методу ЛКС и приводятся примеры

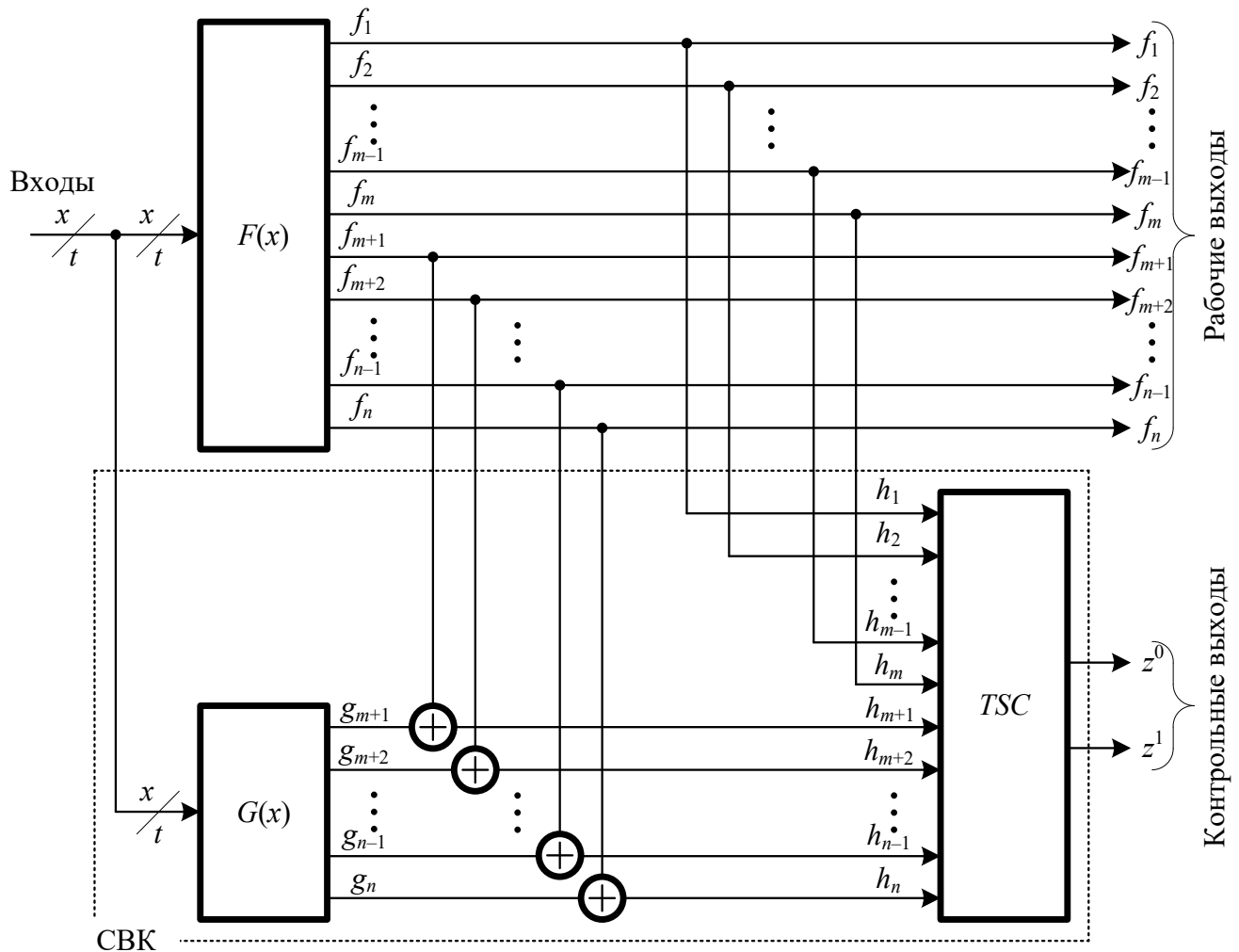


Рис. 2. Структура организации СВК с применением кода Хэмминга по методу ЛКС

реализации устройств автоматики с обнаружением неисправностей в них.

В настоящей работе поставлена *следующая задача*. Дана структура организации СВК по методу ЛКС, подразумевающая для контроля вычислений использование классического кода Хэмминга. При этом t выходов объекта диагностирования напрямую подключены к входам тестера, а значения на оставшихся $n-t$ выходах корректируются в СВК⁴. Требуется установить, какие виды ошибок и каких кратностей могут возникать в битах кодовых слов при формировании полного множества информационных векторов кодов Хэмминга. При этом рассматривается устройство,

снабженное входами $x_1, x_2, \dots, x_{t-1}, x_t$ и выходами $f_1, f_2, \dots, f_{n-1}, f_n$, а также возникающие на выходах ошибки при воздействии неисправностей из любого класса для объекта диагностирования. В контексте настоящей статьи модель неисправностей значения не имеет.

2. Характеристики обнаружения ошибок в СВК, реализованных на основе логического дополнения, кодами Хэмминга

Ошибки в кодовых словах с позиции учета их при синтезе цифровых вычислительных устройств принято классифицировать по видам и кратностям [6].

Под кратностью d понимается число искаженных бит при возникновении ошибки. Ошибка может иметь кратность $d \in \{1, 2, \dots, n\}$, где n — общее число бит.

⁴ Строго говоря, можно было бы рассматривать и общий случай, когда корректироваться могут значения на всех выходах объекта диагностирования. На саму суть решения это не влияет.

Таблица 1. Абсолютные показатели обнаружения ошибок кодами Хэмминга

m	k	N _{m+k}	N ^{D*} _m					N ^{DC*} _{m+k}				
			N ^D _m	N ^D _{m,γ}	N ^D _{m,σ}	N ^D _{m,α}	N ^{DC} _{m+k}	N ^{DC} _{m+k,γ}	N ^{DC} _{m+k,σ}	N ^{DC} _{m+k,α}		
4	3	16 256	16	4	0	12	240	58	84	98		
5	4	261 632	32	8	0	24	992	170	182	640		
6	4	1 047 552	192	40	24	128	4032	394	690	2948		
7	4	4 192 256	896	128	144	624	16 256	1310	2716	12 230		
8	4	16 773 120	3840	532	640	2668	65 280	3790	10 284	51 206		
9	4	67 100 672	15 872	1784	2688	11 400	261 632	11 702	40 316	209 614		
10	4	268 419 072	64 512	5890	10 812	47 810	1 047 552	35 590	158 004	853 958		
11	4	1 073 709 056	260 096	18 908	42 584	198 604	4 192 256	108 818	614 152	3 469 286		
12	5	17 179 738 112	520 192	37 816	85 168	397 208	16 773 120	329 362	2 152 038	14 291 720		
13	5	68 719 214 592	2 088 960	97 988	320 696	1 670 276	67 100 672	770 450	8 861 842	57 468 380		
14	5	274 877 382 656	8 372 224	282 808	1 242 832	6 846 584	268 419 072	2 327 734	34 663 532	231 427 806		
15	5	1 099 510 579 200	33 521 664	854 300	4 824 336	27 843 028	1 073 709 056	6 781 286	134 572 092	932 355 678		
16	5	4 398 044 413 952	134 152 192	2 589 880	18 736 800	112 825 512	4 294 901 760	20 401 726	525 401 364	3 749 098 670		

Таблица 2. Относительные показатели обнаружения ошибок кодами Хэмминга

m	k	γ	u	σ	α	γ*	u*	σ*	α*
4	3	0,098	25	0	75	1,476	24,167	35	40,833
5	4	0,012	25	0	75	0,379	17,137	18,347	64,516
6	4	0,018	20,833	12,5	66,667	0,385	9,772	17,113	73,115
7	4	0,021	14,286	16,071	69,643	0,388	8,058	16,708	75,234
8	4	0,023	13,854	16,667	69,479	0,389	5,806	15,754	78,44
9	4	0,024	11,24	16,935	71,825	0,39	4,473	15,409	80,118
10	4	0,024	9,13	16,76	74,11	0,39	3,397	15,083	81,52
11	4	0,024	7,27	16,372	76,358	0,39	2,596	14,65	82,754
12	5	0,003	7,27	16,372	76,358	0,098	1,964	12,83	85,206
13	5	0,003	4,691	15,352	79,957	0,098	1,148	13,207	85,645
14	5	0,003	3,378	14,845	81,777	0,098	0,867	12,914	86,219
15	5	0,003	2,548	14,392	83,06	0,098	0,632	12,533	86,835
16	5	0,003	1,93	13,967	84,103	0,098	0,475	12,233	87,292

Под видом ошибки понимается конкретное соотношение между числом искажаемых нулевых и единичных бит при ее возникновении.

Выделяют три основных вида ошибок: монотонные (однонаправленные), симметричные и асимметричные.

Ошибка является монотонной, если при ее возникновении искажаются только нулевые или только единичные биты кодового слова. В частности, искажение одного бита считается одиночной, хоть и монотонной, ошибкой. Выделение одиночных ошибок необходимо потому, что помехозащищенные коды должны обнаруживать такие ошибки всегда. Однако, как показано в статье [35], даже не помехозащищенный код может оказаться эффективным при построении устройства с СВК со 100 % обнаружением ошибок из заданной модели.

Ошибка является симметричной, если при ее возникновении искажается одинаковое количество нулевых и единичных бит кодового слова. Отметим, что симметричная ошибка может иметь только четную кратность.

Ошибка является асимметричной, если при ее возникновении искажается неравное количество нулевых и единичных бит кодового слова. Асимметричные ошибки имеют кратность $d \geq 3$. Кроме того, можно считать, что монотонные ошибки являются крайней степенью асимметричности.

Выделение трех видов ошибок позволяет учитывать характеристики избыточных кодов и использовать их для цифровых устройств с различными особенностями структур [6].

Приведем здесь результаты исследований характеристик обнаружения ошибок различных видов и кратностей в кодовых словах кодов Хэмминга. Автоматизация алгоритмов построения кодов Хэмминга и анализа характеристик обнаружения ими ошибок в кодовых словах позволила определить абсолютные и относительные показатели их обнаруживающей способности (см. табл. 1 и 2).

В табл. 1 сведены данные о числе необнаруживаемых ошибок только в информационных символах (N_m^{D*}) и одновременно и в информационных, и в проверочных символах (N_{m+k}^{DC*}). При этом ошибки классифицированы по видам. В столбцах $N_{m,\nu}^D$, $N_{m,\sigma}^D$, $N_{m,\alpha}^D$

приводятся данные о количестве необнаруживаемых монотонных, симметричных и асимметричных ошибок соответственно только в информационных символах кодов Хэмминга. Столбец N_m^D включает в себя суммарное количество необнаруживаемых ошибок в информационных символах. В столбцах $N_{m+k,\nu}^{DC}$, $N_{m+k,\sigma}^{DC}$, $N_{m+k,\alpha}^{DC}$ приводятся данные о количестве необнаруживаемых монотонных, симметричных и асимметричных ошибок соответственно и в информационных, и в проверочных символах кодов Хэмминга. В столбец N_{m+k}^{DC} занесено суммарное количество необнаруживаемых ошибок и в информационных, и в проверочных символах. В столбце N_{m+k} указано общее число ошибок, возникающих в кодовых словах кодов Хэмминга.

Анализ абсолютных характеристик обнаружения ошибок не очень удобен. Поэтому в табл. 2 приведены относительные характеристики обнаружения ошибок кодами Хэмминга. На рис. 3 и 4 они представлены в графической форме. Показатели γ и γ^* характеризуют доли необнаруживаемых ошибок кодами Хэмминга только в информационных символах и одновременно в информационных, и в проверочных символах от общего количества возможных ошибок в кодовых словах. Показатели ν , σ , α характеризуют доли необнаруживаемых монотонных, симметричных, асимметричных ошибок в информационных символах от общего числа ошибок в информационных символах, а показатели ν^* , σ^* , α^* — доли необнаруживаемых монотонных, симметричных, асимметричных ошибок в кодовых словах от общего числа ошибок в кодовых словах. Заметим, что характер изменения показателей ν , σ , α при увеличении m похож на характер изменения показателей ν^* , σ^* , α^* . Показатели ν и ν^* с увеличением значения m уменьшаются, тогда как показатели σ и σ^* находятся в диапазоне 10–20 %. Значения показателей α и α^* с ростом m также увеличиваются.

Следует еще раз отдельно подчеркнуть тот факт, что число необнаруживаемых ошибок, возникающих одновременно и в информационных, и в проверочных символах кода Хэмминга, существенно превышает число необнаруживаемых ошибок, возникающих только в

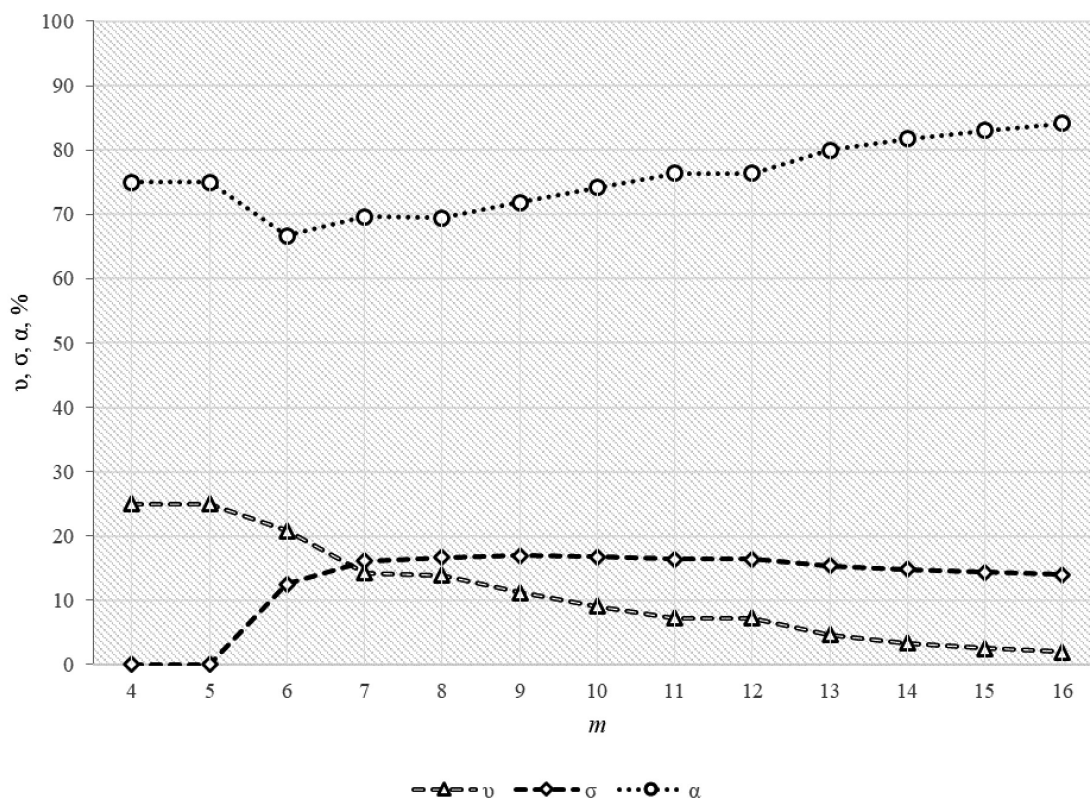


Рис. 3. Зависимости показателей ν , σ , α от значения m

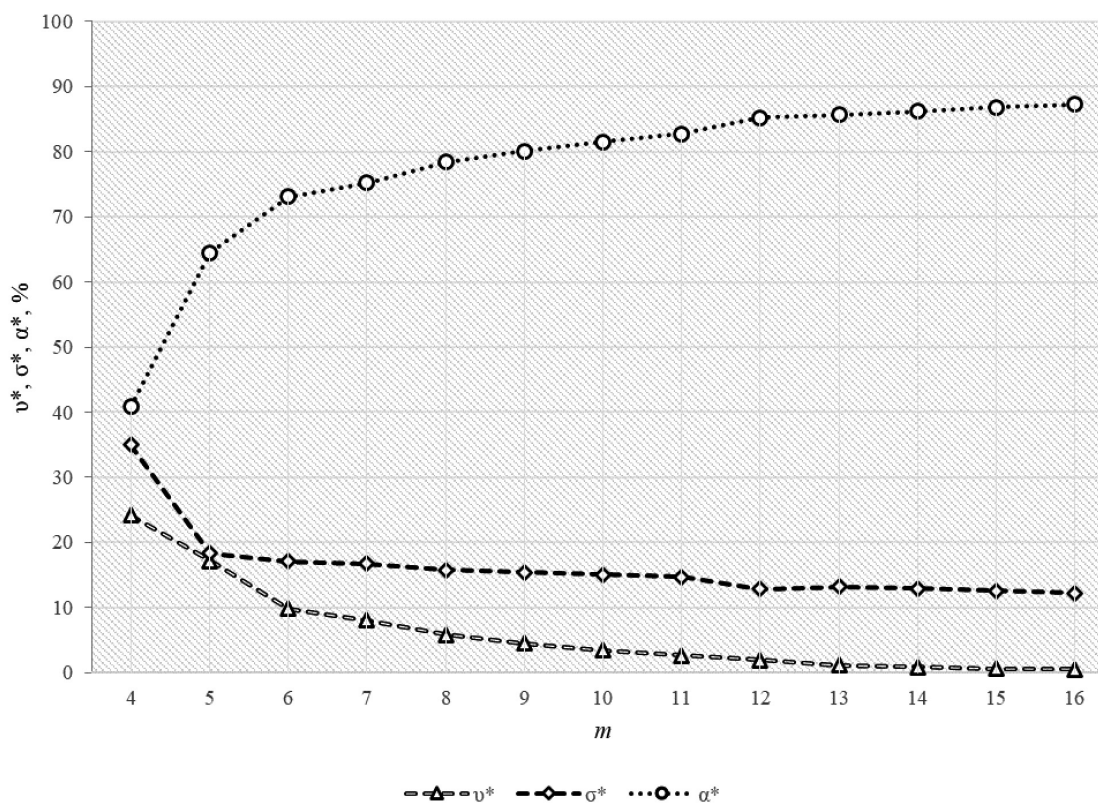


Рис. 4. Зависимости показателей ν^* , σ^* , α^* от значения m

Таблица 3. Характеристики обнаружения трехкратных ошибок кодами Хэмминга

m	k	$N_{m+k,3}$	$N_{m+k,3}^{DC}$	$N_{m+k,3}^D$	$N_{m+k,3}^{DC \setminus D}$	$\Phi_{m+k,3}^{DC}$	$\Phi_{m+k,3}^D$	$\Phi_{m+k,3}^{DC \setminus D}$
4	3	4480	112	16	96	2,5	0,357	2,143
5	4	43 008	256	32	224	0,595	0,074	0,521
6	4	122 880	640	128	512	0,521	0,104	0,417
7	4	337 920	1664	256	1408	0,492	0,076	0,417
8	4	901 120	4352	1280	3072	0,483	0,142	0,341
9	4	2 342 912	11 264	3584	7680	0,481	0,153	0,328
10	4	5 963 776	28 672	10 240	18 432	0,481	0,172	0,309
11	4	14 909 440	71 680	26 624	45 056	0,481	0,179	0,302
12	5	89 128 960	147 456	53 248	94 208	0,165	0,06	0,106
13	5	213 909 504	311 296	114 688	196 608	0,146	0,054	0,092
14	5	508 035 072	671 744	229 376	442 368	0,132	0,045	0,087
15	5	1 195 376 640	1 474 560	557 056	917 504	0,123	0,047	0,077
16	5	2 789 212 160	3 276 800	1245 184	2 031 616	0,117	0,045	0,073

информационных символах (сравните столбцы N_m^D и N_{m+k}^{DC} в табл. 1 или столбцы γ и γ^* в табл. 2).

Всего возможно $N_m = 2^m(2^m - 1)$ необнаруживаемых ошибок в кодовых словах кодов Хэмминга [23]. Из них только в информационных символах возникает $N_m^D = 2^m(2^{m-k} - 1)$ ошибок. Таким образом, одновременно в информационных и в проверочных символах возможно следующее количество необнаруживаемых ошибок [32]:

$$N_{m+k}^{DC} = N_m - N_m^D = 2^m(2^m - 1) - 2^m(2^{m-k} - 1) = 2^m(2^m - 2^{m-k}) = 2^{2m}(1 - 2^{-k}).$$

Отношение между величинами N_{m+k}^{DC} и N_m^D записывается так:

$$\vartheta_m = \frac{N_{m+k}^{DC}}{N_m^D} = \frac{2^{2m}(1 - 2^{-k})}{2^m(2^{m-k} - 1)} = \frac{2^m - 2^{m-k}}{2^{m-k} - 1} = \frac{1 - 2^{-k}}{2^{-k} - 2^{-m}}.$$

В пределе при $m \rightarrow \infty$ данная величина становится постоянной:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \vartheta_m = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1 - 2^{-k}}{2^{-k} - 2^{-m}} = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{2^k - 1}{1 - 2^{k-m}} = 2^k - 1.$$

Важными показателями кодов Хэмминга являются показатели обнаружения ошибок в области малой их кратности. Одно- и

двукратные ошибки в кодовых словах кодами Хэмминга идентифицируются все. В табл. 3 и 4 приведены рассчитанные данные обнаружения трех- и четырехкратных ошибок кодами Хэмминга. Приводятся следующие данные. В столбце $N_{m+k,d}$ приведено общее число ошибок кратностью d в кодовом слове длиной $m+k$. Оно определяется величиной $N_{m+k,d} = 2^{m+k} C_{m+k}^d$, где первый множитель характеризует общее число возможных искажений в кодовых словах длиной $m+k$, в второй — число вариантов искажений кратностью d .

В столбце $N_{m+k,d}^{DC}$ сведены расчетные данные о числе необнаруживаемых ошибок кратностью d в кодовом слове. В столбце $N_{m+k,d}^D$ сведены расчетные данные о числе необнаруживаемых ошибок кратностью d только в информационных символах. В столбце $N_{m+k,d}^{DC \setminus D}$ занесена разница между величинами $N_{m+k,d}^{DC}$ и $N_{m+k,d}^D$.

В последних трех столбцах табл. 3 и 4 записаны следующие отношения:

$$\Phi_{m+k,d}^{DC} = \frac{N_{m+k,d}^{DC}}{N_{m+k,d}} \cdot 100 \%,$$

$$\Phi_{m+k,d}^D = \frac{N_{m+k,d}^D}{N_{m+k,d}} \cdot 100 \%,$$

$$\Phi_{m+k,d}^{DC \setminus D} = \frac{N_{m+k,d}^{DC \setminus D}}{N_{m+k,d}} \cdot 100 \%.$$

Таблица 4. Характеристики обнаружения четырехкратных ошибок кодами Хэмминга

m	k	$N_{m+k,4}$	$N_{m+k,4}^{DC}$	$N_{m+k,4}^D$	$N_{m+k,4}^{DCD}$	$\Phi_{m+k,4}^{DC}$	$\Phi_{m+k,4}^D$	$\Phi_{m+k,4}^{DCD}$
4	3	4480	112	0	112	2,5	0	2,5
5	4	64 512	320	0	320	0,496	0	0,496
6	4	215 040	1024	64	960	0,476	0,03	0,446
7	4	675 840	3328	384	2944	0,492	0,057	0,436
8	4	2 027 520	9728	1280	8448	0,48	0,063	0,417
9	4	5 857 280	28 160	4608	23 552	0,481	0,079	0,402
10	4	16 400 384	78 848	15 360	63 488	0,481	0,094	0,387
11	4	44 728 320	215 040	51 200	163 840	0,481	0,114	0,366
12	5	311 951 360	458 752	102 400	356 352	0,147	0,033	0,114
13	5	802 160 640	1 032 192	237 568	794 624	0,129	0,03	0,099
14	5	2 032 140 288	2 424 832	606 208	1 818 624	0,119	0,03	0,089
15	5	5 080 350 720	5 767 168	1 572 864	4 194 304	0,114	0,031	0,083
16	5	12 551 454 720	13 959 168	4 194 304	9 764 864	0,111	0,033	0,078

По полученным в табл. 3 и 4 данным можно увидеть следующую важную закономерность: число необнаруживаемых ошибок в области малой кратности, возникающих и в информационных, и в проверочных символах, существенно больше числа данных ошибок, возникающих только в информационных символах. Это важно учитывать при синтезе СВК по методу ЛКС с применением кодов Хэмминга.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что при реализации СВК по методу ЛКС желательнее разделить физически выходы объекта диагностирования, которые преобразуются, и те выходы, которые не преобразуются. Это позволит существенно уменьшить число потенциальных необнаруживаемых кодами Хэмминга ошибок на выходах цифровых вычислительных устройств.

3. Экспериментальные результаты

Одной из задач исследований особенностей применения кодов Хэмминга при синтезе СВК по методу ЛКС являлась оценка характеристик обнаружения ошибок при контроле тестовых комбинационных схем. Мы использовали тестовые схемы из известного набора LGSynth'89 [36]. При проведении эксперимента использовалась методика из [31], подразумевающая симуляцию всех одиночных константных неисправностей (stuck-at faults) при

поступлении на входы тестовых схем полного множества комбинаций. В эксперименте фиксировалось количество не обнаруживаемых на выходах схем ошибок с классификацией их по видам и кратностям. Дадим краткое описание полученных в эксперименте результатов.

В табл. 5 и 6 сведены данные по оценке обнаруживающей способности рассматриваемого в статье метода реализации СВК для некоторых тестовых комбинационных схем.

В табл. 5 в верхней строке для каждой схемы указано число необнаруживаемых ошибок определенного вида или кратности, а в нижней — общее количество ошибок, возникающих на выходах схем. В части необнаруживаемых ошибок, распределенных по кратностям, отметим следующее: любые одно- и двукратные ошибки при контроле по методу ЛКС с применением кодов Хэмминга обнаруживаются для всех схем. Необнаруженными оказываются некоторые ошибки с кратностями $d \geq 3$. Общее же количество необнаруживаемых ошибок по сравнению с числом возникающих на выходах схем ошибок крайне низко, о чем свидетельствуют данные в последнем столбце табл. 5. В табл. 6 приведены доли необнаруживаемых монотонных, симметричных, асимметричных ошибок и общего их количества от числа возникающих на выходах схем ошибок соответствующего вида — показатели ν' , σ' , α' и

Таблица 5. Абсолютные показатели обнаружения ошибок на выходах тестовых схем

Схема	Число выходов	Всего ошибок по кратностям d					Всего ошибок по видам			Всего
		1	2	3	4	5	Монотонные	Симметричные	Асимметричные	
x2	7	0	0	16	24	0	34	0	6	40
		16 624	2428	544	96	16	19 194	274	240	19 708
f51m	8	0	0	4	0	0	0	0	4	4
		12169	781	56	2	0	12 757	206	45	13 008
cm42a	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		270	8	0	0	0	271	7	0	278
pm1	13	0	0	224	768	0	56	384	552	992
		698 112	37 632	15 872	6144	0	716 384	26 720	14 656	757 760

Таблица 6. Относительные показатели обнаружения ошибок на выходах тестовых схем

Схема	Число выходов	$\beta'_{1'}$, %	$\beta'_{2'}$, %	$\beta'_{3'}$, %	$\beta'_{4'}$, %	$\beta'_{5'}$, %	u' , %	σ' , %	α' , %	ζ' , %
x2	7	0	0	2,941	25	0	0,177	0	2,5	0,203
f51m	8	0	0	7,143	0	—	0	0	8,889	0,031
cm42a	10	0	0	—	—	—	0	0	—	0
pm1	13	0	0	1,411	12,5	—	0,008	1,437	3,766	0,131

ζ' соответственно⁵. Также в таблице даны доли необнаруживаемых ошибок данной кратностью d от общего числа ошибок данной кратностью — величины β'_d . Все относительные показатели приведены в %.

Для трех из представленных схем обнаружены все симметричные ошибки на выходах, а в классе необнаруживаемых присутствуют только трех- и четырехкратные монотонные либо асимметричные ошибки. При этом по анализу показателей β'_d можно видеть, что коды Хэмминга обладают высокими обнаруживаемыми способностями в части обнаружения ошибок малой кратностью. Например, β'_3 не превышает 7,5 %. Для ошибок бóльших кратностей при наличии их в классе необнаруживаемых значение показателя β'_d возрастает. Общая же доля необнаруживаемых ошибок крайне низка: значение показателя ζ' не превышает величины 0,25 %. Для одной схемы удалось полностью обнаружить все ошибки, возникающие на ее выходах.

⁵ Символ «'» использован для указания аналогичных показателей обнаружения ошибок на выходах тестовых схем установленным выше показателям обнаружения ошибок в кодовых словах кодов Хэмминга.

Таблица 7. Сравнение кодов Бергера и кодов Хэмминга при использовании в СВК, реализованных по методу ЛКС

Схема	Код Бергера	Код Хэмминга	Всего ошибок на выходах схемы
x2	116	40	19 708
cm42a	6	0	278
pm1	13 168	992	757 760

Полученные результаты при использовании кодов Хэмминга можно сравнить с результатами экспериментов с теми же схемами, что и для кодов Бергера при их контроле по методу ЛКС [31]. К примеру, для одинаковых схем получены следующие результаты (табл. 7). Коды Хэмминга гораздо эффективнее в СВК, реализованных по методу ЛКС, чем коды Бергера. Это связано прежде всего с обнаружением ошибок в области малой их кратности данными кодами. В [37] показано, что на выходах тестовых схем доминируют ошибки с малой кратностью, а значит, лучше с ними «справляться» будет код Хэмминга. Так, на выходах схемы «x2» код Хэмминга обнаружил практически втрое большее количество ошибок, чем

код Бергера, а на выходах схемы «pm1» — примерно в 13 раз больше! На выходах же схемы «cm42a» идентифицированы все ошибки. Можно было бы сравнить также применение кодов Хэмминга при синтезе СВК для тестовых схем по методу ЛКС с использованием модульных кодов с суммированием, однако коды Бергера обладают наилучшими характеристиками обнаружения ошибок по сравнению с последними. Читатель вправе сравнить полученные в настоящем исследовании результаты с результатами, приведенными для модульных кодов с суммированием в [30].

Заключение

Широко известные и детально изученные коды Хэмминга могут эффективно применяться на практике при синтезе СВК по методу ЛКС. Их использование позволяет сократить показатели структурной избыточности при построении устройств с обнаружением неисправностей. При этом существуют некоторые схемотехнические особенности применения кодов Хэмминга совместно с методом ЛКС.

Необходимо отметить, что благодаря своим обнаруживающим характеристикам в области ошибок малой кратностью (обнаруживаются любые одно- и двукратные ошибки) коды Хэмминга могут применяться при синтезе полностью самопроверяемых структур зачастую без схемотехнических приемов, связанных со структурным или функциональным разделением преобразуемых и непреобразуемых выходов [33, 34] или с выделением контролепригодных групп выходов объекта диагностирования [20, 23]. Приведенный пример демонстрирует такую возможность. Но становится понятным, что это потребует моделирования работы устройства с СВК для определения особенностей возникающих ошибок. Этот процесс, однако, легко автоматизируется на практике [8]. Для устройств с более сложной структурой использование схемотехнических методов получения контролепригодных выходов объекта диагностирования может потребоваться.

Применение кодов Хэмминга при синтезе СВК по методу ЛКС — перспективный подход к организации самопроверяемых цифровых устройств и вычислительных систем. ▲

Библиографический список

1. 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.
2. Дрозд А. В. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем / А. В. Дрозд, В. С. Харченко, С. Г. Антошук и др.; под ред. А. В. Дрозда и В. С. Харченко. — Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2012. — 614 с.
3. Сагалович Ю. Л. Кодовая защита оперативной памяти ЭВМ от ошибок / Ю. Л. Сагалович // Автоматика и телемеханика. — 1991. — № 5. — С. 3–45.
4. Сапожников В. В. Самопроверяемые дискретные устройства / В. В. Сапожников, В. В. Сапожников. — СПб.: Энергоатомиздат, 1992. — 224 с.
5. Согомонян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян, Е. В. Слабаков. — М.: Радио и связь, 1989. — 208 с.
6. Сапожников В. В. Теория синтеза самопроверяемых цифровых систем на основе кодов с суммированием / В. В. Сапожников, В. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. — СПб.: Лань, 2021. — 580 с.
7. Hamming R. W. Error Detecting and Correcting Codes / R. W. Hamming // Bell System Technical Journal. — 1950. — Iss. 29(2). — Pp. 147–160.
8. Tshagharyan G. Experimental Study on Hamming and Hsiao Codes in the Context of Embedded Applications / G. Tshagharyan, G. Harutyunyan, S. Shoukourian et al. // Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 — October 2, 2017. — Pp. 25–28. — DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110065.
9. Ojiganov A. A. The Use of Hamming Codes in Digital Angle Converters Based on Pseudo-Random Code Scales / A. A. Ojiganov // Measurement Techniques. — 2015. — Vol. 58. — Iss. 5. — Pp. 512–519. — DOI: 10.1007/s11018-015-0746-7.
10. Nikitin D. Automatic Locomotive Signalization System Modification with Weight-Based Sum Codes / D. Nikitin, A. Manakov, A. Nikitin et al. // Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 — October 2, 2017. — Pp. 332–336. — DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110099.
11. Demidenko S. Analysis and Generation of Test Sequences Based on Hamming Code and its Modifications / S. Demidenko, A. Ivanyukovich, L. Makhist // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 24–27 April 2006, Sorrento, Italy. — DOI: 10.1109/IMTC.2006.328404.
12. Klockmann A. A New 3-bit Burst-Error Correcting Code / A. Klockmann, G. Georgakos, M. Goessel // IEEE 23rd International Symposium on On-Line Testing and Robust System Design (IOLTS), 3–5 July 2017, Thessaloniki, Greece. — DOI: 10.1109/IOLTS.2017.8046167.
13. Mukherjee C. Hamming Code Generators using LTeX Module of Quantum-dot Cellular Automata / C. Mukherjee, S. Panda, B. Maji, A. K. Mukhopadhyay et al. // Devices for Integrated Circuit (DevIC), 23–24 March 2019, Kalyani, India. — DOI: 10.1109/DEVIC.2019.8783545.

14. Stempkovsky A. L. CICADA: A New Tool to Design Circuits with Correction and Detection Abilities / A. L. Stempkovsky, T. D. Zhukova, D. V. Telpukhov et al. // *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 13–15 May 2021, Kazan, Russia. — Pp. 1–5. — DOI: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438900.
15. Белоусов А. И. Дискретная математика / А. И. Белоусов, С. Б. Ткачев; под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. — 3-е изд., стереотип. — М.: Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 2004. — 744 с.
16. Гессель М. Исследование комбинационных самопроверяемых устройств с независимыми и монотонно независимыми выходами / М. Гессель, А. А. Морозов, В. В. Сапожников и др. // *Автоматика и телемеханика*. — 1997. — № 2. — С. 180–193.
17. Morosov A. Self-Checking Combinational Circuits with Unidirectionally Independent Outputs / A. Morosov, V. V. Saposhnikov, V. I. Saposhnikov et al. // *VLSI Design*. — 1998. — Vol. 5. — Iss. 4. — Pp. 333–345. — DOI: 10.1155/1998/20389.
18. Сагалович Ю. Л. Обнаружение неисправностей в схемной реализации системы монотонных булевых функций / Ю. Л. Сагалович, В. Ю. Соломенников // *Проблемы передачи информации*. — 1997. — Т. 33. — № 2. — С. 81–93.
19. Гессель М. Построение комбинационных самопроверяемых устройств с монотонно независимыми выходами / М. Гессель, А. А. Морозов, В. В. Сапожников и др. // *Автоматика и телемеханика*. — 1994. — № 7. — С. 148–160.
20. Ефанов Д. В. Синтез самопроверяемых комбинационных устройств на основе выделения специальных групп выходов / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, В. В. Сапожников // *Автоматика и телемеханика*. — 2018. — № 9. — С. 79–94.
21. Ефанов Д. В. Предельные свойства кода Хэмминга в схемах функционального диагностирования / Д. В. Ефанов // *Информатика и системы управления*. — 2011. — № 3. — С. 70–79.
22. Сапожников В. В. Особенности применения кодов Хэмминга при организации самопроверяемых схем встроенного контроля / В. В. Сапожников, В. В. Сапожников, Д. В. Ефанов // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. — 2018. — Т. 61. — № 1. — С. 47–59. — DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-1-47-59.
23. Сапожников В. В. Коды Хэмминга в системах функционального контроля логических устройств / В. В. Сапожников, В. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. — СПб.: Наука, 2018. — 151 с.
24. Тельпухов Д. В. Применение кода Хэмминга в задаче повышения сбоеустойчивости комбинационных схем / Д. В. Тельпухов, Т. Д. Жукова, А. Н. Щелоков и др. // *Известия ЮФУ. Технические науки*. — 2021. — № 4(221). — С. 220–231. — DOI: 10.18522/2311-3103-2021-4-220-231.
25. Гессель М. Логическое дополнение — новый метод контроля комбинационных схем / М. Гессель, А. В. Морозов, В. В. Сапожников и др. // *Автоматика и телемеханика*. — 2003. — № 1. — С. 167–176.
26. Saposhnikov V. I. Experimental Results for Self-Dual Multi-Output Combinational Circuits / V. I. Saposhnikov, V. I. Moshanin, V. I. Saposhnikov et al. // *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*. — 1999. — Vol. 14. — Iss. 3. — Pp. 295–300. — DOI: 10.1023/A:1008370405607.
27. Dmitriev A. New Self-Dual Circuits for Error Detection and Testing / A. Dmitriev, V. Saposhnikov, V. I. Saposhnikov et al. // *VLSI Design*. — 2000. — Vol. 11. — Iss. 1. — Pp. 1–21. — DOI: 10.1155/2000/84720.
28. Гессель М. Контроль комбинационных схем методом логического дополнения / М. Гессель, А. В. Морозов, В. В. Сапожников и др. // *Автоматика и телемеханика*. — 2005. — № 8. — С. 161–172.
29. Das D. K. Constraint Don't Cares for Optimizing Designs for Concurrent Checking by 1-out-of-3 Codes / D. K. Das, S. S. Roy, A. Dmitriev et al. // *Proceedings of the 10th International Workshops on Boolean Problems, Freiberg, Germany, September, 2012*. — Pp. 33–40.
30. Efanov D. Specifics of Error Detection with Modular Sum Codes in Concurrent Error-Detection Circuits Based on Boolean Complement Method / D. Efanov, G. Osadchy, M. Zueva // *Proceedings of 19th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2021), Batumi, Georgia, September 10–13, 2021*. — Pp. 59–69. — DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581036.
31. Efanov D. Special Aspects of Errors Definition via Sum Codes within Embedded Control Schemas Being Realized by Means of Boolean Complement Method / D. Efanov, G. Osadchy, M. Zueva // *Proceedings of 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2021), Vol. 1, Cracow, Poland, September 22–25, 2021*. — Pp. 424–431. — DOI: 10.1109/IDAACS53288.2021.9660837.
32. Ефанов Д. В. Особые свойства кодов Хэмминга, проявляющиеся при синтезе самопроверяемых цифровых устройств / Д. В. Ефанов // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. — 2023. — Т. 66. — № 2. — С. 85–99. — DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-85-99.
33. Ефанов Д. В. Организация самопроверяемых цифровых устройств по методу логического дополнения с применением кодов Хэмминга / Д. В. Ефанов, Д. В. Пивоваров, Г. В. Осадчий и др. // *Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС)*. — 2022. — № 1. — С. 43–49. — DOI: 10.31114/2078-7707-2022-1-43-49.
34. Ефанов Д. В. Применение кодов с эффективным обнаружением ошибок в области малой кратности при синтезе схем встроенного контроля по методу логического дополнения / Д. В. Ефанов, Д. В. Пивоваров, Г. В. Осадчий и др. // *Информационные технологии*. — 2022. — Т. 28. — № 6. — С. 283–293. — DOI: 10.17587/it.28.283-293.
35. Ефанов Д. В. Принципы формирования равномерных избыточных кодов для синтеза самопроверяемых комбинационных устройств на основе данных об их структурах / Д. В. Ефанов // *Информационные технологии*. — 2022. — Т. 28. — № 9. — С. 489–496. — DOI: 10.17587/it.28.489-496.
36. Collection of Digital Design Benchmarks. — URL: <http://ddd.fit.cvut.cz/www/prj/Benchmarks/>.
37. Дмитриев В. В. Коды с суммированием с эффективным обнаружением двукратных ошибок для организации систем функционального контроля логических устройств / В. В. Дмитриев, Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников и др. // *Автоматика и телемеханика*. — 2018. — № 4. — С. 105–122.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 3, pp. 283–297
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-03-283-297

Study of the Characteristics of Error Detection with Hamming Codes, the Consideration of which is Appropriate for the Synthesis of Self-Checking Automation Devices

Information about authors

Efanov D. V., Doctor in Engineering, Professor, IEEE Member, Full-member of International Transport Academy, General Director Deputy on Research¹, Professor^{2,3,4}.

E-mail: TrES-4b@yandex.ru

Zueva M. V., Data Analyst⁵. E-mail: marina-seo-media@yandex.ru

Pashukov A. V., Senior Lecturer of the Department³. E-mail: art_pash@mail.ru

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

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

⁵PJSC “Bank Saint-Petersburg”, Saint Petersburg

Abstract: The peculiarities of using Hamming codes in the synthesis of automatic devices with fault detection are investigated. Such devices imply the organization of concurrent error-detection circuits to detect occurring faults indirectly based on the results of calculating the values of operational functions. Various methods can be used by the implementation of concurrent error-detection circuit. In this study, the focus is shifted to the issues of synthesizing concurrent error-detection circuits using the method of Boolean signal correction (the method of Boolean complementation). This method involves transforming all or part of the signals coming from the diagnostic object in the concurrent error-detection circuit in such a way that the code word generated after the signal correction block belongs to a preselected block uniform code. The study considers the application of classical Hamming codes for these purposes. The use of the method of Boolean signal correction allows obtaining the values of the informational symbols of the code words of the Hamming code directly as values at the operational outputs of the diagnostic object, while the check symbols are obtained by correcting signals from some of the operational outputs. However, it is also possible to use transformations of operational function values to obtain informational symbols, which expands the number of ways to organize the concurrent error-detection circuit. The article presents previously unknown absolute and relative error detection metrics in the code words of the Hamming code, taking into account their categorization based on types (according to the number of distortions in zero and one bits) and multiplicities. The experimental results with test combinational circuits confirm the effectiveness of using the method of Boolean signal correction with computation control using Hamming codes for synthesizing concurrent error-detection circuits. The results obtained in this study extend the theory of synthesis for self-checking digital devices and computational systems and can be practically applied in improving the methods for synthesizing automatic devices with fault detection.

Keywords: automatic devices with fault detection; self-checking digital device; method of Boolean signal correction; Hamming code; error detection in code words; undetectable error; synthesis of concurrent error-detection circuit.

References

1. 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.

2. Drozd A. V., Kharchenko V. S., Antoshchuk S. G. et al. *Rabochee diagnostirovanie bezopasnykh informatsionno-upravlyayushchikh sistem*. Pod red. A. V. Drozda i V. S. Kharchenko [Working diagnostics of safe information and control systems. Ed. A. V. Drozd and V. S. Kharchenko]. Khar'kov: Natsional'nyy aerokosmicheskiy universitet im. N. E. Zhukovskogo “KhAI” Publ., 2012, 614 p. (In Russian)
3. Sagalovich Yu. L. Kodovaya zashchita operativnoy pamyati EVM ot oshibok [Code protection of computer RAM from errors]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics]. 1991, Iss. 5, pp. 3–45. (In Russian)
4. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. *Samoproveryaemye diskretnye ustroystva* [Self-checking discrete devices]. St. Petersburg: Energoatomizdat Publ., 1992, 224 p. (In Russian)
5. Sogomonyan E. S., Slabakov E. V. *Samoproveryaemye ustroystva i otkazoustoychivyye sistemy* [Self-checking devices and fault-tolerant systems]. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1989, 208 p. (In Russian)
6. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Efanov D. V. *Teoriya sinteza samoproveryaemykh tsifrovyykh sistem na osnove kodov s summirovaniem* [Theory of synthesis of self-checking digital systems based on codes with summation]. St. Petersburg: Lan' Publ., 2021, 580 p.
7. Hamming R. W. Error Detecting and Correcting Codes. *Bell System Technical Journal*, 1950, Iss. 29(2), pp. 147–160. (In Russian)
8. Tshagharyan G., Harutyunyan G., Shoukourian S. et al. Experimental Study on Hamming and Hsiao Codes in the Context of Embedded Applications. *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDS'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29 October 2, 2017, pp. 25–28. DOI: 10.1109/EWDS.2017.8110065.
9. Ojiganov A. A. The Use of Hamming Codes in Digital Angle Converters Based on Pseudo-Random Code Scales. *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, Iss. 5, pp. 512–519. DOI: 10.1007/s11018-015-0746-7.
10. Nikitin D., Manakov A., Nikitin A. et al. Automatic Locomotive Signalization System Modification with Weight-Based Sum Codes. *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDS'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29 October 2, 2017, pp. 332–336. DOI: 10.1109/EWDS.2017.8110099.
11. Demidenko S., Ivanyukovich A., Makhist L. Analysis and Generation of Test Sequences Based on Hamming Code and its Modifications. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, 24–27 April 2006, Sorrento, Italy. DOI: 10.1109/IMTC.2006.328404.
12. Klockmann A., Georgakos G., Goessel M. A New 3-bit Burst-Error Correcting Code. *IEEE 23rd International Symposium on On-Line Testing and Robust System Design (IOLTS)*, 3–5 July 2017, Thessaloniki, Greece. DOI: 10.1109/IOLTS.2017.8046167.
13. Mukherjee C., Panda S., Maji B. et al. Hamming Code Generators using LTeX Module of Quantum-dot Cellular Automata. *Devices for Integrated Circuit (DevIC)*, 23–24 March 2019, Kalyani, India. DOI: 10.1109/DEVIC.2019.8783545.
14. Stempkovsky A. L., Zhukova T. D., Telpukhov D. V. et al. CICADA: A New Tool to Design Circuits with Correction and Detection Abilities. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 13–15 May 2021, Kazan, Russia, pp. 1–5. DOI: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438900.
15. Belousov A. I., Tkachev S. B. *Diskretnaya matematika*. Pod red. V. S. Zarubina, A. P. Krishchenko. 3-e izd., stereotip. [Discrete Math. Ed. V.S. Zarubina, A.P. Krishchenko. 3rd ed., stereotype]. Moscow: Izd-vo MGTU im N. E. Bauman Publ., 2004, 744 p. (In Russian)
16. Gessel' M., Morozov A. A., Sapozhnikov V. V. et al. Issledovanie kombinatsionnykh samoproveryaemykh ustroystv s nezavisimymi i monotonno nezavisimymi vykhodami [Investigation of combinational self-checking devices with independent and monotonically independent outputs]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 1997, Iss. 2, pp. 180–193. (In Russian)
17. Morosov A., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. 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.
18. Sagalovich Yu. L., Solomennikov V. Yu. Obnaruzhenie neispravnostey v skhemnoy realizatsii sistemy monotonnykh bulevykh funktsiy [Detection of faults in the circuit

- implementation of a system of monotonic Boolean functions]. *Problemy peredachi informatsii* [Problems of information transmission]. 1997, vol. 33, Iss. 2, pp. 81–93. (In Russian)
19. Gessel' M., Morozov A. A., Sapozhnikov V. V. et al. Postroenie kombinatsionnykh samoproveryaemykh ustroystv s monotonno nezavisimymi vykhodami [Construction of combinational self-testing devices with monotonically independent outputs]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 1994, Iss. 7, pp. 148–160. (In Russian)
 20. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. Sintez samoproveryaemykh kombinatsionnykh ustroystv na osnove vydeleniya spetsial'nykh grupp vykhodov [Synthesis of self-checking combinational devices based on the selection of special groups of outputs]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2018, Iss. 9, pp. 79–94. (In Russian)
 21. Efanov D. V. Predel'nye svoystva koda Khemminga v skhemakh funktsional'nogo diagnostirovaniya [Limit properties of the Hamming code in functional diagnostic schemes]. *Informatika i sistemy upravleniya* [Informatics and control systems]. 2011, Iss. 3, pp. 70–79. (In Russian)
 22. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Efanov D. V. Osobennosti primeneniya kodov Khemminga pri organizatsii samoproveryaemykh skhem vstroennogo kontrolya [Features of the use of Hamming codes in the organization of self-checking schemes of built-in control]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. 2018, vol. 61, Iss. 1, pp. 47–59. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-1-47-59. (In Russian)
 23. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Efanov D. V. Kody Khemminga v sistemakh funktsional'nogo kontrolya logicheskikh ustroystv [Hamming codes in systems of functional control of logical devices]. St. Petersburg: Nauka Publ., 2018, 151 p. (In Russian)
 24. Tel'pukhov D. V., Zhukova T. D., Shchelokov A. N. et al. Primenenie koda Khemminga v zadache povysheniya sboeustoychivosti kombinatsionnykh skhem [Application of the Hamming code in the problem of increasing the fault tolerance of combinational circuits]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Technical science]. 2021, Iss. 4 (221), pp. 220–231. DOI: 10.18522/2311-3103-2021-4-220-231. (In Russian)
 25. Gessel' M., Morozov A. V., Sapozhnikov V. V. et al. Logicheskoe dopolnenie novyy metod kontrolya kombinatsionnykh skhem [Logical addition — a new method for controlling combinational circuits]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2003, Iss. 1, pp. 167–176. (In Russian)
 26. Sapozhnikov V. V., Moshanin V., Sapozhnikov V. V. et al. Experimental Results for Self-Dual Multi-Output Combinational Circuits. *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 1999, vol. 14, Iss. 3, pp. 295–300. DOI: 10.1023/A:1008370405607.
 27. Dmitriev A., Sapozhnikov V., Sapozhnikov V. V. et al. New Self-Dual Circuits for Error Detection and Testing. *VLSI Design*, 2000, vol. 11, Iss. 1, pp. 1–21. DOI: 10.1155/2000/84720.
 28. Gessel' M., Morozov A. V., Sapozhnikov V. V. et al. Kontrol' kombinatsionnykh skhem metodom logicheskogo dopolneniya [Control of combinational circuits by the method of logical complement]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2005, Iss. 8, pp. 161–172. (In Russian)
 29. Das D. K., Roy S. S., Dmitriev A. et al. Constraint Don't Cares for Optimizing Designs for Concurrent Checking by 1-out-of-3 Codes. *Proceedings of the 10th International Workshops on Boolean Problems*, Freiberg, Germany, September, 2012, pp. 33–40.
 30. Efanov D., Osadchy G., Zueva M. Specifics of Error Detection with Modular Sum Codes in Concurrent Error-Detection Circuits Based on Boolean Complement Method. *Proceedings of 19th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2021)*, Batumi, Georgia, September 10–13, 2021, pp. 59–69. DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581036.
 31. Efanov D., Osadchy G., Zueva M. Special Aspects of Errors Definition via Sum Codes with-in Embedded Control Schemas Being Realized by Means of Boolean Complement Method // *Proceedings of 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2021)*, Vol. 1, Cracow, Poland, September 22–25, 2021, pp. 424–431. DOI: 10.1109/IDAACS53288.2021.9660837.
 32. Efanov D. V. Osobyie svoystva kodov Khemminga, proyavlyayushchiesya pri sinteze samo-proveryaemykh tsifrovyykh ustroystv [Special properties of Hamming codes, manifested in the synthesis of self-checking digital devices]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. 2023, vol. 66, Iss. 2, pp. 85–99. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-85-99. (In Russian)
 33. Efanov D. V., Pivovarov D. V., Osadchy G. V. et al. Organizatsiya samoproveryaemykh tsifrovyykh ustroystv po metodu logicheskogo dopolneniya s primeneniem kodov Khemminga [Organization of self-checking digital devices by the logical complement method using Hamming codes]. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES)* [Problems of development of promising micro- and nanoelectronic systems (MES)]. 2022, Iss. 1, pp. 43–49. DOI: 10.31114/2078-7707-2022-1-43-49. (In Russian)
 34. Efanov D. V., Pivovarov D. V., Osadchy G. V. et al. Primenenie kodov s effektivnym obnaruzheniem oshibok v oblasti maloy kratnosti pri sinteze skhem vstroennogo kontrolya po metodu logicheskogo dopolneniya [Application of Codes with Efficient Error Detection in the Region of Low Multiplicity in the Synthesis of Embedded Control Circuits by the Logical Complement Method]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technology]. 2022, vol. 28, Iss. 6, pp. 283–293. DOI: 10.17587/it.28.283-293. (In Russian)
 35. Efanov D. V. Printsipy formirovaniya ravnomernykh izbytochnykh kodov dlya sinteza samoproveryaemykh kombinatsionnykh ustroystv na osnove dannykh ob ikh strukturakh [Principles of formation of uniform redundant codes for the synthesis of self-checking combinational devices based on data on their structures]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technology]. 2022, vol. 28, Iss. 9, pp. 489–496. DOI: 10.17587/it.28.489-496. (In Russian)
 36. Collection of Digital Design Benchmarks. Available at: <http://ddd.fit.cvut.cz/www/prj/Benchmarks/>.
 37. Dmitriev V. V., Efanov D. V., Sapozhnikov V. V. et al. Kody s summirovaniem s effektivnym obnaruzheniem dvukratnykh oshibok dlya organizatsii sistem funktsional'nogo kontrolya logicheskikh ustroystv [Summation codes with effective detection of double errors for the organization of functional control systems for logical devices]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2018, Iss. 4, pp. 105–122. (In Russian)

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ СИСТЕМ СИГНАЛИЗАЦИИ, ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ И БЛОКИРОВКИ МУРМАНСКОГО РЕГИОНА ОКТЯБРЬСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

КУШПИЛЬ Игорь Васильевич, канд. техн. наук, доцент кафедры¹; e-mail: i_kushpil@mail.ru
МОИСЕЕВ Владимир Валерьевич, главный инженер²; e-mail: moiseev@crtc.spb.ru

¹Петербургский государственный университет путей сообщения, Императора Александра I, кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах», Санкт-Петербург

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, «Центр компьютерных железнодорожных технологий», Санкт-Петербург

Учитывая перспективы будущего развития межгосударственного сообщения в Северо-Западном регионе и положительный опыт эксплуатации линии Санкт-Петербург — Хельсинки, в статье проведен анализ состояния систем сигнализации, централизации и блокировки основных приграничных железнодорожных направлений Октябрьской железной дороги. Проведенный анализ показал, что существуют два наиболее перспективных приграничных железнодорожных участка, имеющих прямой выход к главному железнодорожному ходу и портам Баренцевого и Белого морей. Со стороны Финляндии: участок ст. Алакуртти — ст. Ручьи Карельские, который в перспективе можно продлить до ближайшей финской ст. Салла (70–75 км). Со стороны Норвегии: участок ст. Никель-Мурманский — ст. Кола, который планируется продлить до норвежской ст. Киркенес (50–60 км). На данных участках требуется модернизация систем сигнализации, централизации и блокировки. Дополнительно в статье предложено техническое решение по модернизации этих систем, с одновременным сокращением эксплуатационных затрат на их содержание. Суть решения состоит в использовании системы микропроцессорной централизации с распределенной архитектурой управления, принципами координатного управления движением поездов и применением малолюдных технологий обслуживания устройств сигнализации, централизации и блокировки.

Ключевые слова: Октябрьская железная дорога, Алакуртти, Никель-Мурманский, Мурманский порт, сигнализация, централизация, блокировка, автоматика и телемеханика, малодеятельные железнодорожные линии, межгосударственные перевозки, Финляндия, Норвегия.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-03-298-306

▼ Введение

Положительный опыт эксплуатации железнодорожной линии Санкт-Петербург — Хельсинки позволяет говорить о перспективах дальнейшего расширения международных перевозок между РФ и странами Северной Европы, с учетом будущего восстановления партнерских отношений между указанными странами, при стабилизации экономической и политической обстановки.

По мнению авторов, наиболее перспективные точки возможного межгосударственного стыкования находятся в Мурманском регионе Октябрьской железной дороги (ОЖД). В данном регионе сеть ОЖД граничит с Финляндией и Норвегией, тем не менее железнодорожное сообщение с этими странами отсутствует.

Наиболее значимым торгово-промышленным центром региона является Мурманский транспортный узел. В его состав входят: Мурманский морской торговый порт, Мурманский рыбный порт и другие портовые предприятия, расположенные на восточном берегу Кольского залива; железнодорожные станции Мурманск, Кола, Комсомольск-Мурманский, Ваенга и ряд других.

Остальные транспортные узлы сформированы в основном в зоне расположения горнообогатительных комбинатов и носят ярко выраженный промышленно-технологический характер. Крупнейшие из них Апатиты, Кировск и Оленегорск.

Перспектива развития Мурманского узла предусматривает строительство портовых комплексов на восточном берегу Кольского залива

с соответствующим развитием железнодорожной инфраструктуры и строительством новой.

В структуре грузопотоков, следующих по сети ОАО «РЖД» через порт Мурманск, прогнозируется увеличение доли объемов перевозок каменного угля при снижении удельного веса рудных грузов, химических и минеральных удобрений и нефтепродуктов [1].

Все вышесказанное позволяет утверждать, что появление новых межгосударственных транспортных коридоров обеспечит, в перспективе, экономический рост РФ. Кроме того, открытие такого сообщения представляет особый интерес для Норвегии и Финляндии, так как появление более короткого пути выхода на Байкало-Амурскую и Транссибирскую магистрали сократит время доставки грузов, которые ранее транспортировались по морским коридорам арктических вод РФ.

Ключевая роль в обеспечении безопасного пропуска поездов и потребной пропускной способности участков ложится на инфраструктуру систем сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ). Целью статьи является проведение анализа состояния систем СЦБ основных приграничных железнодорожных направлений Октябрьской железной дороги с целью получения выводов и принятия решений по их модернизации.

1. Основные положения

Системы СЦБ играют важнейшую роль в регулировании и обеспечении безопасности движения поездов на станциях, перегонах и переездах. К станционным системам СЦБ относятся системы централизации (механической, электрической, релейно-процессорной, микропроцессорной) и маршрутно-контрольные устройства. К перегонным системам СЦБ относятся системы интервального регулирования движения поездов, такие как электрожезловая система и телефонные средства связи, системы полуавтоматической блокировки, системы автоматической блокировки и автоматической локомотивной сигнализации. К переездным устройствам СЦБ относятся системы автоматической переездной сигнализации и заградительные устройства (шлагбаумы, щиты и пр.).

Для организации централизованного диспетчерского управления из одного отдельного пункта стрелками, сигналами светофоров и другими объектами станций применяют системы диспетчерской централизации (ДЦ), а для контроля состояния этих устройств системы диспетчерского контроля (ДК). Системы ДЦ и ДК «накладываются» на действующие станционные, перегонные и переездные системы СЦБ [2].

Анализ текущего состояния устройств СЦБ приграничных направлений Мурманского региона ОЖД был проведен по трем основным направлениям [3]:

- главный ход ст. Лоухи — ст. Мурманск протяженностью 445 км (рис. 1, участок *C — B — D*);
- примыкающий к главному ходу со стороны Финляндии участок ст. Алакуртти — ст. Ручьи Карельские протяженностью 99 км (рис. 1, участок *A — B*);
- примыкающий к главному ходу со стороны Норвегии участок ст. Никель-Мурманский — ст. Кола протяженностью 186 км (рис. 1, участок *E — D*).

Оценка технического состояния устройств СЦБ проводилась на основании отчета о научно-исследовательской работе Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I [4]. Стоит отметить, что данный проект финансировался программой приграничного сотрудничества между странами Северного Калотта¹ и Северо-Запада РФ (Kolarctic CBC 2014–2020) [5], участие в которой принимали авторы статьи.

2. Анализ технической оснащенности средствами сигнализации, централизации и блокировки основных направлений

2.1. Главный ход ст. Лоухи — ст. Мурманск

Протяженность главного хода Мурманского региона от ст. Лоухи до ст. Мурманск составляет 445 км. На данном участке расположена 31 станция и 10 блокпостов, имеется множество пассажирских платформ и остановочных

¹ Северная часть Норвегии, Швеции, Финляндии.

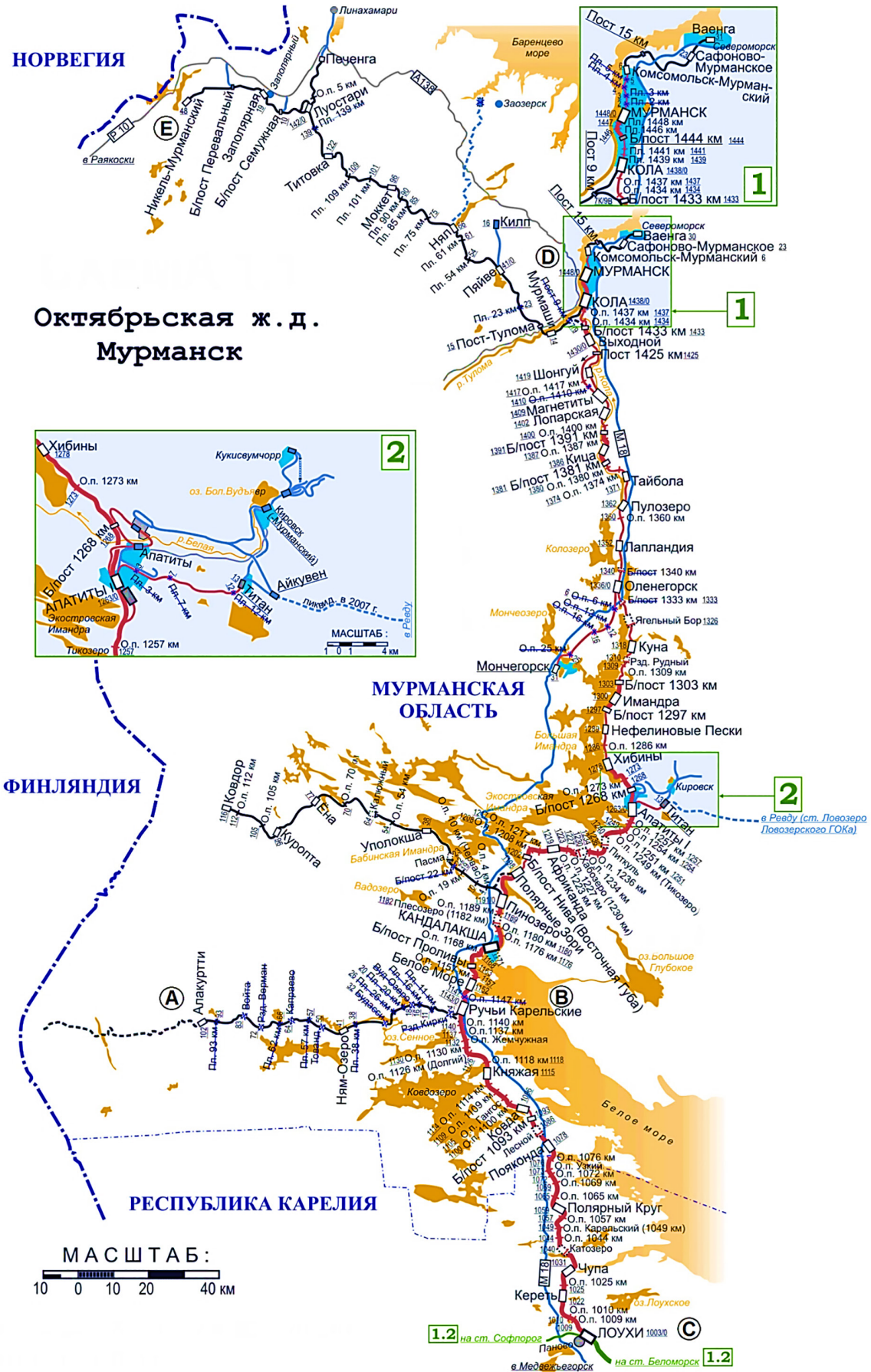


Рис. 1. Схема Мурманского региона Октябрьской железной дороги

пунктов. Участок ст. Лоухи — ст. Оленегорск двухпутный. Участок ст. Оленегорск — ст. Мурманск однопутный, с наличием двухпутных перегонов (вставок).

Участок электрифицирован переменным током, большинство станций и перегонов (около 90 %) оборудованы системами ДЦ «Нева», ДЦ «Сетунь» и системой АПК-ДК. Переезды в пределах участка оснащены системами СЦБ. Текущие размеры движения составляют порядка 30–40 пар поездов в сутки. Осуществляется регулярное пассажирское и грузовое движение. Пропуск поездов по участку выполняется круглосуточно.

Для пропуска поездов на данном участке применяются устаревшие системы числовой кодовой автоблокировки трех типов: однопутная кодовая автоблокировка переменного тока 25 и 50 Гц с электротягой, двухпутная кодовая автоблокировка переменного тока и двухпутная кодовая автоблокировка переменного тока 25 и 50 Гц с электротягой.

Станции участка оснащены более чем десятью различными системами электрической централизации (ТР-66, МРЦ-9, МРЦ-13, МРЦ-16-78, МРЦ-17, ЭЦ-2, ЭЦ-4, ЭЦ-8, ЭЦ-9, ЭЦ-12-80, ЭЦ-К-2000, ЭЦИ). Некоторые типы централизаций, например ЭЦ-2, ЭЦ-4 и ЭЦ-8, исключают маневровую работу на станциях. Все станции оснащены электрически централизованными стрелками, светофорами и рельсовыми цепями переменного тока 25 Гц различных типов (фазочувствительные, импульсные и кодовые).

Практически на всем участке эксплуатируются морально и физически устаревшие системы СЦБ, срок службы которых составляет более 40–50 лет. Так, на ряде станций (Мурманск, Африканда, Полярные Зори, Пинозеро, Лопарская, Тайбола, Лапландия, Хибины, Белое Море) эксплуатируются устаревшие системы централизации ТР-66 и ЭЦ-2, построенные в 60-х годах прошлого столетия [6].

Данный анализ показывает, что, несмотря на необходимость модернизации и замены многих станционных и перегонных систем СЦБ, на участке обеспечиваются размеры движения на уровне 30–40 пар поездов в сутки. В случае возникновения потребности

в увеличении пропускной способности рекомендуется строительство дополнительных вторых путей (двухпутных вставок), а также замена действующих систем СЦБ.

2.2. Участок ст. Алакуртти — ст. Ручьи Карельские

Протяженность участка ст. Алакуртти — ст. Ручьи Карельские составляет 99 км. На данном участке расположено 3 станции, 8 недействующих пассажирских платформ и 5 недействующих остановочных пунктов. Участок неэлектрифицированный, однопутный на всей своей протяженности и является малодеятельным; не оборудован системами ДЦ и ДК. Переезды в пределах участка устройствами СЦБ не оснащены.

Текущие размеры движения составляют не более 1 пары поездов в сутки. Существующая инфраструктура СЦБ позволяет обеспечить пропускную способность в пределах 10 пар поездов в сутки. В период ночного времени пропуск поездов по участку не осуществляется. Пассажирское движение отсутствует, а незначительное грузовое движение обеспечивает доставку горючего (бензин и дизельное топливо) в село Алакуртти.

Для организации движения на участке ст. Алакуртти — ст. Ручьи Карельские применяется электрожелезная система. Для ограждения станций используются семафоры, управляемые при помощи гибких передач с поста централизации. На ст. Алакуртти и ст. Няозеро все стрелки переводятся вручную дежурными стрелочных постов, а правильность установки маршрутов определяется маршрутно-контрольными устройствами, установленными в постовом помещении станции. Рельсовые цепи на этих станциях отсутствуют. Так как ст. Ручьи Карельские находится на главном ходу, она оснащена стрелками, включенными в электрическую централизацию, рельсовыми цепями переменного тока 25 Гц, системой электрической централизации релейного типа ЭЦ-2, системой ДЦ «Нева» и системой АПК-ДК.

Перспективной возможностью, при стабилизации отношений со странами Северной Европы, является продление железнодорожной



Рис. 2. Входной семафор на станцию Войта (недействующая)



Рис. 3. Вид на станцию Алакуртти с восточной горловины

линии от ст. Алакуртти до ст. Салла (Финляндия). Ориентировочная протяженность участка составит 70–75 км. Текущее состояние устройств СЦБ участка ст. Алакуртти — ст. Ручьи Карельские можно охарактеризовать как неудовлетворительное (рис. 2, 3) [7]. На всех станциях эксплуатируются устаревшие системы СЦБ, построенные более 40 лет назад.

В случае появления грузового и пассажирского движения увеличение пропускной способности до уровня 20–30 пар поездов в сутки не представляется возможным при действующих устройствах СЦБ и состоянии железнодорожного пути. Потребуется значительные капитальные вложения в инфраструктуру СЦБ этого участка — в случае продления линии до ст. Салла.

2.3. Участок ст. Никель-Мурманский — ст. Кола

Протяженность участка ст. Никель-Мурманский — ст. Кола составляет 186 км. На данном участке расположено 9 станций, 3 блок-поста и 7 пассажирских платформ. Участок неэлектрифицированный, однопутный на всей протяженности и является малодейственным; частично оборудован системами ДЦ. Переезды в пределах участка частично оснащены устройствами СЦБ.

Текущие размеры движения на участке ст. Никель-Мурманский — ст. Заполярная составляют 0,8 пары поездов в сутки; на участке ст. Заполярная — ст. Кола — 1 пара поездов в сутки. Максимально возможная пропускная способность участка, при существующем состоянии

инфраструктуры СЦБ, может достигать 15–20 пар поездов в сутки. Осуществляется пассажирское и грузовое движение. Пропуск поездов по участку осуществляется круглосуточно.

Для интервального регулирования движения поездов на данном участке применяется система полуавтоматической блокировки.

На станциях Никель-Мурманский, Луостари, Пяйве и Мурмаши все стрелки переводятся вручную дежурными стрелочных постов, а правильность установки маршрутов определяется маршрутно-контрольными устройствами, установленными в постовых помещениях станций. Рельсовые цепи на этих станциях отсутствуют. На остальных станциях участка имеются электрически централизованные стрелки и релейные системы электрической централизации, включенные в ДЦ.

Перспективной возможностью, при стабилизации отношений со странами Северной Европы, является продление железнодорожной линии от станции Никель-Мурманский до ст. Киркенес (Норвегия). Ориентировочная протяженность данного участка составит 50–60 км. Текущее состояние устройств СЦБ участка ст. Никель-Мурманский — ст. Кола, можно охарактеризовать как неудовлетворительное. На большинстве станций эксплуатируются устаревшие системы СЦБ, построенные более 40 лет назад. Исключение могут составить лишь станции Титовка и Моккет, оснащенные системой электрической централизации контейнерного типа ЭЦ-К менее 15 лет назад. Увеличение пропускной способности до уровня 20–30 пар поездов в сутки не

представляется возможным при действующих устройствах СЦБ и состоянии железнодорожного пути. Потребуется значительные капитальные вложения в инфраструктуру СЦБ и железнодорожного пути этого участка — в случае строительства новой линии до ст. Киркенес.

3. Технические решения по модернизации инфраструктуры СЦБ на рассматриваемых приграничных участках

С целью модернизации инфраструктуры систем СЦБ, с одновременным сокращением эксплуатационных затрат на ее содержание для рассматриваемых приграничных участков авторами статьи предлагается использование системы микропроцессорной централизации с распределенной архитектурой управления [8], принципами координатного управления движением поездов и применением малолюдных технологий обслуживания устройств СЦБ.

В качестве примера была выбрана малодетальная линия ст. Заполярная — ст. Кола. Протяженность линии Заполярная — Кола составляет 160 км. На линии расположено 8 станций, 2 остановочных пункта и 8 пассажирских платформ. Линия однопутная, неэлектрифицированная.

На станциях Луостари, Пяйве и Мурмаши все стрелки переводятся вручную дежурными стрелочных постов, а правильность установки маршрутов определяется маршрутно-контрольными устройствами. Остальные станции участка оснащены релейными системами централизации и электрическими стрелками, включенными в централизацию. В качестве сигнальных устройств используются светофоры [9].

Кабельные линии межстанционной связи находятся в неудовлетворительном состоянии, так как эксплуатируются более 40 лет. Штат работников составляют сменные дежурные по станциям и дежурные стрелочных постов.

Суть технического решения заключается в следующем. В качестве опорной станции выбрана ст. Кола, где устанавливаются вычислительная аппаратура, два комплекта автоматизированных рабочих мест дежурного по станции и электромеханика, каналобразующая аппаратура волоконно-оптической линии передачи, цифровая радиоаппаратура, антенно-фидерное оборудование. На опорной станции устраивается пост мини-ДЦ и предусматривается 4 сменных дежурных по станции, для оперативного управления движением поездов и управления станционными объектами промежуточных станций всего участка.

На промежуточных станциях, оборудованных электрической централизацией, устанавливаются устройства сопряжения со станционными объектами управления и контроля (стрелки, освещение на станции и т. д.), каналобразующая аппаратура волоконно-оптической линии передачи, цифровая радиоаппаратура, антенно-фидерное оборудование. На станциях, оборудованных маршрутно-контрольными устройствами, на ручные стрелки дополнительно устанавливаются внешние электрические замыкатели или они блокируются в одном из крайних положений.

На промежуточных станциях (кроме ст. Кола) существующие системы СЦБ выключаются из эксплуатации и используются только в качестве резерва.

Техническая оснащенность линии Заполярная — Кола

Станция	Станционная система СЦБ	Год внедрения	Количество стрелок	Тип рельсовых цепей	Тип сигнальных устройств
Заполярная	ТР-66	1965	23	25 Гц	Светофоры
Луостари	МКУ	1967	12	—	Светофоры
Титовка	ЭЦ-К	2007	5	25 Гц	Светофоры
Моккет	ЭЦ-К	2008	6	25 Гц	Светофоры
Нял	ЭЦ-9	1980	11	25 Гц	Светофоры
Пяйве	МКУ	1967	15	—	Светофоры
Мурмаши	МКУ	1967	15	—	Светофоры
Кола	МРЦ-9	1978	59	25 Гц	Светофоры

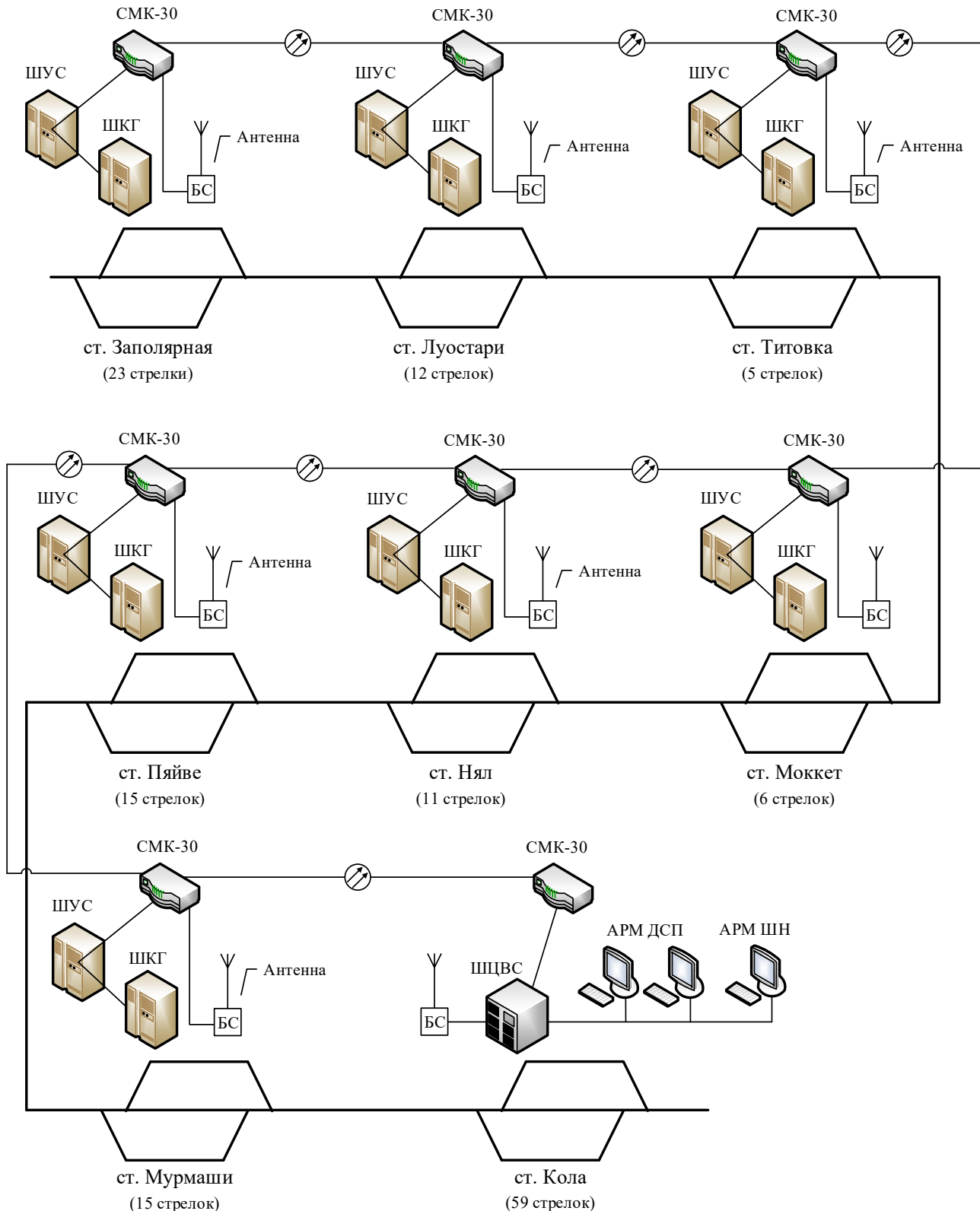


Рис. 4. Структурная схема предлагаемых технических решений

Каждый локомотив на участке оборудуется бортовым локомотивным компьютером, бортовой системой контроля целостности поездов, антенной и возимой цифровой радиостанцией.

Положительный технико-экономический эффект заключается в сокращении персонала, высвобождении производственных площадей и снижении эксплуатационных расходов на участке.

Расходная часть проекта заключается в потребности капитальных вложений в дооборудование станций и локомотивов аппаратурой СЦБ и радиосвязи, прокладке волоконно-оптической линии передачи, а также в дальнейшем содержании этих устройств.

Предлагаемые технические решения представлены в виде структурной схемы (рис. 4). На рисунке приняты следующие сокращения: ШЦВС — шкаф центральной вычислительной системы; ШУС — шкаф устройств сопряжения, в составе с контроллерами безопасного сопряжения с объектами; ШКГ — шкаф кроссовый грозозащитный; БС — цифровая базовая станция; СМК-30 — мультисервисный мультиплексор; АРМ ДСП, АРМ-ШН — автоматизированные рабочие места дежурного по станции и дежурного электромеханика.

Заключение

В результате проведенного анализа текущего состояния инфраструктуры СЦБ Мурманского региона Октябрьской железной дороги были получены следующие результаты.

1. На главном ходу ст. Лоухи — ст. Мурманск существующие системы СЦБ требуют модернизации или замены, главным образом на тех станциях, где эксплуатируются системы централизации устаревших типов ТР-66, ЭЦ-2, ЭЦ-4, МРЦ, срок службы которых превышает 40–50 лет. На многих станциях участка применяются фазочувствительные рельсовые цепи частотой 25 Гц. Как правило, данный вид аппаратуры имеет значительные потребляемые мощности, выводится из эксплуатации и не проектируется на вновь строящихся объектах. Несмотря на это, действующие системы СЦБ обеспечивают пропускную способность на уровне 30–40 пар поездов в сутки. Полная модернизация или замена систем СЦБ не обеспечат значительного увеличения пропускной способности. Для существенного увеличения пропускной способности потребуется строительство второго пути на участке ст. Кандалакша — ст. Мурманск и удлинение приемоотправочных путей на некоторых промежуточных станциях.

2. На участке ст. Алакуртти — ст. Ручьи Карельские эксплуатируются морально и

физически устаревшие ручные системы СЦБ, построенные более 40 лет назад. Эти системы не подлежат модернизации, и требуется их полная замена. Рекомендуется проведение полной реконструкции инфраструктуры СЦБ данного участка, включая строительство системы автоблокировки.

3. На участке ст. Никель-Мурманский — ст. Кола срок службы всех систем СЦБ имеет различные показатели. Только 22 % устройств имеют срок эксплуатации не более 20 лет, остальные системы СЦБ были построены более 40 лет назад. Стоит отметить важный аспект по станциям Титовка и Моккет, а именно наличие системы электрической централизации типа ЭЦ-К. Данная система применяется только на станциях с однопутными перегонами, что исключает строительство вторых путей на перегонах, или требует замены этого типа электрических централизаций. Рекомендуется проведение полной реконструкции инфраструктуры СЦБ данного участка, включая строительство системы автоблокировки.

4. Предлагаемые технические решения по модернизации инфраструктуры СЦБ на рассматриваемых приграничных участках могут упростить ее строительство и дальнейшую эксплуатацию, а также обеспечить гибкость при адаптации к возможным сезонным изменениям размеров движения поездов на участках. ▲

Библиографический список

1. Абрамова М. «Ленгипротранс» проектирует расширение подходов к Мурманскому порту / М. Абрамова // Гудок. — Вып. № 49 (26422) 27.03.2018. — URL: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1408727&archive=2018.03.27> (дата обращения: 23.12.2019).
2. Андерс Э. Системы автоматики и телемеханики на железных дорогах мира / Э. Андерс, А. А. Лыков, О. А. Наседкин и др. — М.: Интекст, 2010. — 496 с.
3. Переезд.ру. — URL: http://www.pereyezd.ru/readarticle.php?article_id=133 (дата обращения: 30.01.2019).
4. Отчет о НИР: КО2011 — Arctic Railway Infrastructure in Kolarctic (ARINKA II), в рамках программы приграничного сотрудничества Kolarctic CBC Programme 2014–2020, Санкт-Петербург, Грант 2019.
5. Kolarctic CBC 2014–2020. — URL: <https://kolarctic.info/kolarctic-2014-2020/> (дата обращения: 06.02.2020).
6. Определение потребности в усилении пропускной способности железнодорожных участков по устройствам электроснабжения и развитию устройств СЦБ и связи на подходах к портам Северо-Западного бассейна на период до 2025 года // Отчет о НИР / ПГУПС, Санкт-Петербург, 2017.

7. Сидоренко К. Ручьи Карельские — Алакуртти [1/5] / К. Сидоренко // LiveJournal. — URL: <https://kirsidor.livejournal.com/28058.html> (дата обращения: 06.02.2019).
8. 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.
9. Паспорта малодетальных железнодорожных линий Октябрьской железной дороги ОАО «РЖД». М., 2017.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 3, pp. 298–306
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-03-298-306

Analysis of the State Automation and Remote Control Systems Infrastructure in the Murmansk Region of the Oktyabrskaya Railway

Information about authors

Kushpil I. V., PhD in Engineering, Associate Professor¹. E-mail: i_kushpil@mail.ru
Moiseev V. V., Chief Engineer². E-mail: moiseev@crtc.spb.ru

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

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, “Computer Railway Technology Center”, Saint Petersburg

Abstract:

Given the prospects for the future development of interstate transportation in the Northwest region and the positive experience of operating the St. Petersburg — Helsinki line, the article conducts an analysis of the state automation and remote control systems on the main cross-border railway routes of the Oktyabrskaya Railway. The conducted analysis revealed that there are two most promising cross-border railway sections with direct access to the main railway line and the ports of the Barents and White Seas. From the Finnish side: the section from Alakurtti station to Ruchii Karelskiye station, which can potentially be extended to the nearest Finnish station, Salla (approximately 70–75 km). From the Norwegian side: the section from Nickel-Murmansk station to Kola station, with plans to extend it to the Norwegian station, Kirkenes (approximately 50–60 km). On these sections, there is a need for the modernization automation and remote control systems. Additionally, the article proposes a technical solution for the modernization of these systems, with simultaneous reduction in operational costs for their maintenance. The essence of the solution lies in the utilization of a microprocessor interlocking system with a distributed control architecture, the principles of coordinate train traffic management, and the application of minimally-manned maintenance technologies for automation and remote control systems devices.

Keywords: Oktyabrskaya Railway, Alakurtti, Nickel-Murmansk, Murmansk port, railway signalling system, automation and remote control, low-density railway lines, interstate transportation, Finland, Norway.

References

1. Abramova M. “Lengiprotrans” проектирует расширение подходов к Мурманскому порту [“Lengiprotrans” designs the expansion of approaches to the port of Murmansk]. *Gudok*, Iss. 49 (26422) 27.03.2018. Available at: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1408727&archive=2018.03.27> (accessed: December 23, 2019). (In Russian)
2. Anders E., Lykov A. A., Nasedkin O. A. et al. *Sistemy avtomatiki i telemekhaniki na zheleznykh dorogakh mira* [Systems of automation and telemechanics on the railways of the world]. Moscow: Intekst Publ., 2010, 496 p. (In Russian)
3. Pereezd.ru. Available at: http://www.pereezd.ru/readarticle.php?article_id=133 (accessed: January 30, 2019). (In Russian)
4. *Otchet o NIR: KO2011 — Arctic Railway Infrastructure in Kolarctic (ARINKA II), v ramkakh programmy prigranichnogo sotrudnichestva Kolarctic CBC Programme 2014–2020* [Research report: KO2011 — Arctic Railway Infrastructure in Kolarctic (ARINKA II), within the framework of the Kolarctic CBC Program 2014–2020]. St. Petersburg, Grant 2019. (In Russian)
5. Kolarctic CBC 2014–2020. Available at: <https://kolarctic.info/kolarctic-2014-2020/> (accessed: February 6, 2020).
6. *Opreделение potrebnosti v usilenii propusknoy sposobnosti zheleznodorozhnykh uchastkov po ustroystvam elektrosnabzheniya i razvitiu ustroystv STsB i svyazi na podkhodakh k portam Severo-Zapadnogo basseyna na period do 2025 goda* [Determining the need to increase the capacity of railway sections for power supply devices and the development of signaling and communication devices on the approaches to the ports of the North-Western basin for the period up to 2025]. *Otchet o NIR* [Report on research], St. Petersburg: PGUPS, 2017. (In Russian)
7. Сидоренко К. Ручьи Карельские — Алакуртти [1/5] [Karelian streams — Alakurtti [1/5]]. LiveJournal. Available at: <https://kirsidor.livejournal.com/28058.html> (accessed: February 6, 2019). (In Russian)
8. Никитин А. Б., Наседкин О. А., Лыков А. А. et al. Интеллектуальные функции управления в микропроцессорных системах централизации [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)
9. *Pasporta malodeyatel'nykh zheleznodorozhnykh liniy Oktyabr'skoy zheleznoy dorogi OAO “RZhD”* [Passports of low-density railway lines of the Oktyabrskaya Railway of Russian Railways]. Moscow, 2017. (In Russian)