



Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

АВТОМАТИКА НА ТРАНСПОРТЕ

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH

Том 8 декабрь 2022 № 4



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

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

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

Подписано в печать 21.11.2022. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 13. Уч.-изд. л. 10,8. Тираж 300 экз. Заказ .

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

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Никитин Александр Борисович	д-р техн. наук, профессор, 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
Бестемьянов Петр Филимонович	д-р техн. наук, профессор, РУТ (МИИТ), Москва
Бушуев Сергей Валентинович	канд. техн. наук, доцент, УрГУПС, Екатеринбург
Василенко Михаил Николаевич	д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург
Долгий Игорь Давидович	д-р техн. наук, профессор, РГУПС, Ростов-на-Дону
Ефанов Дмитрий Викторович	д-р техн. наук, доцент, РУТ (МИИТ), Москва
Кокурин Иосиф Михайлович	д-р техн. наук, профессор, ИПТ РАН, Санкт-Петербург
Марков Дмитрий Спиридонович	канд. техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург
Наседкин Олег Андреевич	канд. техн. наук, доцент, ПГУПС, Санкт-Петербург
Никищенков Сергей Алексеевич	д-р техн. наук, профессор, СамГУПС, Самара
Пыркин Антон Александрович	д-р техн. наук, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург
Розенберг Ефим Наумович	д-р техн. наук, профессор, НИИАС, Москва
Сухих Николай Николаевич	д-р техн. наук, профессор, ГУГА, Санкт-Петербург
Шаманов Виктор Иннокентьевич	д-р техн. наук, профессор, РУТ (МИИТ), Москва
Ходаковский Валентин Аветикович	д-р техн. наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург

INTERNATIONAL EDITORIAL COUNCIL

Valery Sapozhnikov	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

Alexander B. Nikitin	D. Sc., 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
Peter F. Bestemiyarov	D. Sc., Professor, Russian University of Transport, Moscow
Sergey V. Bushuev	Ph. D., Associate Professor, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg
Michael N. Vasilenko	D. Sc., 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., Associate Professor, Russian University of Transport, Moscow
Iosif M. Kokurin	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
Oleg A. Nasedkin	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
Anton A. Pyrkin	D. Sc., Professor, ITMO University, St. Petersburg
Efim N. Rozenberg	D. Sc., Professor, Scientific Research Institute of Automation and Communication, Moscow
Nikolay N. Suhih	D. Sc., Professor, St. Petersburg State University of Civil Aviation, St. Petersburg
Victor I. Shamanov	D. Sc., Professor, Russian University of Transport, Moscow
Valentin A. Khodakovsky	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>Бушуев С. В.</i> Пути повышения провозной способности участков железных дорог343 <i>Яшин М. Г., Пантелеев Р. А., Кушпиль И. В., Фомин Н. Н.</i> Моделирование работы инфраструктуры железнодорожного транспорта в условиях чрезвычайных ситуаций с учетом применения инвентарных комплектов354
Издатель ООО «Издательский Центр «РИОР» по договору № ЭА009636 от 12.01.2022	<i>Воробьев И. М., Новичихин А. В., Ковалев К. Е.</i> Конструктор формирования услуг доставки грузов железнодорожным транспортом на сети ОАО «РЖД»367
Главный редактор Вал. В. Сапожников, д-р техн. наук, профессор, академик Академии транспорта РФ и Международной академии наук высшей школы, заслуженный деятель науки РФ	СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ <i>Баранов Л. А., Бестемьянов П. Ф., Балакина Е. П., Пудовиков О. Е.</i> Принципы построения и модели системы автоматического управления вторым локомотивом при виртуальной сцепке377 <i>Чернышев Д. В.</i> Система управления электроприводом крана платформенного типа на основе регулятора с нечеткой логикой.....389
Редакция журнала Научный редактор — И. В. Кушпиль, канд. техн. наук Перевод — Д. В. Дементьева Литературный редактор и корректор — Н. В. Юдина Верстка — И. Г. Иваньшина	ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЕПРИГОДНЫЕ СИСТЕМЫ <i>Ефанов Д. В., Пивоваров Д. В., Леоненко О. В.</i> Метод синтеза самопроверяемых устройств с контролем вычислений по двум диагностическим параметрам с предварительным сжатием сигналов от объекта диагностирования399
Адрес учредителя 190031, РФ, Санкт-Петербург, Московский пр., 9, кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Телефон: +7(812)457-85-79 E-mail: at.pgups@gmail.com; ait.automatika@yandex.ru Сайт: www.atjournal.ru	<i>Сперанский Д. В.</i> Поиск оптимальных путей в нечетких графах418
Адрес издателя 127214, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1, оф. 402	ИЗ ИСТОРИИ АВТОМАТИКИ <i>Власенко С. В., Орунбеков М. Б.</i> Право- и левостороннее движение на железных дорогах мира: история и будущее.....427
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, 2022	

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>Bushuev S. V.</i> Ways to Rise Carrying Capacity of Railway Sections.....343 <i>Yashin M. G., Panteleev R. A., Kushpil I. V., Fomin N. N.</i> Modelling of Railway Transport Infrastructure Operation in Emergency Situations Given Application of Inventory Kits354
PUBLISHER "Publishing Center "RIOR", LLC № ЭА009636, 12.01.2022	<i>Vorobiev I. M., Novichikhin A. V., Kovalev K. E.</i> Constructor to Form Services of Railway Freight on Russian Railway Ltd Network.....367
EDITOR-IN-CHIEF Valeriy V. Sapozhnikov, D. Sc., Professor, Member of Academy of Transport of Russia and International Higher Education Academy of Sciences, Honored Science Worker of Russia	TRANSPORT CONTROL SYSTEMS <i>Baranov L. A., Bestemyanov P. F., Balakina E. P., Pudovikov O. E.</i> Design Principles and Models of Automatic Control System for Second Locomotive at Virtual Assessment377
JOURNAL STAFF Science editor: Igor V. Kushpil, Ph. D. English translation: Daria V. Dementieva, Ph. D. Editing and proofreading: Nadezhda V. Yudina Layout: Irina G. Ivanshina	<i>Chernyshev D. V.</i> Control System of Crane Electric Drive of Platform Type on the Basis of Controller with Fuzzy Logic389
FOUNDER'S ADDRESS 190031, Russia, St. Petersburg, Moskovskiy ave., 9, «Automation and Remote control on Railways» department +7(812) 457-85-79 at.pgups@gmail.com; ait.automatika@yandex.ru www.atjournal.ru	TECHNICAL DIAGNOSTICS AND CONTROLLABLE SYSTEMS <i>Efanov D. V., Pivovarov D. V., Leonenko O. V.</i> Synthesis Method of Self-Checking Devices with Calculation Control by Two Diagnostic Parameters with Preliminary Compression of Signals from the Object of Diagnosis.....399 <i>Speranskiy D. V.</i> About Search of Optimal Paths in Fuzzy Graphs418
PUBLISHER'S ADDRESS 127214, Russia, Moscow, Polyarnaya str., 31Bc1, of. 402	FROM THE HISTORY OF AUTOMATION
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, 2022	<i>Vlasenko S. V., Orunbekov M. B.</i> Right- and Left-Hand Traffic on the World Railways: History and Future427

УДК 656.222.6

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОВОЗНОЙ СПОСОБНОСТИ УЧАСТКОВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

БУШУЕВ Сергей Валентинович, канд. техн. наук, проректор по научной работе, доцент кафедры;
e-mail: SBushuev@usurt.ru

Уральский государственный университет путей сообщения, кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железных дорогах», Екатеринбург

В статье рассмотрены три направления повышения провозной (пропускной) способности: увеличение длины поезда, скорости движения и снижение интервала между поездами. На основе статистических данных определены достигнутые показатели в этих направлениях и потенциал их роста. Установлена зависимость провозной (пропускной) способности участка железной дороги от исследуемых параметров. Предложен способ группового автоведения поездов как развитие применяемой технологии виртуальной сцепки. Представлены возможности и условия сокращения межпоездного интервала в зависимости от применяемой системы интервального регулирования и расширения ее возможностей за счет группового автоведения. Построены зависимости, демонстрирующие повышение провозной способности за счет интервального регулирования и увеличения длины поезда. Определен потенциал роста провозной способности за счет применения группового автоведения.

Ключевые слова: провозная и пропускная способность железных дорог; межпоездной интервал; системы интервального регулирования; виртуальная сцепка; групповое автоведение поездов; унифицированные, тяжеловесные и длинносоставные поезда; скорость движения поездов.

DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-343-353

▼ Введение

Конечная цель транспорта — перевозка грузов и пассажиров, поэтому провозная способность как комплексный показатель лучше отражает возможности участков железных дорог, чем пропускная способность. Однако анализ путей повышения провозной способности затруднен обилием влияющих факторов [1–3]. Так, средний вес поезда может увеличиваться при увеличении нагрузки на ось или за счет увеличения длины поезда и даже за счет снижения порожнего пробега. С другой стороны, можно повысить провозную способность за счет пропускной способности — увеличивая участковую скорость, снижая расстояния (интервал) между поездами, а также повышая надежность работы устройств или совершенствуя технологии обслуживания и ремонта (уменьшая время технологических перерывов в движении). Увеличение участковой скорости связано с технологией организации движения и развитием инфраструктуры, а также с технической скоростью движения. Нельзя не принимать во внимание наличие связи между массой поезда и его технической скоростью [4] или

между длиной поезда и межпоездным интервалом и т. п.

Рассмотрим пути повышения провозной способности по нескольким факторам, на которые можно влиять с помощью систем автоматики на поле или на борту локомотива, а также для сравнения один из наиболее популярных методов — увеличение массы поезда за счет увеличения длины состава (тяжеловесное движение или вождение соединенных поездов) [3, 5]. Далее будем рассматривать двухпутный участок, так как на нем влияние систем автоматики на провозную способность ярче выражено.

1. Развитие автоматики на локомотиве и систем интервального регулирования

В последнее десятилетие уровень автоматизации локомотива и развития радиосвязи достиг критически важного уровня [6, 7], который позволил начать массовое внедрение автоведения и технологии движения в виртуальной сцепке [8]. С 2018 года на Восточном полигоне предполагается движение двух поездов в виртуальной сцепке [9], а с 2020 года начались эксперименты по автоведению нескольких поездов в виртуальной сцепке [10]. В настоящее

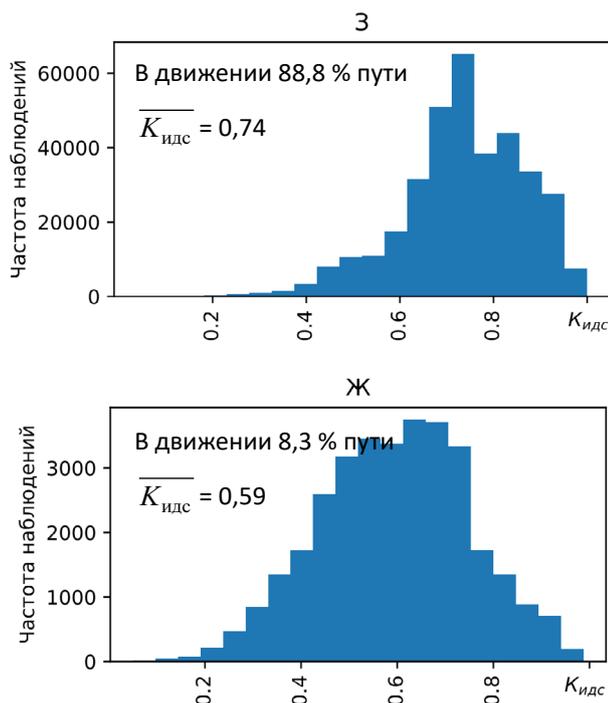


Рис. 1. Коэффициент использования разрешенной скорости на участке:
З — количество случаев движения на зеленое показание локомотивного светофора;
Ж — количество случаев движения на желтое показание локомотивного светофора

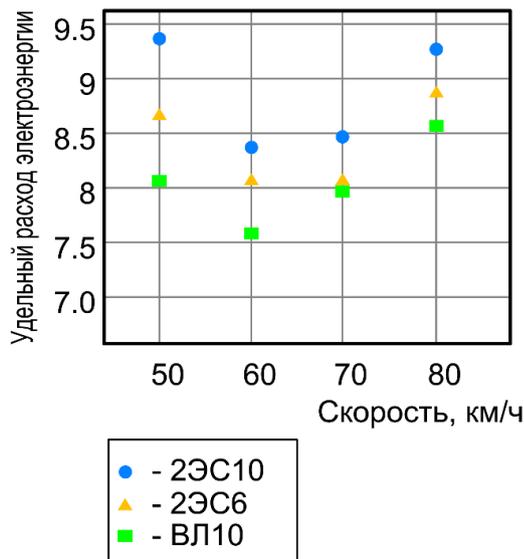


Рис. 2. Удельный расход энергии локомотивами (по результатам тяговых расчетов в программе КОРТЭС на одном из участков железной дороги), Вт·ч/т·км

время движение поездов осуществляется на расстоянии 6–8 км, соответствующем трехблочному разграничению на участках, оборудованных трехзначной автоблокировкой. При

этом использование технологии виртуальной сцепки дает увеличение провозной способности на 10–12 % [11–13].

Теоретически, при ведении поезда в ручном режиме, можно было бы проехать с тем же интервалом (6–8 км), однако в силу психологических причин при недостатке информации о ходе впередиидущего поезда фактически пакет поездов растягивается.

На рис. 1 приведена статистика коэффициента использования допустимой скорости движения поезда по данным регистратора локомотива. Под коэффициентом использования допустимой скорости ($K_{идс}$) в данном случае понимается отношение фактической скорости к допустимой (программной скорости САУТ¹). Данные получены путем обработки записей 100 поездов грузовых поездов на высокозагруженных участках Свердловской железной дороги. С целью исключения влияния переходных процессов при разгоне и торможении измерение $K_{идс}$ проводилось каждые 100 м и в статистике учитывалось только в том случае, если скорость на этом 100-метровом участке была постоянной.

Из приведенных данных (см. рис. 1) видно, что при преимущественной разрешенной скорости, например 80 км/ч, в среднем ходовая скорость грузовых поездов — 59,2 км/ч, что неизбежно приводит к необоснованному снижению технической скорости и потере пропускной/провозной способности участка. Корреляция участковой и технической скорости многократно доказана разными авторами [14, 15], однако машинисты объясняют нежелание ехать с большей скоростью опасением, что «все равно придется останавливаться из-за нагона впередиидущего поезда или неготовности станции к приему, энергии сожжешь больше, а пользы не будет».

Более вероятной причиной все же является система стимулирования машинистов за экономию энергии. На рис. 2 представлены результаты расчетов удельного расхода электроэнергии на

¹ САУТ — система автоматического управления торможением поездов, которая в зависимости от заданного маршрута (показания светофора), тормозных свойств и ординаты поезда рассчитывает максимально допустимую (программную) скорость для безопасного движения в каждый момент времени.

Сравнение интервалов разграничения между поездами

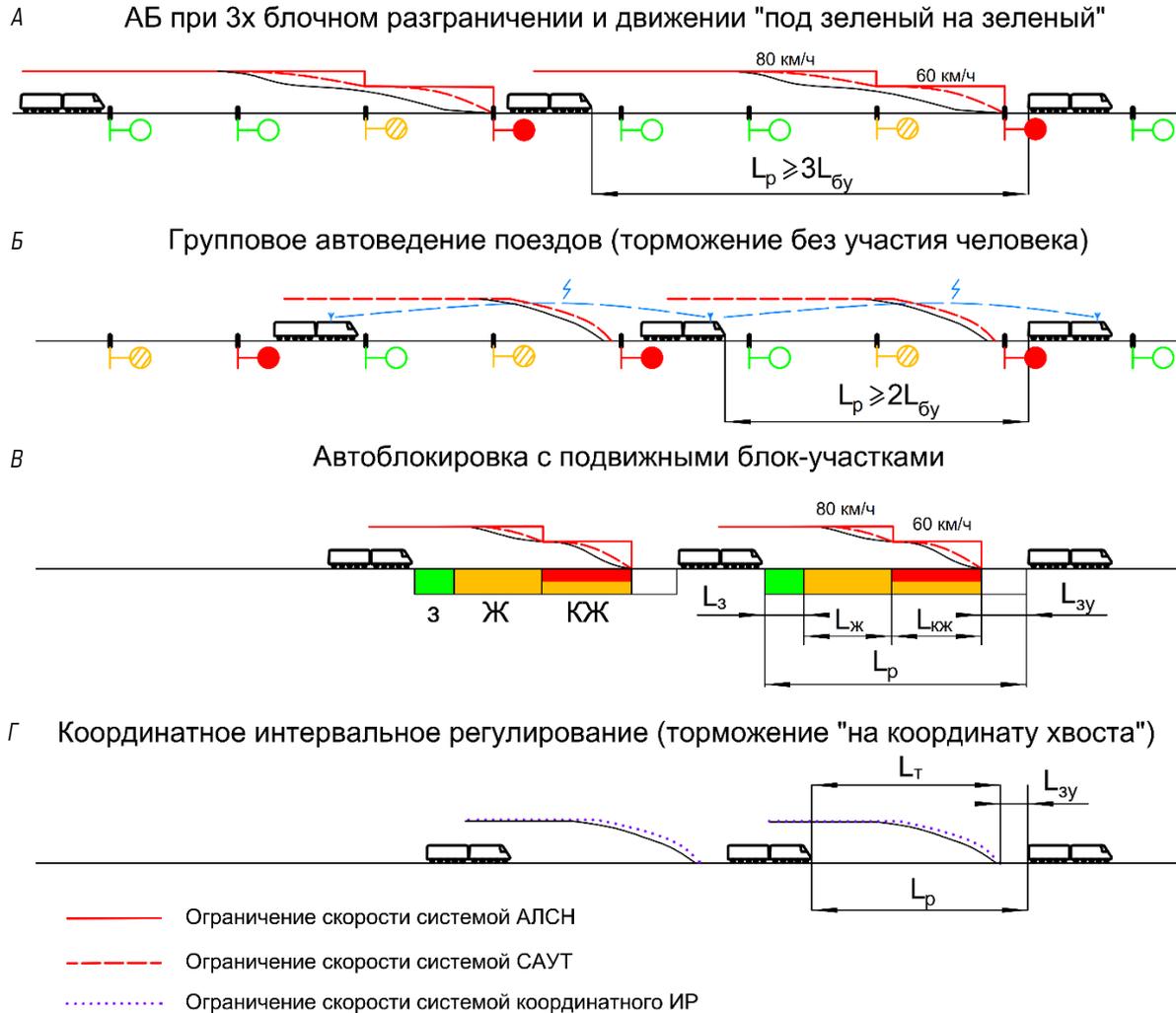


Рис. 3. Разграничивающее поезда расстояние L_p при разных СИР:
 $L_{бу}$ — длина блок-участка автоблокировки; $L_з, L_ж, L_{кж}$ — длина участка, кодируемого кодами З, Ж или КЖ соответственно; $L_т$ — длина тормозного пути; $L_{зy}$ — длина защитного участка

тягу поездов в программе КОРТЭС² в зависимости от заданного ограничения скорости движения на участке при прочих равных условиях, откуда видно, что минимум удельного расхода приходится на скорость движения 60 км/ч, а при увеличении скорости до 80 км/ч удельный расход увеличивается на 11 %. Поэтому одной из задач исследования становится обоснование целесообразности повышения скорости с точки зрения провозной способности при заданных свойствах локомотивов.

² КОРТЭС — программный комплекс для тяговых и электрических расчетов, разработанный ВНИИЖТ.

Совершенствование систем автоматики расширяет возможности по снижению интервала между поездами [16], что приводит к увеличению пропускной способности, например системы автоблокировки с «плавающим» блок-участком [17] или координатные системы интервального регулирования (СИР) с использованием радио-блок центра и цифровой радиосвязи [18].

Однако в этом исследовании предлагается сконцентрировать внимание на «нетрадиционный», но доступный уже сейчас вариант уменьшения межпоездного интервала — применение технологии виртуальной сцепки на

участках с классической автоблокировкой. В ближайшее время развитие виртуальной сцепки приведет к последовательному переходу от вождения двух поездов к вождению группы поездов с дальнейшей трансформацией алгоритмов виртуальной сцепки в алгоритмы группового автоведения поездов, которые будут оптимизировать расстояние между последовательно движущимися поездами с целью максимального использования всех возможностей пропускной способности участка.

На рис. 3, *А* представлены интервалы движения на участке, оборудованном трехзначной автоблокировкой при «классическом» трехблочном разграничении. Изначально применяемая автоблокировка была спроектирована, чтобы обеспечить:

- безопасный интервал между поездами, поэтому длина блок-участка выбирается не менее длины тормозного пути при максимальной возможной скорости движения;

- межпоездной интервал 6–8 мин. при трехблочном разграничении.

Фактически в ручном режиме ведения поезда на грузонапряженных участках удается обеспечить средний интервал между поездами 8–10 мин. Кроме указанной выше причины (движение со сниженной скоростью), влияет также преждевременное снижение скорости машинистами при проблеске желтого огня и ограничение скорости проследования желтого сигнала 60 км/ч, установленное еще на заре внедрения автоблокировки с целью повышения безопасности движения.

В современных условиях, когда все поезда оборудованы системой САУТ, обеспечивающей автоматическое прицельное торможение перед запрещающим показанием, есть возможность по снятию ограничения 60 км/ч при проследовании желтого сигнала без снижения безопасности движения, для массового использования нужны только изменения в нормативной базе. Самый важный шаг в этом направлении уже сделан: в новых Правилах технической эксплуатации поездов, оборудованных устройствами безопасности, обеспечивающими контроль допустимой скорости движения, разрешается проследование светофора с одним желтым (немигающим) огнем со скоростью, определяемой устройством

безопасности, но не более 80 км/ч. Это обстоятельство совместно с применением технологии виртуальной сцепки (согласование скоростей последовательно движущихся поездов с использованием радиоканала) обеспечивает новые возможности — движение с установленной скоростью при двухблочном разграничении (рис. 3, *Б*). В этом случае реально можно снизить интервал между поездами в пакете до 3–5 мин. (без учета ограничений со стороны энергоснабжения на электрифицированных участках и станций, требующих изменения скорости движения поездов, движущихся в виртуальной сцепке). Этот эффект достигается как за счет сокращения разграничивающего расстояния между поездами до двух блок-участков автоблокировки, так и за счет повышения скорости движения при автоведении из-за исключения субъективных факторов при выборе скорости движения.

Для сравнения также рассмотрим автоматическую блокировку с подвижным блок-участком (рис. 3, *В*) и координатную СИР (рис. 3, *Г*). Для координатной системы необходимо учитывать длину тормозного пути при наихудших условиях и длину защитного участка не менее точности прицельного торможения этой системы. А вот сложность сравнения с автоматической блокировкой с подвижным блок-участком определяется разнообразием возможных проектных решений по выбору длин рельсовой цепи (РЦ) и количеством РЦ, кодируемых одним кодом. В любом случае одновременно должны обеспечиваться следующие условия:

- длина защитного участка — не менее длины полного служебного торможения с 60 до 0 км/ч;

- длина участка, кодируемого кодом КЖ, — не менее длины полного служебного торможения с максимальной разрешенной скорости на участке до нуля;

- длина участка, кодируемого кодом Ж, — не менее расстояния, необходимого для снижения скорости, с максимальной до 60 км/ч.

Например, при интенсивном пригородном движении РЦ могут быть менее 200 м, но для нашей задачи, сравнения провозной способности участков, целесообразно рассматривать длину РЦ, кратную тормозному пути грузового

поезда при нормативном тормозном коэффициенте (0,33) и наибольшем уклоне исследуемого участка (–8 ‰), при заданной максимальной разрешенной скорости (80 км/ч). В табл. 1 приведены длины тормозных путей из Приложения 6 Правил технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами подвижного состава, на основании которых для моделирования автоблокировки с плавающим блок-участком приемлем длину рельсовой цепи равной 600 м.

Тогда количество РЦ для расчетов разграничивающего расстояния будет:

- кодируемых кодом З, кодом Ж и не кодируемых (защитный блок-участок) — по одной;
- кодируемых кодом КЖ — две.

2. Модель оценки влияния разграничивающих интервалов СИР, скорости и длины поезда на провозную способность участка

Преобразуем известную формулу провозной способности (1) так, чтобы выделить рассматриваемые переменные факторы: скорость, длину поезда и разграничивающий интервал системы интервального регулирования.

$$\Gamma = QN_{гр}, \tag{1}$$

где Γ — суточная провозная способность участка;
 Q — средний вес поезда нетто;
 $N_{гр}$ — количество грузовых поездов.

$$Q = N_{в} M_{в} = \frac{L_{п}}{l_{в}} M_{в}, \tag{2}$$

где $N_{в}$ — среднее число вагонов в поезде;
 $L_{п}$ — длина поезда;
 $l_{в}$ — средняя длина вагона;
 $M_{в}$ — средняя масса груза в вагоне.

Для анализа качественных зависимостей будем рассматривать участок с грузовым движением при параллельном графике движения, тогда можно заменить количество грузовых поездов на пропускную способность участка:

$$N_{гр} = n = \frac{(1440 - t_{тех}) \alpha_n}{I_{ир}} = \frac{T_{дв}}{I_{ир}}, \tag{3}$$

Таблица 1. Тормозной путь грузового поезда

	Тормозной путь, м	
	Уклон 0	Уклон –8 ‰
Тормозной путь с 80 до 60 км/ч	371	487
Тормозной путь с 80 до 0 км/ч	833	1067
Тормозной путь с 60 до 0 км/ч	462	580

где $t_{тех}$ — время технологических окон
 α_n — коэффициент, учитывающий роль надежности устройств в снижении пропускной способности;
 $T_{дв}$ — время в минутах, в течение которого возможно движение;
 $I_{ир}$ — интервал автоблокировки или другой СИР в минутах.

Выразим интервал СИР через длину поезда $L_{п}$, расстояние, разделяющее поезда $L_{р}$ и скорость движения V :

$$I_{ир} = \frac{L_{п} + L_{р}}{V}. \tag{4}$$

Подставим формулы 2–4 в (1) и заменим величины, значения которых будем считать неизменными ($M_{в}$, $l_{в}$, $T_{дв}$) в дальнейшем исследовании нормирующим коэффициентом K :

$$\Gamma = \frac{VL_{п}}{L_{п} + L_{р}} K. \tag{5}$$

Следует также сформулировать и другие допущения при анализе провозной способности:

- ограничений со стороны энергоснабжения нет, что может быть обеспечено автономной тягой или усилением электроснабжения;
- известным статистическим фактом снижения участковой скорости при увеличении массы/длины поезда пренебрегаем. Это значит, что мощности локомотивов достаточно, чтобы с поездом заданной массы преодолевать участок без снижения скорости на подъемах, что также возможно при правильном выборе локомотива.

Выражение (5) удобнее анализировать в относительных единицах Γ/Γ_0 , поэтому примем за базу провозную способность Γ_0 для трехзначной автоблокировки с трехблочным разграничением и средней длиной блок-участка 1800

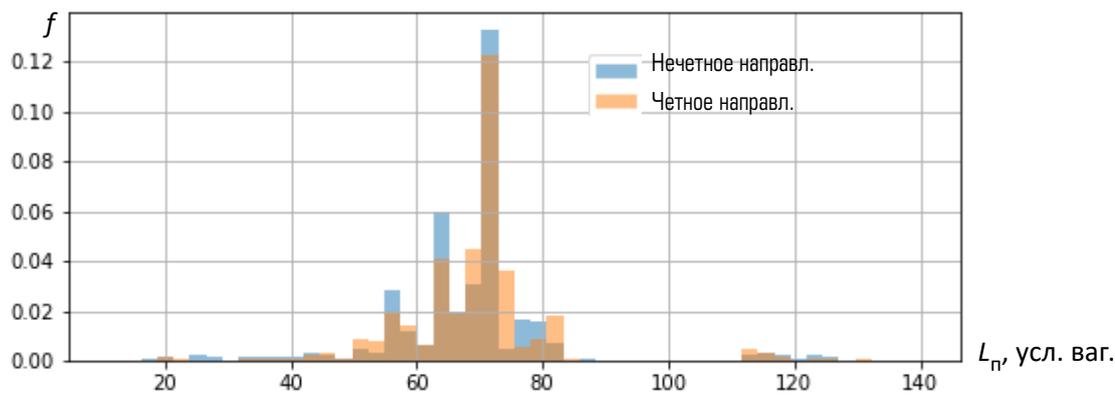


Рис. 4. Плотность распределения длин поездов в условных вагонах на исследуемом участке

м, длину поезда 71 условный вагон. Скорость при определении Γ_0 будем выбирать в зависимости от анализируемого фактора.

Далее на графиках будем отображать:

$$\frac{\Gamma}{\Gamma_0} = \frac{VL_n}{L_n + L_p} \frac{K}{\Gamma_0}, \quad (6)$$

3. Влияние скорости движения на провозную способность участка

С учетом выражения (6) увеличение скорости движения ведет к пропорциональному увеличению провозной способности

$$\frac{\Gamma}{\Gamma_0} = \frac{K_{гв}V}{V_0}, \quad (7)$$

где $K_{гв}$ — коэффициент пропорциональности.

Если принять в качестве V_0 среднестатистическую скорость на участках с равномерным движением (рис. 1, 3) 60 км/ч, то при условии достаточной пропускной способности станций на участке можно сделать вывод, что потенциал роста провозной способности в этом случае до 33 % за счет внедрения автоведения, исключая человеческого фактора и обеспечивающего максимальную разрешенную скорость движения на большей части пути. При этом расход энергии вырастет на 12 %, поэтому повышение скорости движения в режиме автоведения до 80 км/ч будет выгодно.

4. Влияние длины поезда на провозную способность участка

На рис. 4 приведена статистика плотности распределения длин поездов на грузонапряжен-

ном участке. Выделяются несколько характерных интервалов длин грузовых поездов в условных вагонах: 50–84, 90–95 (тяжеловесные 8–9 тыс. т) и 110–140 (соединенные).

Влияние длины поезда при трехзначной автоблокировке с трехблочным разграничением согласно выражению (6) представлено на рис. 5, где для наглядности выделены интервалы реальных длин поездов, а также приведена кривая для ситуации двухблочного разграничения при групповом автоведении. В среднем прирост пропускной способности при увеличении длины поезда на 1 условный вагон составляет около 1 %, при этом эффект падает с ростом длины состава.

Фактически при существующей инфраструктуре на сети железных дорог удлинение поездов требует значительных капитальных вложений и лишь отчасти обеспечивается за счет изменения технологии пропуска поездов (увеличения доли тяжеловесных и длинносоставных поездов), что приводит и к увеличению средней длины состава на участке. На рассмотренном участке замена одного грузового поезда установленной длины на соединенный приводит к увеличению средней длины состава на 0,8 условного вагона, а на тяжеловесный — на 0,4, откуда можно сделать вывод, что потенциал роста провозной способности за счет удлинения состава ограничен 10 %, и даже это может потребовать значительных вложений в инфраструктуру.

Рис. 5 демонстрирует качественные возможности повышения провозной способности путем увеличения длины поезда при допущении о постоянной массе груженого вагона,

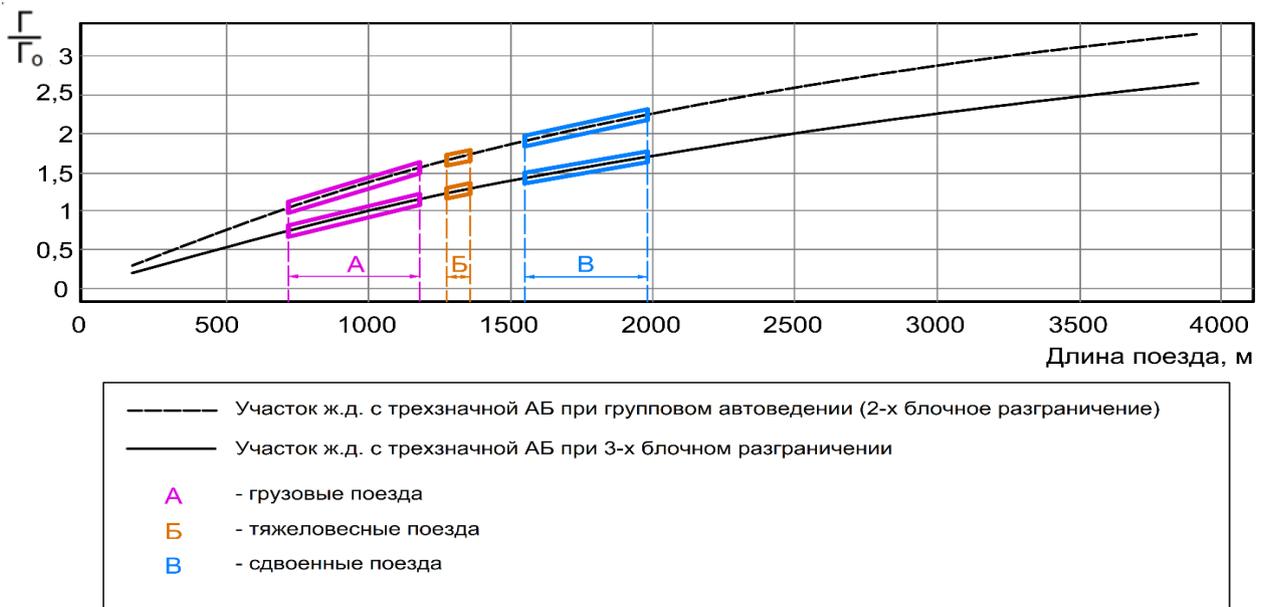


Рис. 5. Относительное изменение провозной способности от длины поезда

что накладывает ограничения на применение представленных результатов для объективной оценки и требует более точных расчетов в каждом конкретном случае.

5. Влияние интервального регулирования на провозную способность участка

В зависимости от СИР минимальное расстояние между поездами в потоке меняется. Это изменяет пропускную способность, что при прочих равных условиях пропорционально меняет провозную способность. Самый большой интервал между поездами из рассматриваемых вариантов для трехзначной автоблокировки с защитными блок-участками обеспечивает наименьшую пропускную (провозную) способность, самый маленький интервал для координатной СИР — наибольшую.

Особенность работы СИР в том, что при сближении поездов меньше интервала разграничения, скорость движения поезда начинает снижаться с целью обеспечения безопасности движения вплоть до 0, что снижает пропускную (провозную) способность участка. Наступает эффект перенасыщения поездами участка с падением пропускной способности [14].

Для построения зависимости изменения провозной способности по формуле (6), как

функции разграничивающего расстояния системы интервального регулирования, необходимо определить скорость, как функцию интервала между поездами при принятой СИР (рис. 6). Поскольку моделирование ведется для непрерывного потока поездов, то все кривые скорости рассматриваются для наихудшего случая расстановки поездов на участке.

Установленная скорость движения во всех случаях взята 80 км/ч. В случае перенасыщения участка поездами при моделировании выбирается скорость в соответствии с требованиями СИР по безопасному снижению скорости:

- для классической трехзначной автоблокировки и автоблокировки с защитными блок-участками тормозное усилие и точка начала торможения выбираются такими, чтобы обеспечить прицельное торможение за 100 метров до красного сигнала, но при этом выполнить требование ПТЭ — проследовать желтое показание с максимально возможной скоростью 60 км/ч и за 500 м до красного сигнала снизить скорость до 20 км/ч. Длина защитного участка выбрана минимальной для заданных условий движения ($L_{3y} = 600$ м), хотя проектом может быть установлена больше, что приведет к еще большему снижению пропускной способности;
- для движения с использованием группового автоведения (виртуальной сцепки)

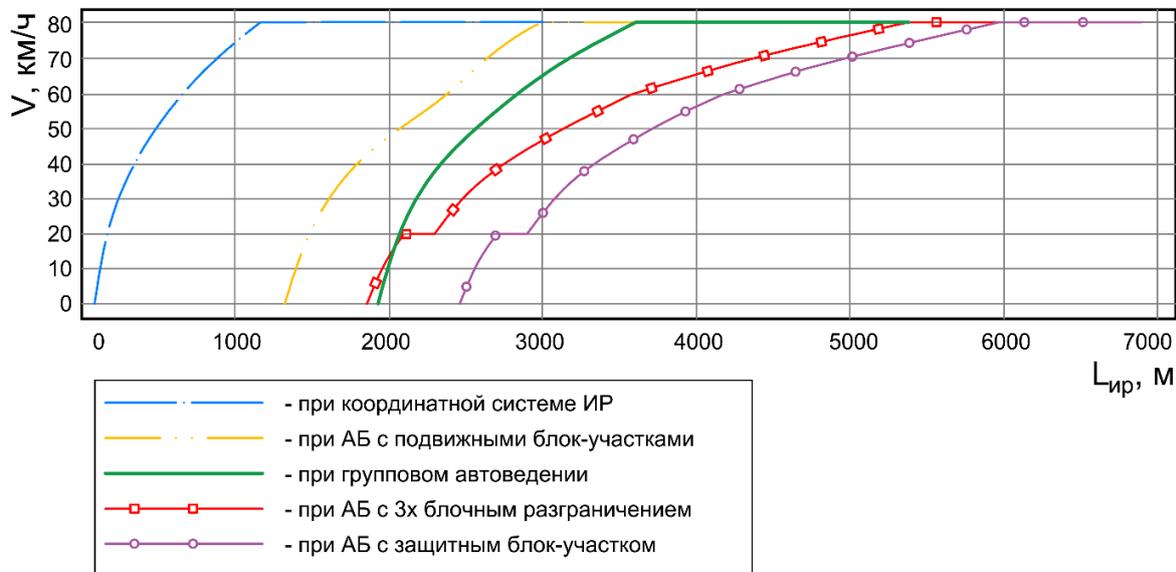


Рис. 6. Скорости потока поездов при заданном разграничивающем расстоянии

принято, что разрешено проследование желтого сигнала с установленной максимальной скоростью 80 км/ч, а тормозное усилие выбирается для обеспечения прицельного торможения в режиме автоведения на одном блок-участке с остановкой за 150 м до красного сигнала (для обеспечения безопасного движения под кривой дублирующей системы управления тормозами САУТ);

– для автоблокировки с плавающим блок-участком в соответствии с обоснованием, представленным выше, приняты следующие расстояния: $L_3 = L_{ж} = L_{3у} = 600 \text{ м}$, $L_{кж} = 1200 \text{ м}$. Снижение скорости при насыщении поездами участка будет начинаться, как только расстояние между поездами снизится менее разграничивающего, за счет эффекта проблеска желтого показания. Поэтому скорость при моделировании будет выбираться по кривой прицельного снижения скорости на границу РЦ, кодируемой кодом Ж. В случае уменьшения разграничивающего интервала менее участка, кодируемого кодом КЖ, выбирается скорость, обеспечивающая прицельное торможение за 100 м до начала защитного участка;

– для координатной СИР принято регулирование на хвост впередиидущего поезда полным служебным торможением плюс защитный участок 100 м.

На рис. 7 виден относительный эффект увеличения провозной способности за счет применения более совершенных систем интервального регулирования. За единицу принят вариант Γ_0 при трехзначной автоблокировке с трехблочным разграничением и длиной блок-участка 1800 м при движении с установленной скоростью 80 км/ч. Чем меньше интервал СИР, тем больше пропускная способность, но и тем круче идет падение пропускной способности при перенасыщении участка и тем чувствительнее становится система к отказам технических средств.

Из рис. 7 следует также, что потенциал увеличения провозной способности технологии группового автоведения с двухблочным разграничением трехзначной автоблокировкой равен 35 %. Это, конечно, значительно меньше, чем у координатной СИР или автоблокировки с плавающим блок-участком, но все же достаточно, чтобы оперативно решить проблему повышения провозной способности в некоторых случаях (например, при восстановлении движения после отказов или капитальных ремонтах).

Заключение

В статье рассмотрен потенциал повышения провозной способности в сложившихся условиях эксплуатации: за счет увеличения скорости, длины поезда и сокращения интервала между поездами.

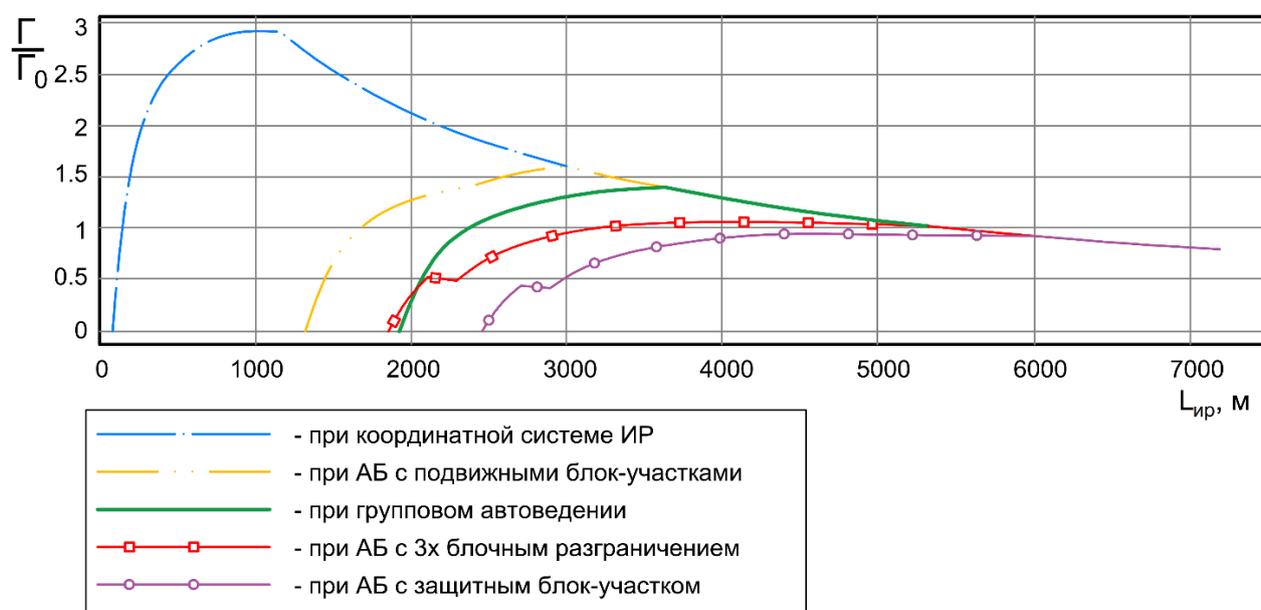


Рис. 7. Изменение провозной (пропускной) способности в зависимости от разграничивающего расстояния между поездами в потоке с учетом ограничения скорости при насыщении участка

Самый большой потенциал роста пропускной и, как следствие, провозной способностей обеспечивает переход на системы интервального регулирования с плавающим блок-участком или координатным способом регулирования.

Предложен способ организации движения на основе группового автоведения как развития уже применяемой технологии виртуальной сцепки. При этом показано, что разрешение проследования желтого сигнального показания в режиме автоведения с установленной максимальной скоростью движения на участке (80 км/ч) при наличии системы прицельного торможения (САУТ, БЛОК) позволяет перейти на движение с двухблочным разграничением по трехзначной автоблокировке.

Путем моделирования установлено, что групповое автоведение обладает потенциалом увеличения пропускной способности за счет снижения разграничивающего расстояния на 35 % и за счет повышения технической скорости еще на 33 %. Таким образом, внедрение технологии группового автоведения реально позволит повысить пропускную/провозную способность на 50–80 %.

Исследования выполнены при поддержке ОАО «РЖД»: грант на развитие научно-педагогических

школ в области железнодорожного транспорта 2022–2023 гг. ▲

Библиографический список

1. Левин Д. Ю. Теория оперативного управления перевозочным процессом: монография / Д. Ю. Левин. — М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2008. — 625 с.
2. Сотников Е. А. Изменения пропускной и провозной способностей высокозагруженных направлений при организации движения соединенных поездов на постоянной основе / Е. А. Сотников, П. С. Холодняк // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 2019. — Т. 78. — № 5. — С. 259–265.
3. Мехедов М. И. Повышение провозной способности транссибирской магистрали на основе организации движения соединенных поездов / М. И. Мехедов и др. // Железнодорожный транспорт. — 2021. — № 3.
4. Курбасов А. С. Увеличение скоростей на железных дорогах России: возможности и преимущества / А. С. Курбасов // Транспорт Российской Федерации. — 2011. — № 6(37). — С. 20–23.
5. Апатцев В. И. Оценка целесообразности организации тяжеловесного движения на электрифицированных железнодорожных участках / В. И. Апатцев, А. В. Подорожкина, В. О. Русаков // Наука и техника транспорту. — 2014. — С. 48–51.
6. Шаманов В. И. Системы интервального регулирования движения поездов с цифровыми радиоканалами / В. И. Шаманов // Автоматика на транспорте. — 2018. — Т. 4. — № 2. — С. 223–240.
7. Шухина Е. Е. Развитие локомотивных систем безопасности и управления / Е. Е. Шухина, Г. К. Кисельгоф // Железнодорожный транспорт. — 2020. — № 4. — С. 51–54.

8. Бушуев С. В. Повышение пропускной способности участка железной дороги с применением технологии виртуальной сцепки / С. В. Бушуев, К. В. Гундырев, Н. С. Голочалов // Автоматика на транспорте. — 2021. — Т. 7. — № 1.
9. «Виртуальной сцепке» зеленый свет. — URL: <https://www.avpt.ru/news/virtualnoy-stsepke-zelenyy-svet/> (дата обращения: 08.08.2022).
10. Виртуальная сцепка становится реальной. — URL: <http://gudok.ru/newspaper/?ID=1565576> (дата обращения: 08.08.2022).
11. Климова Е. В. Пропускная и провозная способность перегонов при реализации технологии «виртуальная сцепка» грузовых поездов / Е. В. Климова // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. — 2020. — № 3(47). — С. 53–64.
12. Оленцевич В. А. Эффективность внедрения интервального регулирования движения поездов по системе «виртуальная сцепка» на участке / В. А. Оленцевич, Р. Ю. Упырь, А. А. Антипина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2020. — № 2(66).
13. Власьевский С. В. Оценка энергетической эффективности электровозов ЗЭС5К при использовании технологии интервального регулирования движения по типу «виртуальная сцепка» / С. В. Власьевский и др. // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 2020. — Т. 79. — № 1.
14. Левин Д. Ю. Расчет и использование пропускной способности железных дорог: монография / Д. Ю. Левин, В. Л. Павлов. — М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2011. — 364 с.
15. Хусаинов Ф. И. Показатели скорости как аналитические инструменты для оценки работы железных дорог / Ф. И. Хусаинов // Транспорт Российской Федерации. — 2017. — № 4(71). — С. 19–22.
16. Розенберг Е. Н. Интервальное регулирование движения поездов / Е. Н. Розенберг, А. А. Абрамов, В. В. Батраев // Железнодорожный транспорт. — 2017. — № 9.
17. Гордиенко А. А. Повышение пропускной способности на лимитирующих участках Северо-Кавказской железной дороги за счет интервального регулирования движения поездов / А. А. Гордиенко, В. Н. Зубков, Н. Н. Мусиенко // Транспорт и логистика: стратегические приоритеты, технологические платформы и решения в глобализованной цифровой экономике: сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции. 2019. — Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2019. — С. 98–102.
18. Новиков В. Г. Координатная система интервального регулирования движения поездов с расширенными функциональными возможностями локомотивного устройства: автореферат диссертации / В. Г. Новиков. — М.: МИИТ, 2011. — 23 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2022, Vol. 8, No. 4, pp. 343–353
DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-343-353

Ways to Rise Carrying Capacity of Railway Sections

Information about author

Bushuev S. V., PhD in Engineering, Vice-rector for Research Work, Associate Professor. E-mail: SBushuev@usurt.ru

Ural State Transport University, “Automation, Remote Control and Communications in Railway Transport” Department, Yekaterinburg

Abstract: The article considers three courses of carrying (traffic) capacity rise: the increase of train length and traffic speed and the decrease of the interval between trains. Reached indicators in these courses and potential in their growth are defined on statistical data basis. The dependence of carrying (traffic) capacity of railway section from being researched parameters is established. The way of group auto-guidance of trains as the development of being applied technology of virtual replacer is proposed. The possibilities and conditions of the reduction of interval between trains, depending on being applied system of interval regulation and expansion of its possibilities on account of group auto-guidance, are presented. The dependencies demonstrating carrying capacity rise at the expense of interval regulation and train length increase are built. Growth potential is determined on account of group auto-guidance application.

Keywords: carrying and traffic capacity of railways; interval between trains; interval regulation system; virtual assessment; group auto-guidance of trains; unified, heavy-duty and long trains; train motion speed.

References

1. Levin D. Ju. *Teorija operativnogo upravljenija perezvochnym processom* [The theory of operational management of the transportation process]. Moscow: Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte Publ., 2008. 625 p. (In Russian)
2. Sotnikov E. A., Holodnjak P. S. *Izmenenija propusknj i provoznoj sposobnostej vysokozagruzennyh napravlenij pri organizacii dvizhenija soedinennyh poezdov na postojannoj osnove* [Changes in throughput and carrying capacity of high-loaded directions when organizing the movement of connected trains on a permanent basis]. *Vestnik Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta Zheleznodorozhnogo Transporta* [Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport]. 2019, vol. 78, I. 5, pp. 259–265. (In Russian)
3. Mehedov M. I. *Povyshenie provoznoj sposobnosti transsibirskoj magistrali na osnove organizacii dvizhenija soedinennyh poezdov* [Increasing the carrying capacity of the Trans-Siberian Railway on the basis of the organization of the movement of connected trains]. *Zheleznodorozhnyj Transport* [Zheleznodorozhny Transport]. 2021, I. 3. (In Russian)
4. Kurbasov A. S. *Uvelichenie skorostej na zheleznih dorogah Rossii: vozmozhnosti i preimushhestva* [Increasing speeds on Russian railways: opportunities and benefits]. *Transport Rossijskoj Federacii* [Transport of the Russian Federation]. 2011, I. 6 (37), pp. 20–23. (In Russian)
5. Apatcev V. I., P.A.V. Rusakov V. O. *Ocenka celesoobraznosti organizacii tjazhelovesnogo dvizhenija na jelektrificirovannyh zheleznodorozhnyh uchastkah* [Evaluation of the feasibility of organizing heavy traffic on electrified railway sections]. *Nauka i tehnika transport* [Science and Technology for Transport]. 2014, pp. 48–51. (In Russian)
6. Shamanov V. I. *Sistemy interval'nogo regulirovanija dvizhenija poezdov s cifrovymi radiokanalami* [Interval control systems for train traffic with digital radio channels]. *Avtomatika Na Transporte* [Transport automation research]. 2018, vol. 4, I. 2, pp. 223–240. (In Russian)
7. Shuhina E. E., Kisel'gof G. K. *Razvitie lokomotivnyh sistem bezopasnosti i upravlenija* [Development of locomotive security and control systems]. *Zheleznodorozhnyj Transport* [Transport of the Russian Federation]. 2020, I. 4, pp. 51–54. (In Russian)
8. Bushuev S. V., Gundyrev K. V., Golochalov N. S. *Povyshenie propusknj sposobnosti uchastka zheleznoj dorogi s primeneniem tehnologii virtual'noj scepki* [Increasing the capacity of a section of the railway using virtual coupling technology]. *Avtomatika Na Transporte* [Transport automation research]. 2021, vol. 7, I. 1. (In Russian)

9. «Virtual'noj scepke» zelenyj svet ["Virtual coupling" green light]. Available at: <https://www.avpt.ru/news/virtualnoy-stsepke-zelenyy-svet/> (accessed: August 08, 2022).
10. Virtual'naja scepka stanovitsja real'noj [Virtual coupling becomes real]. Available at: <http://gudok.ru/newspaper/?ID=1565576> (accessed: August 08, 2022).
11. Klimova E. V. Propusknaja i provoznaja sposobnost' peregonov pri realizacii tehnologii «virtual'naja scepka» gruzovyh poezdov [Throughput and carrying capacity of hauls in the implementation of the "virtual coupling" technology of freight trains]. *Vestnik Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshhenija* [Bulletin of the Ural State University of Communications]. 2020, I. 3 (47), pp. 53–64. (In Russian)
12. Olencevich V. A., Upyr' R. Ju., Antipina A. A. Jeftektivnost' vnedrenija interval'nogo regulirovanija dvizhenija poezdov po sisteme «virtual'naja scepka» na uchastke [Efficiency of implementation of interval regulation of train traffic according to the "virtual coupling" system on the section]. *Sovremennye Tehnologii. Sistemnyj Analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. 2020, I. 2 (66). (In Russian)
13. Vlas'evskij S. V. Ocenka jenergeticheskoj jeftektivnosti jelektrovozov 3Je5SK pri ispol'zovanii tehnologii interval'nogo regulirovanija dvizhenija po tipu «virtual'naja scepka» [Evaluation of the energy efficiency of 3E5SK electric locomotives using the technology of interval traffic control according to the "virtual coupling" type]. *Vestnik Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta Zheleznodorozhnogo Transporta* [Bulletin of the Scientific Research Institute of Railway Transport]. 2020, vol. 79, I. 1. (In Russian)
14. Levin D. Ju., Pavlov V. L. *Raschet i ispol'zovanie propusknoj sposobnosti zheleznyh dorog* [Calculation and use of railway capacity]. Moscow: Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte Publ., 2011. 364 p. (In Russian)
15. Husainov F. I. Pokazateli skorosti kak analiticheskie instrumenty dlja ocenki raboty zheleznyh dorog [Speed indicators as analytical tools for assessing the work of railways]. *Transport Rossijskoj Federacii* [Transport of the Russian Federation]. 2017, I. 4 (71), pp. 19–22. (In Russian)
16. Rozenberg E. N., Abramov A. A., Batraev V. V. Interval'noe regulirovanie dvizhenija poezdov [Interval control of train traffic]. *Zheleznodorozhnyj Transport* [Transport of the Russian Federation]. 2017, I. 9. (In Russian)
17. Gordienko A. A., Zubkov V. N., Musienko N. N. Povyshenie propusknoj sposobnosti na limitirujushhij uchastkah Severo-kavkazskoj zheleznoj dorogi za schet interval'nogo regulirovanija dvizhenija poezdov [Increasing throughput on the limiting sections of the North Caucasian Railway due to interval regulation of train traffic]. *Transport i logistika: strategicheskie priority, tehnologicheskie platformy i reshenija v globalizovannoj cifrovoj jekonomike. Sbornik nauchnyh trudov III mezh-dunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii.2019* [Transport and logistics: strategic priorities, technological platforms and solutions in the globalized digital economy. Collection of scientific papers of the III International Scientific and Practical Conference.2019]. Rostov-na-Donu: Rostovskij gosudarstvennyj universitet putej soobshhenija Publ., 2019, pp. 98–102. (In Russian)
18. Novikov V. G. *Koordinatnaja sistema interval'nogo regulirovanija dvizhenija poezdov s rasshirennymi funkcional'nymi vozmozhnostjami lokomotivnogo ustrojstva* [Coordinate system of interval regulation of train traffic with extended functionality of the locomotive device]. Moscow: MIIT Publ., 2011. 23 p. (In Russian)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ С УЧЕТОМ ПРИМЕНЕНИЯ ИНВЕНТАРНЫХ КОМПЛЕКТОВ

ЯШИН Михаил Геннадьевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры¹; e-mail: maik1771@rambler.ru
ПАНТЕЛЕЕВ Роман Анатольевич, канд. техн. наук, старший преподаватель¹; e-mail: pantel98@mail.ru
КУШПИЛЬ Игорь Васильевич, канд. техн. наук, старший преподаватель²; e-mail: i_kushpil@mail.ru
ФОМИН Никита Николаевич, курсант кафедры¹; e-mail: fomin.nik04@gmail.com

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

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

При возникновении перерыва в движении железнодорожных поездов по причине воздействия чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и биолого-социального характера необходимо скорейшее восстановление нормальной, устойчивой и безопасной работы железнодорожного транспорта в целом. При этом если рассматривать железнодорожный транспорт как систему, то изменения, протекающие в этой системе в случае подобного рода воздействия, возможны только над ее математической моделью, которая строится для описания функционирования инфраструктуры железнодорожного транспорта в условиях воздействия чрезвычайных ситуаций и реализуется в имитационной модели. Для повышения оперативности и эффективности восстановительных мероприятий авторами предлагается применение станционных напольных восстановительных комплектов, включающих в себя напольные устройства железнодорожной автоматики и телемеханики. В статье описывается имитационная модель работы инфраструктуры железнодорожного транспорта с учетом применения станционного напольного восстановительного комплекта железнодорожной автоматики и телемеханики, которая позволяет проводить эксперименты, рассчитать требуемое количество сил и средств для восстановления прерванного движения поездов на железнодорожных станциях, а также оценить эффективность выполняемых восстановительных работ в условиях воздействия чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: инфраструктура железнодорожного транспорта; железнодорожная станция; восстановление прерванного движения; способы восстановления; непрерывность работы железнодорожной станции; станционный восстановительный комплект железнодорожной автоматики и телемеханики.

DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-354-366

▼ Введение

Под инфраструктурой железнодорожного транспорта (далее — ИЖДТ) понимается технологический комплекс, включающий в себя железнодорожные пути (общего и необщего пользования) и другие сооружения, железнодорожные станции, устройства электроснабжения, сети связи, системы сигнализации, централизации и блокировки, информационные комплексы, систему управления движением и иные, обеспечивающие функционирование

этого комплекса здания, строения, сооружения, устройства и оборудование¹.

Если рассматривать железнодорожный транспорт как систему в целом, а перевозки как процесс, на который направлено функционирование этой системы, то одной из сложнейших

¹ГОСТ 34530—2019. Транспорт железнодорожный. Основные понятия. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2019. — 58 с.
 СП 237.1326000.2015. Инфраструктура железнодорожного транспорта. Общие требования. — М.: Минтранс России, 2015. — 57 с.

подсистем, оказывающей непосредственное влияние на обеспечение безопасного движения поездов, а также требуемого объема перевозок (пропускной и провозной способности), является система железнодорожной автоматики и телемеханики (далее — ЖАТ) — подсистема ИЖДТ, включающая в себя комплекс технических сооружений и устройств, обеспечивающих безопасное управление движением поездов на перегонах, станциях и маневровой работой². Полноценное функционирование ИЖДТ без системы ЖАТ невозможно. В то же время железные дороги подвержены воздействию чрезвычайных ситуаций (далее — ЧС) природного, техногенного и биолого-социального характера, которые могут привести к разрушению объектов ИЖДТ или изменению его состояния. Опасное состояние и разрушение систем ЖАТ повлечет за собой нарушение графика движения поездов, снижение пропускной и провозной способности железных дорог (неполноценное функционирование ИЖДТ), а также человеческие жертвы. Вследствие этого при организации работ по восстановлению объектов ИЖДТ определяющее значение играет оперативность восстановления системы ЖАТ, так как длительность цикла восстановления, в зависимости от складывающейся обстановки и степени (объема) разрушений, может составлять до нескольких суток, что скажется на эффективности работы ИЖДТ.

Восстановление системы ЖАТ на объекте ИЖДТ после воздействия ЧС возможно тремя способами [1]:

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

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

² ТР ТС 003/2011. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта». — URL: <http://docs.cntd.ru/document/902293439>.

По второму решению получается, что если заранее согласиться с необходимостью перехода на более простые системы ЖАТ (например, от электрической централизации (далее — ЭЦ) к ручному управлению стрелками), то значит примириться с резким снижением размеров движения, со срывом плана перевозок и с необходимостью привлечения на объект ИЖДТ дополнительного количества людей.

В [1] для быстрого развертывания оперативного управления устройствами ЭЦ на объекте ИЖДТ в случаях повреждений постов и устройств ЭЦ при землетрясениях, взрывах, пожарах, затоплениях и других катаклизмах (ЧС) как в мирное, так и в военное время предлагается использовать:

- мобильный комплекс «Инвентарный пост управления МК ЭЦ-ИН», разработанный в ООО «ПОЛИВИД» [2];

- мобильную электрическую централизацию стрелок и сигналов на базе микро-ЭВМ и программируемых контроллеров (ЭЦ-МПК-М), предложенную Центром компьютерных железнодорожных технологий Петербургского государственного университета путей сообщения (ЦКЖТ ПГУПС) [3];

- мобильный комплекс микропроцессорной системы управления стрелками и светофорами участка железной дороги (МК МПЦ), разработанный в ОАО «РЖД» [4].

Тем не менее вышеперечисленные технические системы в своем составе содержат только постовое оборудование. Мы полагаем, что для полноценного функционирования ИЖДТ в условиях воздействия ЧС использование существующих комплексов (ЭЦ-МПК-М, МК МПЦ или МК ЭЦ-ИН) требует их доукомплектования стационарным напольным восстановительным комплектом железнодорожной автоматики и телемеханики (СНВК-ЖАТ) [5, 6].

В данной статье описывается имитационная модель работы ИЖДТ с учетом применения СНВК-ЖАТ (далее — ИМ-ЖАТ), которая позволяет проводить эксперименты, рассчитать потребное количество сил и средств для восстановления прерванного движения поездов на станциях, а также оценить эффективность выполняемых восстановительных работ в условиях воздействия ЧС.

1. Обобщение основных параметров моделирования работы инфраструктуры железнодорожного транспорта

Исследование процессов работы ИЖДТ в условиях воздействия ЧС как сложной организационно-технической системы путем прямых экспериментов невозможно, а над ее подсистемами вследствие эмерджентности практически бесполезно. Безусловно, в этих условиях вместо эксперимента над действительной системой проводится эксперимент над ее математической моделью, которая строится для описания функционирования ИЖДТ в условиях воздействия ЧС и реализуется в имитационной модели — ИМ-ЖАТ.

В ИМ-ЖАТ исследуемую железную дорогу представим в виде графа $G = \{U, E\}$, где $U = \{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_s\}$ — совокупность железнодорожных станций различного типа и $E = \{e_{ij}\}$ — множество участков (перегонов) между ними. Для ИМ-ЖАТ границы определяются пределами функционирования железнодорожных станций, а процессы, связанные с железнодорожными участками (перегонами), вынесены в ограничение.

ИМ-ЖАТ имеет цель определить требуемое количество СНВК-ЖАТ для выполнения заданного объема перевозок и оценить показатель обеспечения непрерывности работы железнодорожной станции ($k_{жлс}$) с их применением. Следовательно, формулировка задачи ИМ-ЖАТ будет иметь следующий вид:

$$F_{иждт} = \begin{cases} R_{снвк} = [r_j] \\ k_{жлс} = \frac{N_{пс}^{фак}}{N_{пс}^{зад}} \rightarrow \max \end{cases}, \quad (1)$$

где $R_{снвк} = [r_j]$ — количество требуемых j -х СНВК-ЖАТ, компл., здесь $j = 1, 2, \dots, 7$;

$N_{пс}^{фак}, N_{пс}^{зад}$ — фактическая и заданная пропускная способность, поезд/сут.;

$k_{жлс}$ — показатель обеспечения непрерывности работы железнодорожной станции, ед., выражает связь между компонентами эффективности структуры объекта ИЖДТ и в то же время может являться оценочным показателем эффективности выполняемых работ и способов восстановления прерванного движения поездов:

$$k_{жлс} = \frac{\exp\left[-T_{\delta} \cdot \sum_{n=1}^{N_f} \lambda_{оп}(T_{\delta}) \cdot (1 - k_{блп})\right]}{\alpha_n} \cdot k_{вждс}^{пут}, \quad (2)$$

где N_f — общее число факторов, способных перевести объект ИЖДТ в f -е опасные состояния при воздействии ЧС, ед.;

$\lambda_{оп}(T_p)$ — интенсивность опасных отказов за расчетное время T_p , 1/ч;

α_n — нормированный коэффициент надежности, учитывающий влияние отказов в работе технических средств, $\alpha_n = 0,83 \dots 0,96$;

$k_{вждс}^{пут}$ — показатель технико-эксплуатационной работы восстанавливаемой железнодорожной станции, ед., определяющий снижение пропускной способности от количества восстанавливаемых путей;

$k_{блп}$ — показатель обеспечения безопасности движения поездов, ед. обоснованного в [7].

Основным параметром модуля моделирования работы ИЖДТ являются модели работы железнодорожных станций, рассмотренные в [8], которые можно описать матрицей:

$$F_{жлс}^{иждт} \in [F_{жлс_{su}}] \in \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1u} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2u} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{s1} & f_{s2} & \dots & f_{su} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $F_{жлс_{su}}$ — модель работы железнодорожной станции s -го типа с u -ми характеристиками (наименованием, категорией (типом, классом) станции, производимой работы на ней, принципиальной схемой, включающей количество путей, длину (полную и полезную) с вместимостью вагонов, а также координаты широты и долготы каждой железнодорожной станции и т. п.).

Причинами повреждений станционных устройств ЖАТ могут быть как аварии и поломки самих устройств, так и воздействие разнообразных ЧС, в том числе при ведении боевых действий и совершении террористических актов.

Высокая степень неопределенности данных о характере ЧС определяет необходимость оценки разрушения ИЖДТ с применением математических методов и моделей. В соответствии с теорией вероятности [9, 10] полная вероятность совместных независимых событий определяется:

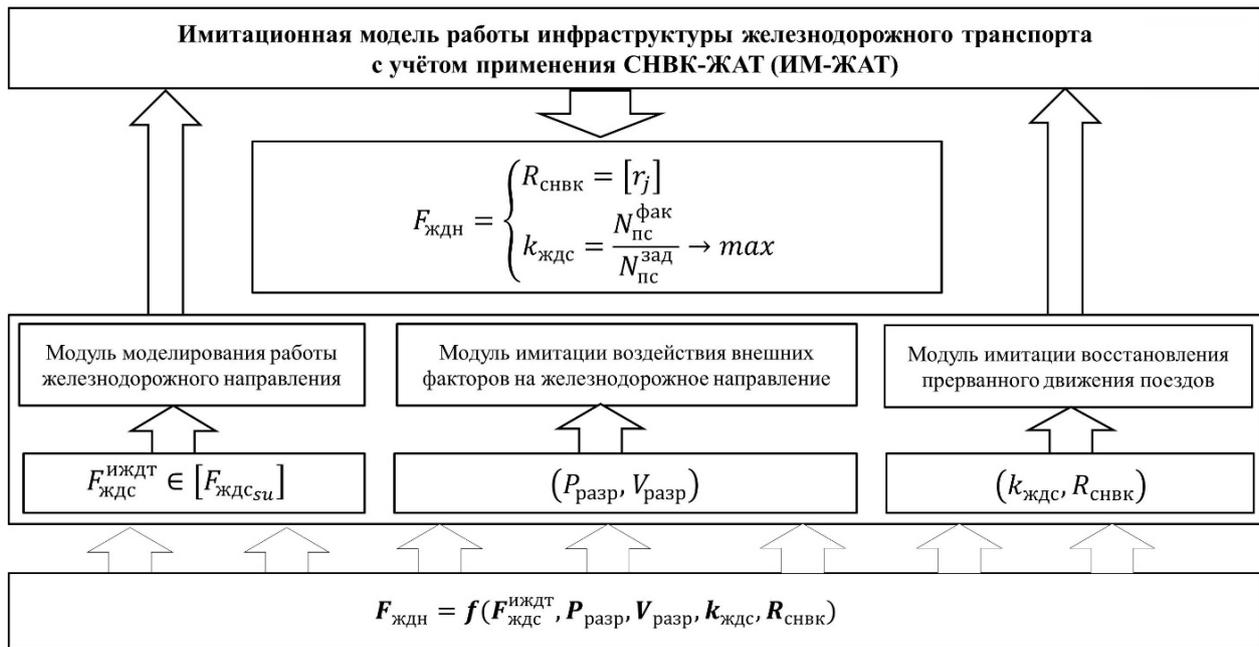


Рис. 1. Обобщенная схема построения взаимосвязи модулей в ИМ-ЖАТ

$$P\left(\prod_{i=1}^n X_i\right) = \prod_{i=1}^n P(X_i), \tag{4}$$

где X_i — i -е независимое событие, связанное с воздействием ЧС.

На завершающей стадии моделирования воздействия ЧС анализируются разрушенные и уцелевшие объекты ИЖДТ и выводятся результаты объемов разрушений: $V_{разр} = \{S_u; l_{ст_u}; m_{П_u}^{ждс}; m_{Т_u}^{ждс}\}$ (типология, количество и характеристика разрушенных железнодорожных станций, в том числе и количество станционных путей). При необходимости проводится корректировка данных по объемам разрушений.

Таким образом, основными обобщенными параметрами модуля имитации воздействия ЧС являются вероятность и объемы разрушения $(P_{разр}, V_{разр})$.

В модуле имитации восстановления ИЖДТ выполняется основная задача ИМ-ЖАТ. Рассчитывается требуемое количество сил и средств для восстановления прерванного движения поездов на станциях, а также оценивается эффективность выполняемых восстановительных работ в условиях воздействия ЧС. Для этого используются методики, разработанные авторами [5, 11], в которых решен вопрос расчета требуемого минимального напольного оборудования $(R_{снвк})$, необходимого для скорейшего

открытия прерванного движения поездов на восстанавливаемой станции.

Далее рассчитываются трудозатраты и определяется продолжительность выполнения восстановительных работ первого и второго этапов $T_{восст} = t_{восст}^I + t_{восст}^{II}$. Сведения для расчета трудозатрат поступают из нормативных документов и баз данных технологических процессов эксплуатации и восстановления устройств ЖАТ [12].

Постановка задачи определения рационального способа восстановления прерванного движения поездов на разрушенной железнодорожной станции $(k_{ждс}^P)$ имеет следующий вид:

$$k_{ждс}^P(y) \rightarrow \max, \text{ при } y \in (1, 2, \dots, Y), \tag{5}$$

где Y — количество альтернативных способов восстановления прерванного движения поездов, попадающих под процедуру сравнения, ед.

Рассчитанный согласно (2) показатель обеспечения непрерывности работы разрушенной станции $(k_{ждс}^P)$ сравнивается с нормативным показателем $(k_{ждс}^{отгф})$ и при условии $k_{ждс}^P \geq k_{ждс}^{отгф}$ выводит результаты имитационного моделирования для статистической обработки. При невыполнении данного условия проводится корректировка данных.

Стало быть, обобщенными параметрами этого модуля являются показатель обеспечения непрерывности работы железнодорожной

станции ($k_{\text{жлс}}$) и выходной параметр — общее количество СНВК-ЖАТ ($R_{\text{снвк}}$), включаемое в аварийно-восстановительный запас.

Подводя итоги выше сказанного, в самом общем виде структуру ИМ-ЖАТ можно представить графически с помощью обобщенной схемы взаимосвязанных модулей (рис. 1) и математическим выражением:

$$F_{\text{ИЖДТ}} = f(F_{\text{жлс}}^{\text{ИЖДТ}}, P_{\text{разр}}, V_{\text{разр}}, k_{\text{жлс}}, R_{\text{снвк}}). \quad (6)$$

Теперь, когда определены цели, задачи, структура ИМ-ЖАТ и обобщены основные параметры моделирования работы ИЖДТ с учетом применения нового СНВК-ЖАТ, необходимо конкретизировать ИМ-ЖАТ и приступить к ее реализации.

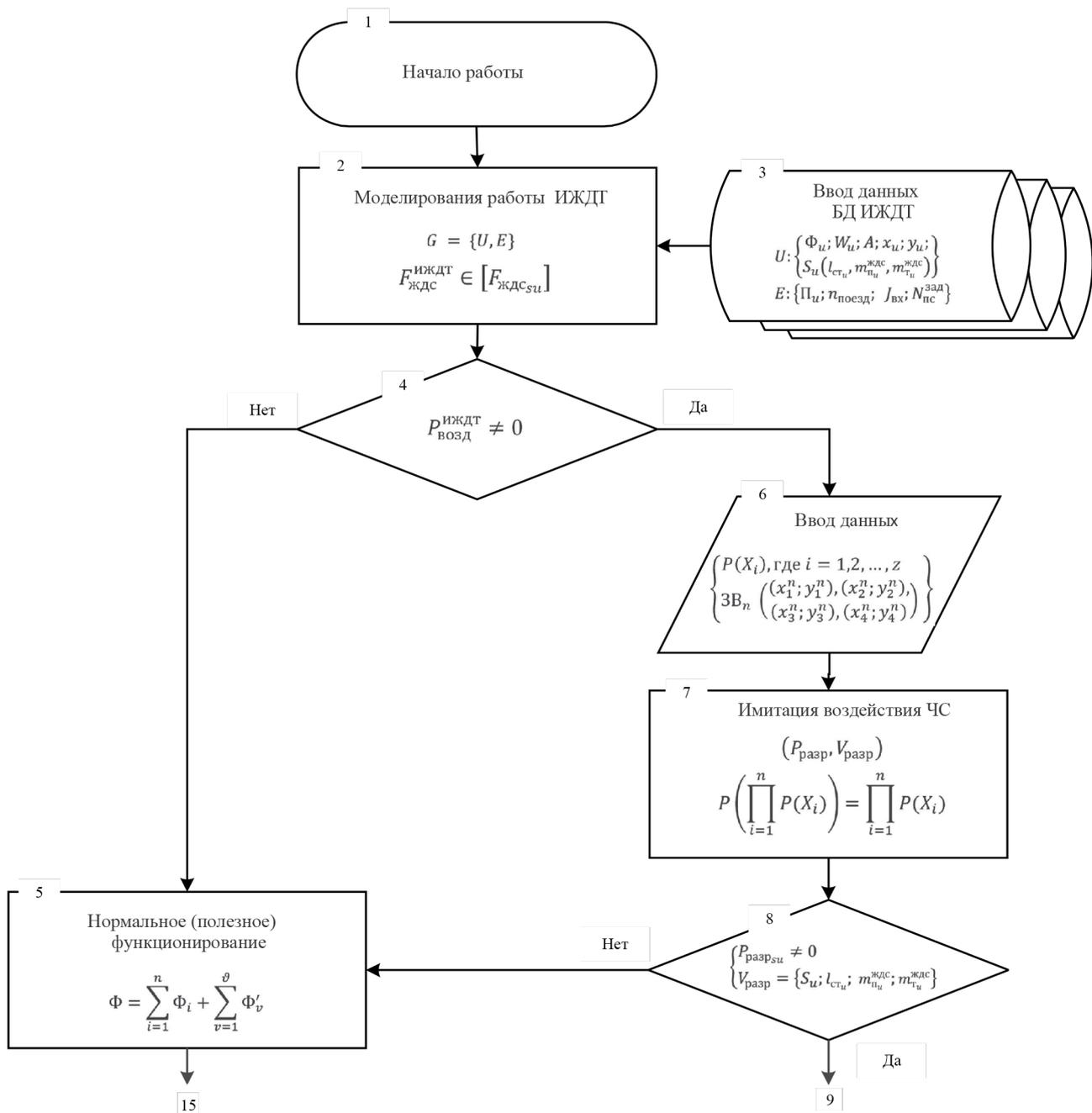


Рис. 2. Блок-схема ИМ-ЖАТ

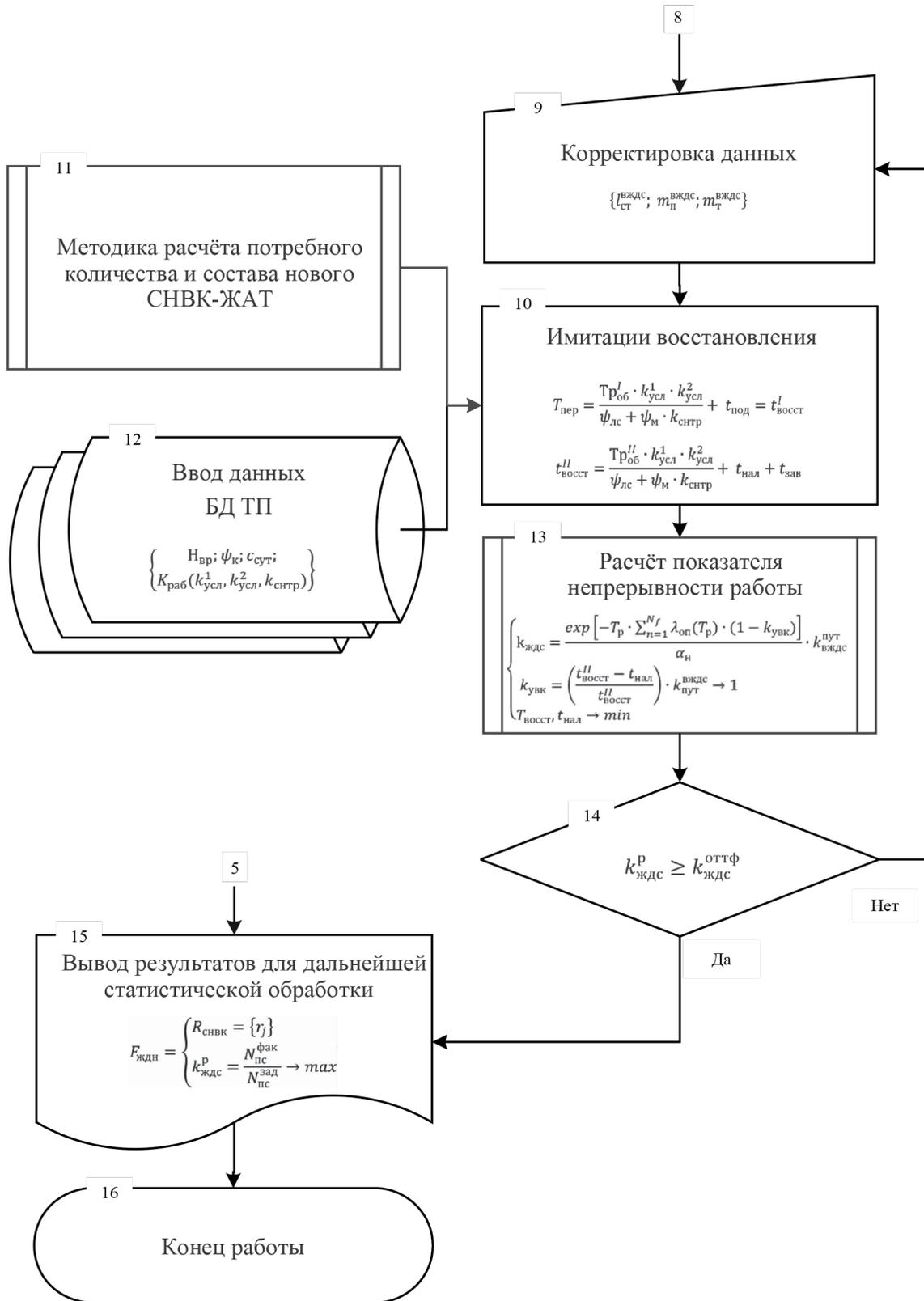


Рис. 2. Блок-схема ИМ-ЖАТ (продолжение)

Таблица 1. **Массивы данных для реализации модуля моделирования работы ИЖДТ**

Исходные данные ИМ-ЖАТ		Источники получения информации по показателям моделирования
Вид (характеристика) исходной информации	Обозначение по тексту	
Железнодорожная сеть, на которой находится исследуемая ИЖДТ	G	$G = \{U, E\}$
Совокупность железнодорожных станций различных категорий (типов, классов)	U	$U = \{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_n\}$
Множество участков (перегонов) между железнодорожными станциями	E	$E = \{e_{ij}\}$
Модель работы железнодорожной станции s -го типа с u -ми характеристиками	$F_{\text{жлс}_{su}}$	БД ИЖДТ ¹ [14] вводится (устанавливается) пользователем
Принципиальная схема железнодорожной станции	S_u	БД ИЖДТ [14]
Длина железнодорожной станции (полная и полезная) с вместимостью вагонов	$l_{\text{ст}_u}$	
Количество станционных путей	$m_{\text{пу}}^{\text{жлс}}$	
Количество путей специального назначения (тупики, подъездные пути)	$m_{\text{ту}}^{\text{жлс}}$	
Географические координаты широты и долготы каждой железнодорожной станции	$x_u; y_u$	
Технические элементы железнодорожной станции	A	
Определенный размер (объем) транспортной работы, производимой железнодорожной станцией	W_u	рассчитывается согласно выражению (8)
Нормальное (полезное) функционирование железнодорожной станции	Φ_u	
Подходы к железнодорожной станции, протяженность и тип перегона с видом тяги на нем	Π_u	БД ИЖДТ [14]
Суммарный поездопоток	$n_{\text{поезд}}$	вводится (устанавливается) пользователем
Интервалы поступления поездов	$J_{\text{вх}}$	
Требуемая пропускная способность	$N_{\text{пс}}^{\text{тр}}$	

¹ БД ИЖДТ — База данных инфраструктуры железнодорожного транспорта.

2. Имитационная модель работы инфраструктуры железнодорожного транспорта с учетом применения станционного напольного восстановительного комплекта железнодорожной автоматики и телемеханики

ИМ-ЖАТ представляет собой программу, реализованную на компьютере [13], и состоит из трех модулей, включающих несколько блоков (рис. 2), объединенных между собой массивами информации.

Модуль моделирования работы ИЖДТ содержит информацию о работе и расположении железнодорожных станций на железнодорожной сети (блок № 2). Для правильного графического представления используются географические

координаты железнодорожных станций ($x_u; y_u$) и соединяющие их во взаимном расположении линии (перегоны), которые характеризуются протяженностью, типом и видом тяги на нем, а также суммарным поездопоток, интервалами поступления поездов и требуемой пропускной способностью ($E: \{\Pi_u; n_{\text{поезд}}; J_{\text{вх}}; N_{\text{пс}}^{\text{тр}}\}$).

Для проведения эксперимента загружаются базы данных [14], характеризующие железнодорожные станции: наименование, категория (тип, класс), производимая работа на ней, принципиальная схема, включающая количество путей, длину (полную и полезную) с вместимостью вагонов, а также координаты широты и долготы и т. п. ($U: \{\Phi_u; W_u; S_u (l_{\text{ст}_u}, m_{\text{пу}}^{\text{жлс}}, m_{\text{ту}}^{\text{жлс}}); A; x_u; y_u\}$), а также вводятся другие необходимые данные (блок № 3), представленные в табл. 1.

Таблица 2. Массивы исходных данных для реализации модуля имитации воздействия ЧС на ИЖДТ

Исходные данные ИМ-ЖАТ		Источники получения информации по показателям моделирования
Вид (характеристика) исходной информации	Обозначение по тексту	
Вероятность разрушения	$P_{\text{разр}}$	Рассчитывается программой согласно [11]
Прогнозируемые объемы разрушений	$V_{\text{разр}}$	
Прогнозируемые сценарии ЧС	$P_{\text{сцен}}$	Определяется (справочное)
Зоны воздействия противника на ИЖДТ	$ЗВ_n$	$\left\{ \begin{array}{l} (x_1^n; y_1^n), (x_2^n; y_2^n), \\ (x_3^n; y_3^n), (x_4^n; y_4^n) \end{array} \right\}$ Метод Монте-Карло

Географические объекты, коими являются железнодорожные станции, определяются сферическими координатами (долгота, широта и высота над уровнем моря), а в ИМ-ЖАТ используется декартова система координат. Поэтому необходимо сферические координаты $(\theta; \varphi; \rho)$ преобразовать к декартовой системе координат $(x; y; z)$ по формулам:

$$\begin{cases} x = \rho \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi \\ y = \rho \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi \\ z = \rho \cdot \cos \theta \end{cases} \quad (7)$$

Таким образом, в декартовой системе координат, используя координаты широты и долготы, строится и выводится на экран выбранная железнодорожная сеть.

По умолчанию до воздействия внешних факторов, все железнодорожные станции выполняют полезные (нормальные) функции в полном объеме (блок № 5) и определяются:

$$\Phi = \sum_{i=1}^s \Phi_i + \sum_{v=1}^{\vartheta} \Phi'_v, \quad (8)$$

где Φ_i — i -я основная функция s -го типа железнодорожной станции;

Φ'_v — v -я дополнительная функция ϑ -го типа железнодорожной станции при воздействии ЧС, например в военное время или при проведении специальной военной операции.

Имитация воздействия внешних факторов на ИЖДТ (блок № 7) построена на методике прогнозирования воздействия ЧС [15].

Поскольку в настоящее время невозможно точно определить, в каком месте возникнет ЧС, в связи с этим в ИМ-ЖАТ будем использовать

«зоны воздействия» [16, 17] — это территория (район), в границах которой расположены объекты ИЖДТ и прогнозируется воздействие ЧС. «Зоны воздействия» определяются для конкретной железной дороги. Для каждой n -й зоны, которая включает как минимум 3–4 железнодорожных узла и несколько сортировочных и участковых станций (вариант представлен на рис. 3, а), задаются вершины координат $(x_1^n; y_1^n), (x_2^n; y_2^n), (x_3^n; y_3^n), (x_4^n; y_4^n)$. Моделирование воздействия ЧС в ИМ-ЖАТ (рис. 3, б) производится при помощи генератора случайных величин на основе метода Монте-Карло (блок № 6 и 7). Данные для модуля имитации воздействия ЧС по ИЖДТ представлены в табл. 2.

На заключительном этапе моделирования воздействия ЧС анализируются разрушенные и уцелевшие железнодорожные станции и выводятся результаты разрушений $V_{\text{разр}} = \{S_u; I_{\text{ст}_u}; m_{\text{п}_u}^{\text{ждс}}; m_{\text{т}_u}^{\text{ждс}}\}$ (типология, количество и характеристика разрушенных железнодорожных станций). При необходимости проводится корректировка данных по объемам разрушений (блок № 9).

Таким образом, основными обобщенными параметрами модуля имитации воздействия ЧС являются вероятность и объемы разрушения $(P_{\text{разр}}, V_{\text{разр}})$.

Модуль имитации восстановления прерванного движения поездов на железнодорожных станциях выполняет расчет необходимого количества сил и средств вариантов восстановления станционных устройств ЖАТ (блок № 10 и 11), используя методики, разработанные авторами [5, 6, 11, 18], в которых решен вопрос расчета необходимого минимального напольного оборудования, необходимого для скорейшего открытия прерванного движения поездов на

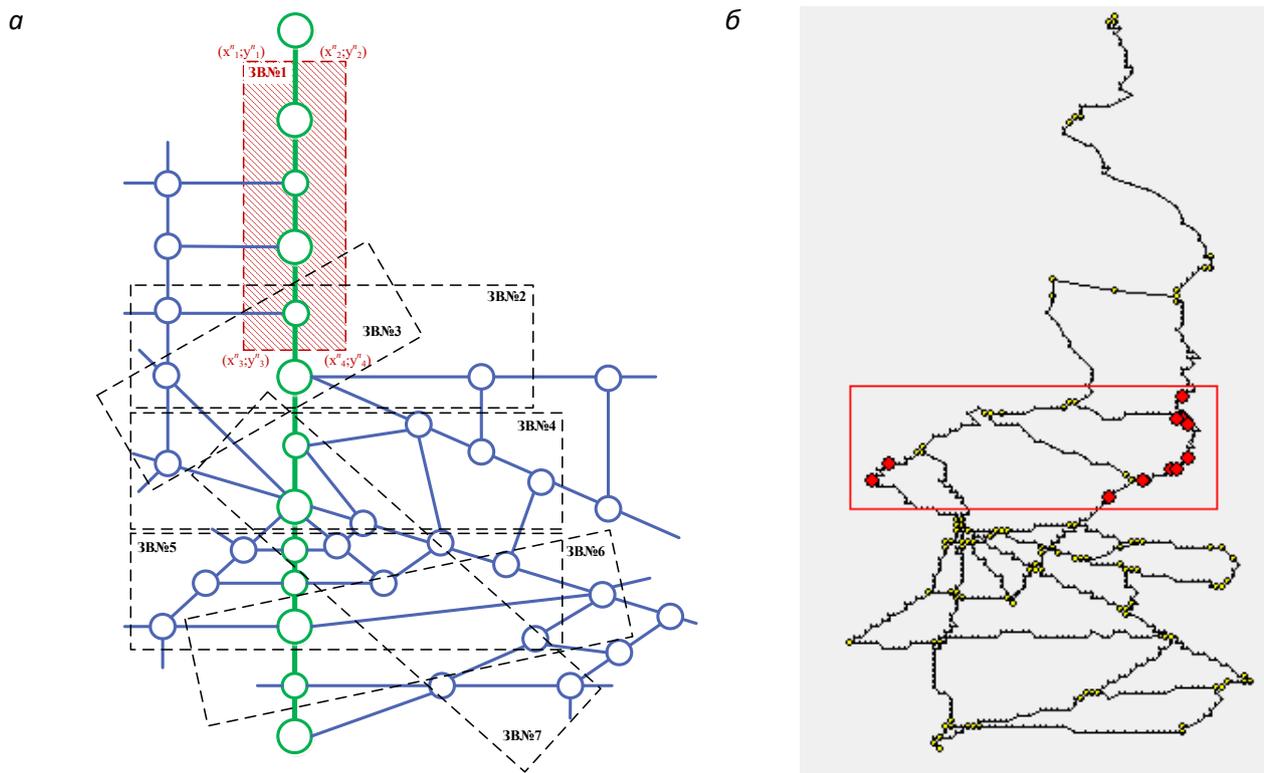


Рис. 3. Воздействие ЧС на ИЖДТ (вариант)

восстанавливаемой железнодорожной станции [19]. Необходимые данные для этого модуля представлены в табл. 3.

Для оценки эффективности выполняемых работ и способов восстановления прерванного движения поездов рассчитывается согласно (2) показатель обеспечения непрерывности работы разрушенных железнодорожных станций ($k_{\text{жлс}}^p$) (блок № 13), который сравнивается с нормативным показателем ($k_{\text{жлс}}^{\text{отгф}}$) и при условии $k_{\text{жлс}}^p \geq k_{\text{жлс}}^{\text{отгф}}$ (блок № 14) выводит результаты имитационного моделирования для статистической обработки (блок № 15).

Таким образом осуществляется работа всей ИМ-ЖАТ, в результате чего достигается повышение оперативности и эффективности восстановительных мероприятий ИЖДТ.

Заключение

В работе сделан аналитический обзор исследований в области восстановления прерванного движения поездов. Проведен анализ способов восстановления, на основе которого определена функциональная цель ИМ-ЖАТ, заключающаяся на данном этапе в определении необходимого количества СНВК-ЖАТ для выполнения

заданного объема перевозок. Также определен показатель обеспечения непрерывности работы железнодорожной станции, который выражает связь между компонентами эффективности структуры объекта ИЖДТ и в то же время является оценочным показателем эффективности выполняемых работ и способов восстановления прерванного движения поездов.

Основной целью работы являлось использование имитационной модели работы инфраструктуры железнодорожного транспорта с учетом применения СНВК-ЖАТ, которая позволяет:

- проводить эксперименты по определению альтернативного способа восстановления прерванного движения поездов на железнодорожных станциях;
- оценить эффективность выполняемых работ и способов восстановления прерванного движения поездов на железнодорожных станциях;
- рассчитать необходимое количество сил и средств для восстановления прерванного движения поездов с учетом применения СНВК-ЖАТ;
- рационально распределять ограниченный ресурс времени, материалов, человеческих сил, выделяемых на восстановление прерванного движения в различных условиях обстановки.

Таблица 3. Массивы исходных данных для реализации модуля имитации восстановления прерванного движения поездов

Исходные данные ИМ-ЖАТ		Источники получения информации по показателям моделирования
Вид (характеристика) исходной информации	Обозначение по тексту	
Количество требуемых комплектов СНВК-ЖАТ	$R_{\text{СНВК}} = [r_j]$	методики [5, 6, 11, 18]
Восстанавливаемое количество станционных путей	$m_{\text{п}}^{\text{ВЖДС}}$	БД ИЖДТ [14]
Восстанавливаемое количество путей специального назначения	$m_{\text{т}}^{\text{ВЖДС}}$	
Длина восстанавливаемой железнодорожной станции	$l_{\text{ст}}$	
Количество стрелочных электроприводов	$n_{\text{сэп}}$	рассчитывается программой согласно [11]
Количество рельсовых цепей	$n_{\text{рц}}$	
Количество устройств для системы счетчиков осей	$n_{\text{со}}$	
Количество мачтовых светофоров	$n_{\text{смч}}$	
Количество карликовых светофоров	$n_{\text{ск}}$	
Требуемые затраты труда	$T_{\text{р}}^{\text{т}}$	
Норма времени на выполнение объема работ	$H_{\text{вр}}$	
Период от воздействия ЧС до завершения восстановительных работ	$T_{\text{восст}}$	$T_{\text{восст}} = t_{\text{восст}}^{\text{I}} + t_{\text{восст}}^{\text{II}}$
Продолжительность перерыва в работе (времени восстановления открытия сквозного движения)	$T_{\text{пер}} = t_{\text{восст}}^{\text{I}}$	$T_{\text{пер}} = \frac{T_{\text{р}}^{\text{р}} \cdot k_{\text{усл}}^1 \cdot k_{\text{усл}}^2}{\Psi_{\text{лс}} + \Psi_{\text{м}} \cdot k_{\text{снтр}}} + t_{\text{под}}$
Продолжительность восстановительных работ второго этапа	$t_{\text{восст}}^{\text{II}}$	$t_{\text{восст}}^{\text{II}} = \frac{T_{\text{р}}^{\text{р}} \cdot k_{\text{усл}}^1 \cdot k_{\text{усл}}^2}{\Psi_{\text{лс}} + \Psi_{\text{м}} \cdot k_{\text{снтр}}} + t_{\text{нал}} + t_{\text{зав}}$
Продолжительность выполнения каждой работы технологического процесса	$t_{\text{раб}}$	$t_{\text{раб}} = \frac{T_{\text{р}}^{\text{т}}}{\Psi_{\text{к}} \cdot c_{\text{сут}}}$
Показатель обеспечения безопасности движения поездов на восстанавливаемой железнодорожной станции	$k_{\text{бдп}}$	$k_{\text{бдп}} = \left(\frac{t_{\text{восст}}^{\text{II}} - t_{\text{нал}}}{t_{\text{восст}}^{\text{II}}} \right) \cdot k_{\text{вждс}}^{\text{пут}}$
Показатель обеспечения непрерывности работы железнодорожной станции	$k_{\text{ждс}}$	рассчитывается согласно выражению (2)
Нормированный коэффициент надежности	$\alpha_{\text{н}}$	$\alpha_{\text{н}} = 0,83 \dots 0,96$
Общее число факторов, способных перевести ИЖДТ в f -е опасные состояния при его поражении	N_f	вводится (устанавливается) пользователем
Интенсивность опасных отказов за расчетное время $T_{\text{р}}$	$\lambda_{\text{оп}}(T_{\text{р}})$	

¹ БД ТП — База данных технологических процессов.

ИМ-ЖАТ должна стать фрагментом автоматизированной информационной системы для управления процессом восстановления железных дорог при воздействии ЧС, а также составной частью концепции восстановления прерванного движения поездов в мирное и военное время.

Такие исследования на математических моделях позволяют определять оптимальные

способы восстановления прерванного движения поездов, что позволит в дальнейшем повысить эффективность средств и способов организации и ведения восстановительных работ.

Только всестороннее и комплексное изучение этой сложной научно-технической задачи позволит повысить качество выработки рациональных подходов к восстановлению железнодорожного транспорта как сложной

организационно-технической системы, а следовательно, обеспечению надежного и безопасного его функционирования, что положительным образом скажется на выполнении железнодорожным транспортом своих задач как важной стратегической отрасли нашей страны.▲

Библиографический список

1. Никитин А. Б. Транспортабельные модули электрической централизации как средство восстановления систем управления движением поездов / А. Б. Никитин, М. Г. Яшин, Р. А. Пантелеев // Автоматика на транспорте. — 2015. — Т. 1. — № 2. — С. 127–142.
2. ООО «ПОЛИВИД». Группа компаний. — URL: <http://polivid.ru> (дата обращения: 29.11.2016).
3. Мобильная электрическая централизация стрелок и сигналов на базе микро-ЭВМ и программируемых контроллеров ЭЦ-МПК-М: Техническое описание. Т. I. Пояснительная записка. — СПб.: ПГУПС, 2002. — 23 с.
4. Смагин Ю. С. Мобильный комплекс микропроцессорной системы управления стрелками и светофорами участка железной дороги / Ю. С. Смагин, О. Ю. Шатковский и др. // Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели». — М.: ФИПС, 2017. — № 17. — Патент на изобретение № 2622522 от 16 июня 2017 г.
5. Яшин М. Г. Расчет количества напольных устройств железнодорожной автоматики и телемеханики для восстановления регулирования движения поездов на станции / М. Г. Яшин, Р. А. Пантелеев // Автоматика на транспорте. — 2016. — Т. 2. — № 2. — С. 198–207.
6. Яшин М. Г. Методика обоснования оптимального решения при расчете и выборе станционного напольного восстановительного комплекта / М. Г. Яшин, Р. А. Пантелеев, А. С. Шарлай // Транспорт Урала. — 2016. — № 3(50). — С. 48–53. — DOI: 10.20291/1815-9400-2016-3-48-53.
7. Кочнев Д. В. Обоснование показателя системы обеспечения безопасного регулирования движения поездов на железнодорожной станции / Д. В. Кочнев, Р. А. Пантелеев // Специальная техника и технологии транспорта. — 2020. — № 5(43). — С. 101–110.
8. Савинов К. Н. Функциональный анализ технико-эксплуатационных показателей работы железнодорожной станции / К. Н. Савинов, М. Г. Яшин, Р. А. Пантелеев // Транспорт России: проблемы и перспективы — 2019: материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 12–13 ноября 2019 года / ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук. — Санкт-Петербург: Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН, 2019. — С. 394–399.
9. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. 10-е изд. / Е. С. Вентцель. — М.: Высшая школа, 2006. — 575 с.
10. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. — 12-е изд., перераб. — М.: Высш. образование, 2005. — 479 с.
11. Пантелеев Р. А. Методика расчета потребного количества сил и средств вариантов восстановления станционных устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Р. А. Пантелеев // Научно-технический сборник. — Петергоф: ВИ (ЖДВ и ВОСО), 2016. — Вып. 31. — Ч. 1. — С. 26–38.
12. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019620594 Российская Федерация. База данных технологических процессов эксплуатации и восстановления устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: № 2019620505: заявл. 04.04.2019; опубл. 15.04.2019 / Р. А. Пантелеев, К. Н. Савинов, В. В. Трубицин и др.
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019616262 Российская Федерация. Модель выбора рациональных конструктивно-технологических решений при восстановлении станционных устройств железнодорожной автоматики и телемеханики при воздействии чрезвычайной ситуации: № 2019614831: заявл. 30.04.2019; опубл. 21.05.2019 / Р. А. Пантелеев, М. Г. Яшин, А. М. Перепеченов и др.
14. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019620651 Российская Федерация. База данных системы поддержки принятия решения при восстановлении станционных устройств железнодорожной автоматики и телемеханики северо-западного железнодорожного направления: № 2019620522: заявл. 08.04.2019; опубл. 19.04.2019 / Р. А. Пантелеев, М. Г. Яшин, А. М. Перепеченов и др.
15. Разрушение железнодорожных объектов. Характер разрушений станционных устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: монография / К. Н. Савинов, Р. А. Пантелеев. — Петергоф: ВИ (ЖДВ и ВОСО), 2019. — 104 с.
16. Савинов К. Н. Моделирование работы направления с учетом применения станционного напольного восстановительного комплекта железнодорожной автоматики и телемеханики / К. Н. Савинов, М. Г. Яшин, Р. А. Пантелеев // Транспорт России: проблемы и перспективы — 2021: материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 09–10 ноября 2021 года. — Санкт-Петербург: Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН, 2021. — С. 156–161.
17. Пантелеев Р. А. Прогнозирование воздействия вероятного противника по объектам инфраструктуры железнодорожного направления / Р. А. Пантелеев, А. М. Перепеченов // Материалы межотраслевой конференции «Проблемы применения Железнодорожных войск и ОАО «РЖД» при техническом прикрытии и восстановлении железных дорог» 14 февраля 2019 года. — СПб.: НИИ (ВСИ МТО) ВА МТО, 2019. — С. 138–142.
18. Пантелеев Р. А. Методика расчета состава станционного напольного восстановительного комплекта железнодорожной автоматики и телемеханики / Р. А. Пантелеев // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Проблемы организации материально-технического обеспечения военной безопасности (труды XVIII Всероссийской научно-практической конференции). — СПб.: ВА МТО, 2016. — Т. 7. — Ч. 2 — С. 232–243.
19. Бабошин В. А. Автоматизация планирования восстановления прерванного движения поездов на железнодорожных станциях с применением аддитивного производства / В. А. Бабошин, Р. А. Пантелеев, П. Н. Фомин // Автоматизация процессов управления. — 2021. — № 4(66). — С. 53–65. — DOI: 10.35752/1991-2927-2021-4-66-53-65.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2022, Vol. 8, No. 4, pp. 354–366
DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-354-366

Modelling of Railway Transport Infrastructure Operation in Emergency Situations Given Application of Inventory Kits

Information about authors

Yashin M. G., PhD in Engineering, Associate Professor¹. E-mail: maikl771@rambler.ru

Panteleev R. A., PhD in Engineering, Senior Lecturer¹. E-mail: pantel98@mail.ru

Kushpil I. V., PhD in Engineering, Senior Lecturer². E-mail: i_kushpil@mail.ru

Fomin N. N., Cadet¹. E-mail: fomin.nik04@gmail.com

¹Military Institute (of Railway Troops and Military Communications). Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev, Department of "Restoration of Automation Devices, Remote Control and Communication on Railways", Saint Petersburg

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Department of «Automation and Remote Control on Railways», Saint Petersburg

Abstract: When break in railway train traffic appears because of the impact of emergencies of natural, technogenic and biological-social character, it's necessary to restore the sooner the better normal, stable and safe work of railway transport in a whole. Together, if to consider railway transport as a system, the changes proceeding in this system in the case of this kind impact, 're possible only above its mathematical model which is built for to describe railway transport infrastructure functioning in conditions of the impact of emergencies and 's realized in simulation model. For to raise recovery activity operativity and effectiveness it's proposed the application of stationary floor recovery kits which include floor devices of railway automatics and remote control. The article describes the simulation model of railway transport infrastructure given stationary floor recovery kit of railway automatics and remote control, the model allows to pursue experiments, to calculate required amount of forces and means for to recover train interrupted traffic on railway stations as well as to assess the effectiveness of being implemented recovery works in emergency impact conditions.

Keywords: railway transport infrastructure; railway station; interrupted traffic recovery; recovery approaches; railway station work continuity; station recovery kit of railway automatics and remote control.

References

1. Nikitin, A. B. Transportabel'nye moduli jelektricheskoy centralizacii kak sredstvo vosstanovleniya sistem upravleniya dvizheniem poezdov [Transportable modules of electrical interlocking as a means of restoring train traffic control systems]. *Avtomatika na transporte* [Automatic on transport]. 2015, vol. 1, I. 2, pp. 127–142. (In Russian)
2. 000 «POLIVID». *Gruppa kompanij. – Oficial'nyj sajt* [LLC "POLIVID". Company group. – Official site]. Available at: <http://polivid.ru> (accessed: November 29, 2016).
3. *Mobil'naja jelektricheskaja centralizacija strelok i signalov na baze mikro-JeVM i programmiruemyh kontrollerov JeC-MPK-M: Tehnicheskoe opisanie. Tom I. Pojasnitel'naja zapiska* [Mobile electrical centralization of arrows and signals based on microcomputers and programmable controllers ETs-MPK-M: Technical description. Volume I. Explanatory note]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2002. 23 p. (In Russian)
4. Mobil'nyj kompleks mikroprocessornoj sistemy upravleniya strelkami i svetoforami uchastka zheleznoj dorogi [Mobile complex of the microprocessor control system for arrows and traffic lights of the railway section]. *Oficial'nyj bjulleten' «Izobreteniya. Poleznye modeli»* [Official Bulletin "Inventions. Utility Models"]. Moscow: FIPS Publ., 2017. I. 17, (Patent na izobretenie № 2622522 ot 16 ijunya 2017 g.). (In Russian)
5. Jashin M. G. Raschet kolichestva napol'nyh ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki dlja vosstanovlenija regulirovaniya dvizhenija poezdov na stancii [Calculation of the number of outdoor devices for railway automation and telemechanics for restoring the regulation of train traffic at the station]. *Avtomatika na transporte* [Automatic on transport]. 2016, vol. 2, I. 2, pp. 198–207. (In Russian)
6. Jashin M. G. Metodika obosnovaniya optimal'nogo reshenija pri raschete i vybore stacionnogo napol'nogo vosstanovitel'nogo komplekta [Methodology for substantiating the optimal solution in the calculation and selection of a station floor restoration kit]. *Transport Urala* [Transportation of the Urals]. 2016, I. 3(50), pp. 48–53. DOI 10.20291/1815-9400-2016-3-48-53. (In Russian)
7. Kochnev D. V. Obosnovanie pokazatelya sistemy obespechenija bezopasnogo regulirovaniya dvizhenija poezdov na zheleznodorozhnoj stancii [Substantiation of the indicator of the system for ensuring the safe regulation of train traffic at the railway station]. *Special'naja tehnika i tehnologii transporta* [Special Technique and Transport Technologies]. 2020, I. 5(43), pp. 101–110. (In Russian)
8. Savinov K. N. Funkcional'nyj analiz tehniko-jekspluatacionnyh pokazatelej raboty zheleznodorozhnoj stancii [Functional analysis of technical and operational indicators of the railway station]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy - 2019: Materialy mezhdunarodnoj-nauchno-prakticheskoy konferencii, Sankt-Peterburg, 12–13 nojabrja 2019 goda. FGBUN Institut problem transporta im. N. S. Solomenko Rossijskoj akademii nauk, 2019 Kollektiv avtorov, 2019* [Transport of Russia: problems and prospects - 2019: Materials of the international scientific-practical conference, St. Petersburg, November 12–13, 2019. FGBUN Institute of Transport Problems. N. S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences, 2019 Team of authors, 2019]. Sankt-Peterburg: Institut problem transporta im. N. S. Solomenko RAN Publ., 2019, pp. 394–399. (In Russian)
9. Ventcel' E. S. *Teorija verojatnostej* [Theory of Probability]. Moscow: Vysshaja shkola Publ., 2006. 575 p. (In Russian)
10. Gmurman V. E. *Teorija verojatnostej i matematicheskaja statistika* [Probability Theory and Mathematical Statistics: Proc. allowance for universities]. Moscow: Vyssh. Obrazovanie Publ., 2005. 479 p. (In Russian)
11. Panteleev R. A. Metodika raschjota potrebnogo kolichestva sil i sredstv variantov vosstanovlenija stacionnyh ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki [Methodology for calculating the required number of forces and means of options for restoring station devices of railway automation and telemechanics]. *Nauchno-tehnicheskij sbornik* [Scientific and technical collection]. Petergof: VI (ZhVd i VOSO) Publ., 2016, pp. 26–38. (In Russian)
12. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh № 2019620594 Rossijskaja Federacija. Baza dannyh tehnologicheskix processov jekspluatacii i vosstanovlenija ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki : № 2019620505 : zajavl. 04.04.2019 : opubl. 15.04.2019* [Certificate of state registration of the database No. 2019620594 Russian Federation. Database of technological processes for the operation and restoration of railway automation and remote control devices: No. 2019620505: Appl. 04/04/2019 : publ. April 15, 2019]. (In Russian)
13. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2019616262 Rossijskaja Federacija. Model' vybora racional'nyh konstruktivno-tehnologicheskix reshenij pri vosstanovlenii stacionnyh ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki pri vozdejstvii chrezvychajnoj situacii : № 2019614831 : zajavl. 30.04.2019 : opubl. 21.05.2019* [Certificate of state registration of the computer program No. 2019616262 Russian Federation. Model for the selection of rational design and technological solutions for the restoration of station devices for railway automation and telemechanics under the influence of an emergency: No. 2019614831: Appl. 04/30/2019 : publ. May 21, 2019]. (In Russian)
14. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh № 2019620651 Rossijskaja Federacija. Baza dannyh sistemy podderzhki prinjatija reshenija pri vosstanovlenii stacionnyh ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki severo-zapadno-gozheleznodorozhno napravlenija : № 2019620522 : zajavl. 08.04.2019 : opubl.*

- 19.04.2019 [Certificate of state registration of the database No. 2019620651 Russian Federation. Database of the decision support system for the restoration of station devices for railway automation and telemechanics of the northwestern railway direction: No. 2019620522: Appl. 04/08/2019 : publ. April 19, 2019]. (In Russian)
15. *Razrushenie zheleznodorozhnyh ob#ektov. Harakter razrushenij stacionnyh ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki* [Destruction of railway facilities. The nature of the destruction of station devices for railway automation and telemechanics] Petergof : VI (ZhDV i VO SO) Publ., 2019. 104 p. (In Russian)
16. Savinov K. N. Modelirovanie raboty napravlenija s uchjotom primenenija stacionnogo napol'nogo vosstanovitel'nogo komplekta zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki [Modeling of the direction work taking into account the use of a station floor recovery set of railway automation and telemechanics]. *Transport Rossii: problemy i perspektivy - 2021 : Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Sankt-Peterburg, 09–10 nojabrja 2021 goda* [Transport of Russia: problems and prospects - 2021 : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, November 09–10, 2021]. Sankt-Peterburg: Institut problem transporta im. N.S. Solomenko RAN Publ., 2021, pp. 156–161. (In Russian)
17. Panteleev R. A. Prognozirovanie vozdejstvija verojatnogo protivnika po ob#ektam infrastruktury zheleznodorozhnogo napravlenija [Forecasting the impact of a potential enemy on railway infrastructure facilities]. *Materialy mezhotraslevoj konferencii «Problemy primenenija Zheleznodorozhnyh vojsk i OAO «RZhD» pri tehničeskom prikrytii i vosstanovlenii zheleznih dorog» 14 fevralja 2019 goda* [Materials of the intersectoral conference “Problems of the use of the Railway Troops and Russian Railways JSC in technical cover and restoration of railways” February 14, 2019. St. Petersburg. : Research Institute (VSI MTO) VA MTO, 2019]. St Petersburg: NII (VSI MTO) VA MTO Publ., 2019, pp. 138–142. (In Russian)
18. Panteleev R. A. Metodika raschjota sostava stacionnogo napol'nogo vosstanovitel'nogo komplekta zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki [Methodology for calculating the composition of the station floor restoration set of railway automation and telemechanics]. *Aktual'nye problemy zashhity i bezopasnosti: Problemy organizacii material'no-tehničeskogo obespečenija voennoj bezopasnosti (trudy XVIII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii)* [Actual problems of protection and security: Problems of organizing the logistics of military security (Proceedings of the XVIII All-Russian Scientific and Practical Conference)]. St. Petersburg: VA MTO Publ., 2016, pp. 232–243. (In Russian)
19. Baboshin V. A. Avtomatizacija planirovanija vosstanovlenija prevannogo dvizhenija poezdov na zheleznodorozhnyh stancijah s primeneniem additivnogo proizvodstva [Automation of planning for the restoration of interrupted train traffic at railway stations using additive manufacturing]. *Avtomatizacija processov upravlenija* [Automation of control processes]. 2021, I. 4(66), pp. 53–65. DOI 10.35752/1991-2927-2021-4-66-53-65. (In Russian)

УДК 656.022.1

КОНСТРУКТОР ФОРМИРОВАНИЯ УСЛУГ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ НА СЕТИ ОАО «РЖД»

ВОРОБЬЕВ Иван Михайлович, аспирант кафедры; e-mail: iv-vorobeow2011@yandex.ru

НОВИЧИХИН Алексей Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры; e-mail: novitchihin@bk.ru

КОВАЛЕВ Константин Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры; e-mail: kovalev_kostia@mail.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра «Логистика и коммерческая работа», Санкт-Петербург

В статье определены перспективы внедрения услуги «Грузовой экспресс», апробированной на полигонах Октябрьской, Московской, Западно-Сибирской железных дорог Российской Федерации. На примере данной услуги рассмотрена задача формирования конструктора услуг для доставки грузов железнодорожным транспортом с целью повышения маршрутной скорости движения поездов. Приводятся характеристика данной услуги и анализ ее реализации на полигоне деятельности железной дороги с перспективой развития данного направления. Выполнен анализ проводимой работы по привлечению новых клиентов для железнодорожного транспорта, расширению перечня оказываемых услуг и индивидуального клиентоориентированного подхода при предоставлении услуг и взаимодействии с дирекцией управления движением. Предложенная схема информационного сопровождения предоставления услуги доставки грузов железнодорожным транспортом на примере «Грузовой экспресс» описывает процесс организации оказания услуги. В отличие от существующего способа оказания услуги, предлагается его алгоритмизация и автоматизация для широкого распространения на сети железных дорог.

Ключевые слова: управление процессами перевозок; железнодорожный транспорт; грузовой экспресс; грузовая и коммерческая работа; скорость доставки; жесткие нитки графика движения поездов; конструктор формирования услуг доставки грузов.

DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-367-376

▼ Введение

Соблюдение сроков доставки грузов в значительной степени определяет экономическую эффективность железнодорожного транспорта в современных условиях. Исходя из проводимого анализа надежности грузовых перевозок экономические потери от нарушения сроков доставки могут достигать до 20 % провозной платы, что, в свою очередь, негативно сказывается на экономических показателях и имидже ОАО «РЖД» [1–6].

Для решения проблемы своевременной доставки грузов и повышения качества оказываемых услуг, привлечения новых клиентов в последние годы компания проводит ряд программ, включающих в себя комплекс мероприятий по повышению эффективности перевозочного процесса, увеличению скорости доставки и надежности, снижению рисков

и издержек¹ на организацию перевозочного процесса.

Одной из таких программ и стало появление нового продукта, услуги «Грузовой экспресс». Формат услуги аналогичен ускоренным контейнерным поездам в направлении «Европа — Российская Федерация — Китай» и предусматривает сервис несырьевого железнодорожного экспорта и импорта из России в Китай в обоих направлениях, а также услуги по перевозке скоропортящихся грузов в формате «Агроэкспресс» [7–10]. Основное конкурентное преимущество «Грузового экспресса» состоит в том, что грузоотправитель определяет подходящий для него подвижной состав по роду вагонов.

¹ Об утверждении политики клиентоориентированности холдинга «РЖД» в области грузовых перевозок // Распоряжение ОАО «РЖД» от 26 июля 2016 г. № 1489/р.

Для решения проблемы своевременной доставки грузов и повышения качества обслуживания клиентов, получающих услугу по перевозке грузов, предлагается усовершенствовать существующий механизм принятия заявки на перевозку грузов в части внесения нового блока, состоящего из конструктора предоставления комплекса услуг для клиентов, пользующихся грузовыми железнодорожными перевозками.

Целью статьи является описание базовых требований, основных положений и алгоритмического обеспечения конструктора формирования услуг доставки грузов железнодорожным транспортом. Поставленная цель достигается поэтапным решением задач формирования конструктора: анализ существующей нормативной базы по предоставлению дополнительных услуг при перевозке грузов железнодорожным транспортом; определение характеристик конструктора услуги и расчет базовой платы за ее оказание; разработка алгоритмического обеспечения формирования услуг доставки грузов железнодорожным транспортом на примере «Грузового экспресса».

Характеристика конструктора услуги «Грузовой экспресс»

Услуга «Грузовой экспресс» позволяет ОАО «РЖД» усовершенствовать работу по обеспечению эффективности перевозочной деятельности за счет повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта на транспортном рынке Российской Федерации, расширить номенклатуру и качество оказываемых услуг, привлечь дополнительные грузопотоки [11, 12].

Предпосылкой появления услуги «Грузовой экспресс» послужили отправительские маршруты, предназначенные для одного грузоотправителя (грузополучателя), предъявляющего к отправке состав поезда установленной массы или длины, формируемого на пути необщего пользования или железнодорожной станции. Однако отправительские маршруты предназначены для клиентов с большими объемами (более 50 ваг/сут) погрузки (выгрузки), а услуга «Грузовой

экспресс»² является аналогом для клиентов со средними (от 20 до 50 ваг/сут) и малыми (до 20 ваг/сут) объемами отправки и является сборным отправительским маршрутом.

Следование поездов по технологии «Грузового экспресса» осуществляется по графику с согласованным временем отправления и прибытия на станции расформирования (обмена групп), вагоно-место бронируется клиентом в зависимости от его потребностей. Рассматриваемая технология в значительной степени позволяет конкурировать с автомобильным транспортом за счет увеличения в несколько раз скорости доставки, по сравнению с повагонными отправками, что является очень актуальным вопросом в связи с оттоком малых партий грузов на автомобильный транспорт в последние годы [13, 14].

При оформлении перевозки с использованием «Грузового экспресса» грузоотправитель вправе выбрать необходимый набор услуг (пакет), зачастую основываясь на экспертных оценках, не выполняя техническую, технологическую и экономическую оценку выбранных услуг. Предлагаемый в статье конструктор услуг позволит выбирать наиболее целесообразные и выгодные услуги для грузовладельца с расчетными показателями его эффективности. Наименование пакета представляет собой шифр, которой указывается в железнодорожной транспортной накладной в графе «Особые заявления и отметки отправителя» и представляет собой комбинацию букв и цифр³. Расчет стоимости перевозки определяется положениями Прейскуранта № 10-01⁴ и дополнительным сбором за оказание услуги. Величина комплексной стоимости услуг складывается из базовой платы за оказание услуги

² Типовым технологическим процессом организации доставки грузов с использованием услуги «Грузовой экспресс», утвержденным распоряжением ОАО «РЖД» от 30 декабря 2016 г. № 2817р.

³ Типовой технологией формирования и отправления поездов в рамках оказания услуги «Грузовой экспресс», утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 24 июля 2019 г. № 1569/р.

⁴ Прейскурант № 10-01. Тарифы на перевозки грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые Российскими железными дорогами. Тарифное руководство № 1. Ч. 1. Правила применения тарифов // Постановление Федеральной энергетической комиссии Российской Федерации от 17 июня 2003 г. № 47-т/5. — М: ФЭК РФ, 2003. — 153 с.

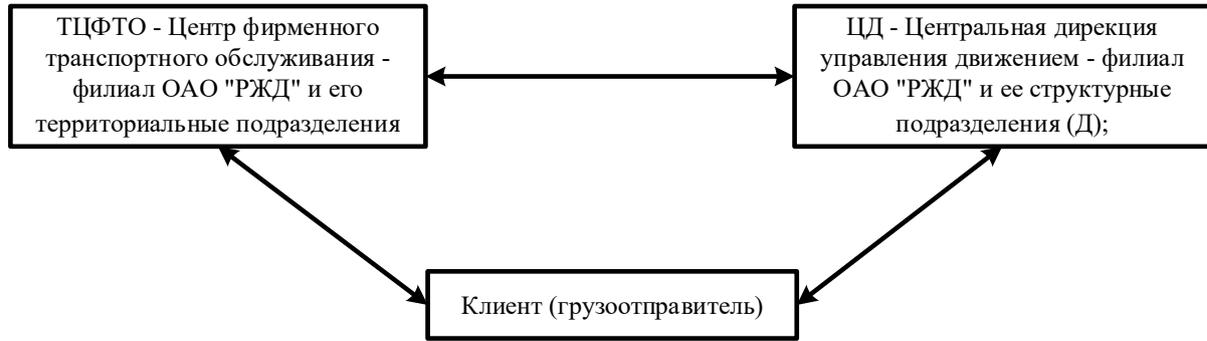


Рис. 1. Участники конструктора «Грузовой экспресс» в процессе доставки грузов

и стоимости аксессуарных опций согласно выбранному пакету услуг. Определение базовой платы за оказание услуги производится в соответствии с протоколом заседания правления ОАО «РЖД» от 12 сентября 2016 г. № 30. Стоимость аксессуарных опций в рамках каждого пакета определяется с учетом стоимости оказания этих услуг филиалами ОАО «РЖД» или субподрядчиками [15, 16].

Расчет базовой стоимости платы за оказание услуги (C_0) рассчитывается по формуле:

$$C_0 = \left(\frac{C_{\text{ваг}}}{24} \cdot K_{\text{доп}} \right) \cdot (t_{\text{норм}} - (t_{\text{ф}} + t_{\text{д}})),$$

где $C_{\text{ваг}}$ — ставка за вагон, руб/сут;

$K_{\text{доп}}$ — коэффициент за использование услуги «Грузовой экспресс»;

$t_{\text{норм}}$ — нормативное время доставки, ч;

$t_{\text{ф}}$ — время формирования и расформирования состава поезда «Грузовой экспресс», ч;

$t_{\text{д}}$ — договорное время доставки в рамках услуги «Грузовой экспресс», ч.

Предлагаемая формула отличается от действующего механизма расчета учетом дополнительного коэффициента на использование услуги «Грузовой экспресс», который позволяет наиболее точно определить размер базовой стоимости. Участниками конструктора при организации процесса доставки грузов с использованием услуги «Грузовой экспресс» являются центр фирменного транспортного обслуживания и его территориальные подразделения (ТЦФТО), центральная дирекция управления движением (Д) и грузоотправитель. Участники конструктора «Грузовой

экспресс» в процессе доставки грузов представлены на рис. 1.

Процесс оказания услуги начинается с подачи клиентом заявки (обращении к перевозчику) в офис обслуживания клиентов ТЦФТО или на электронной торговой площадке «Грузовые перевозки» (интернет-ресурс). После этого ТЦФТО ОАО «РЖД» производится процесс обработки заявки путем подготовки предложения (набора услуг) для грузоотправителя/грузополучателя с последующим оформлением договора на оказание услуг при взаимодействии с другими дирекциями.

Маршрут следования поезда с предоставлением услуги выбирается в соответствии с утвержденным планом формирования. В случае пересечения рассчитываемого маршрута с грузонапряженными участками рассматривается возможность их параллельного обхода, в том числе через малоинтенсивные линии [17, 18].

Отправление поезда «Грузовой экспресс» осуществляется по нитке нормативного графика. По диспетчерским участкам такие поезда следуют согласно нормативному графику, а в случае его нарушения поездной диспетчер и машинист принимают меры по вводу в график опаздывающего поезда. Использование «жестких» ниток графика движения поездов позволяет полностью исключить нарушение сроков доставки грузов (порожных вагонов) для данного типа отправок [19, 20].

Методика формирования услуги состоит из распределения функциональных областей взаимодействия при оказании услуги перевозчиком (ОАО «РЖД») между ЦД и ТЦФТО. Распределение функциональных областей

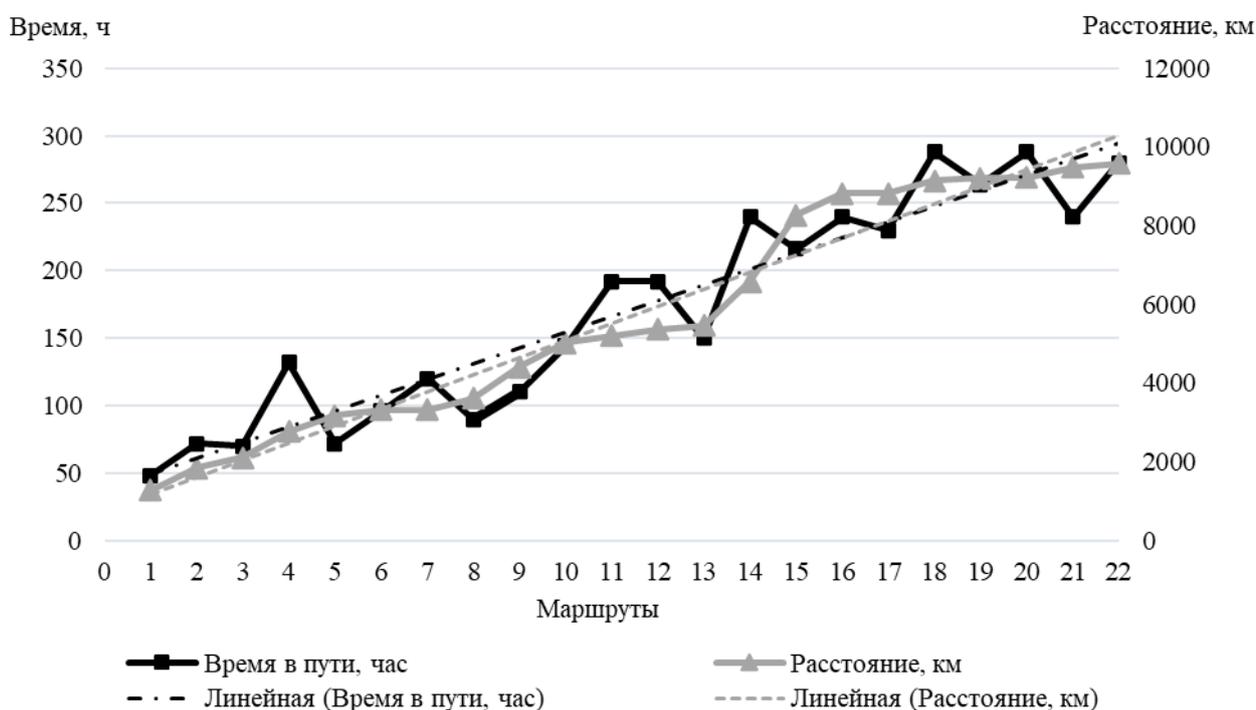


Рис. 2. Диаграмма зависимости времени в пути от расстояния перевозки маршрутов следования поездов «Грузовой экспресс»

рассматривается по трем признакам: по функциям прогнозирования и планирования, по функциям операционной деятельности и по техническому и информационному взаимодействию.

При предоставлении услуги на этапе планирования осуществляется изучение потребностей транспортного рынка в оказании данной услуги в единичном и регулярном сообщении. Производится расчет прогнозируемых размеров перевозок в грузовом и порожнем сообщении. Устанавливается порядок формирования, отправления, проследования поездом попутных станций в рамках оказания услуги [21, 22].

При оперативном планировании учитывается посуточный план отправления поездов, контроль за их продвижением и внесение корректировок в среднесрочное планирование с целью повышения вероятности прибытия партии груза в срок, установленный договором перевозки.

По каждому направлению перевозки с предоставлением услуги разрабатывается техническое информационное взаимодействие и поддержка технологии формирования и отправления поездов с учетом местных условий, к которым можно отнести наличие

груженых и порожних вагонов различных категорий, контроль и анализ выполнения обязательств в рамках оказания услуги, на основании нормативных документов⁵.

Перевозки в рамках услуги «Грузовой экспресс» на сети ОАО «РЖД» организованы на основании нормативных документов. Дальность маршрутов составляет от 1278 до 9481 км. За сутки состав поезда преодолевает расстояние от 550 до 1000 км.

В статье выполнен расчет кратчайших расстояний перевозки и времени в пути по наиболее актуальным маршрутам⁶ и построена диаграмма зависимости времени в пути от расстояния перевозки существующих маршрутов (рис. 2) для установления зависимости изменения участковой скорости от расстояния перевозки.

⁵ Прейскурант № 10-01. Тарифы на перевозки грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые Российскими железными дорогами. Тарифное руководство № 1. Ч. 1. Правила применения тарифов // Постановление Федеральной энергетической комиссии Российской Федерации от 17 июня 2003 г. № 47-т/5. — М: ФЭК РФ, 2003. — 153 с.

⁶ Грузовой экспресс с возможностью бронирования вагоно-места. — URL: <https://ozd.rzd.ru/ru/4116/page/103290?id=5105>.

На основании анализа данных о действующих маршрутах и использовании линейной аппроксимации установлена зависимость между расстоянием и временем в пути. Таким образом, при увеличении протяженности маршрута следования поезда увеличивается его участковая скорость.

Реализация конструктора услуги «Грузовой экспресс» на полигоне Октябрьской железной дороги

Октябрьским ТЦФТО принимаются меры по продвижению перевозок в рамках услуги «Грузовой экспресс». Услуга «Грузовой Экспресс» доступна на направлении Санкт-Петербург — Сортировочный — Московский — Инская, имея максимально полезную дальность на самом востребованном направлении транспортного коридора «Запад — Восток» [12]. Услуга «Лесной экспресс» доступна на направлении Великие Луки — Нигозеро. Доставка лесных грузов осуществляется за двое суток, доступна для 17 грузоотправителей на 13 станциях погрузки. Данные о реализации услуги⁷ представлены в табл. 1.

Наблюдается снижение количества вагонов, отправленных в рамках услуги по сравнению с аналогичным периодом 2019 года, когда данная услуга впервые была реализована. Негативное изменение спроса на услугу связано с уменьшением объема выпускаемой продукции (железнодорожных вагонов) АО «Тихвинский

⁷ Центр продажи услуг «Грузовой и лесной экспресс». URL: <https://ozd-center.ru/express>.

вагоностроительный завод». Снижение количества производимых вагонов обусловлено профицитом подвижного состава, что привело к повышению количества заказов на производство вагонов от лизинговых компаний.

Планируется начало перевозок по замкнутому маршруту Неболчи — Решетниково. Ожидаемый поездопоток составит 4 пары поездов в месяц. На сегодняшний день на стадии артельной разработки с Октябрьской дирекцией управления движением находятся «Грузовые экспрессы» по маршрутам Сала — Пирит и Заневский пост — Находка. Оказание данной услуги, при условии широкого распространения на сети железных дорог, может использоваться в качестве инструмента грузовых перевозок в концепции организации и оптимизации поездопотоков при вводе выделенных линий.

Алгоритмическое обеспечение конструктора формирования услуг доставки грузов на примере «Грузового экспресса»

Процедура предоставления услуги «Грузовой экспресс» приводится в действие при соблюдении следующих условий:

- 1) анализ возможности предоставления услуги;
- 2) экономическая целесообразность;
- 3) наличие клиента и его согласие на предоставление услуги.

Формирование конструктора предлагаемых услуг для конкретного клиента состоит из следующих этапов: определение возможного

Таблица 1. Перечень грузов и вагонов, отправленных и прибывших в составе поездов «Грузового экспресса» на Октябрьской железной дороге за 7 месяцев 2020 года

Станция отправления (назначение)	Наименование груза	Род подвижного состава	Количество отправленных вагонов	Количество прибывших вагонов	Объемы перевозок, т
Тихвин	Порожние	Полувагон	342	—	0
Шушары	Мясо домашних животных во всяком виде, кроме консервов	Платформа	142	—	3834
Верево	Бензин моторный	Цистерна	—	194	12 028
Орехово	Бензин моторный	Цистерна	—	148	13 268
Итого			484	342	29 130

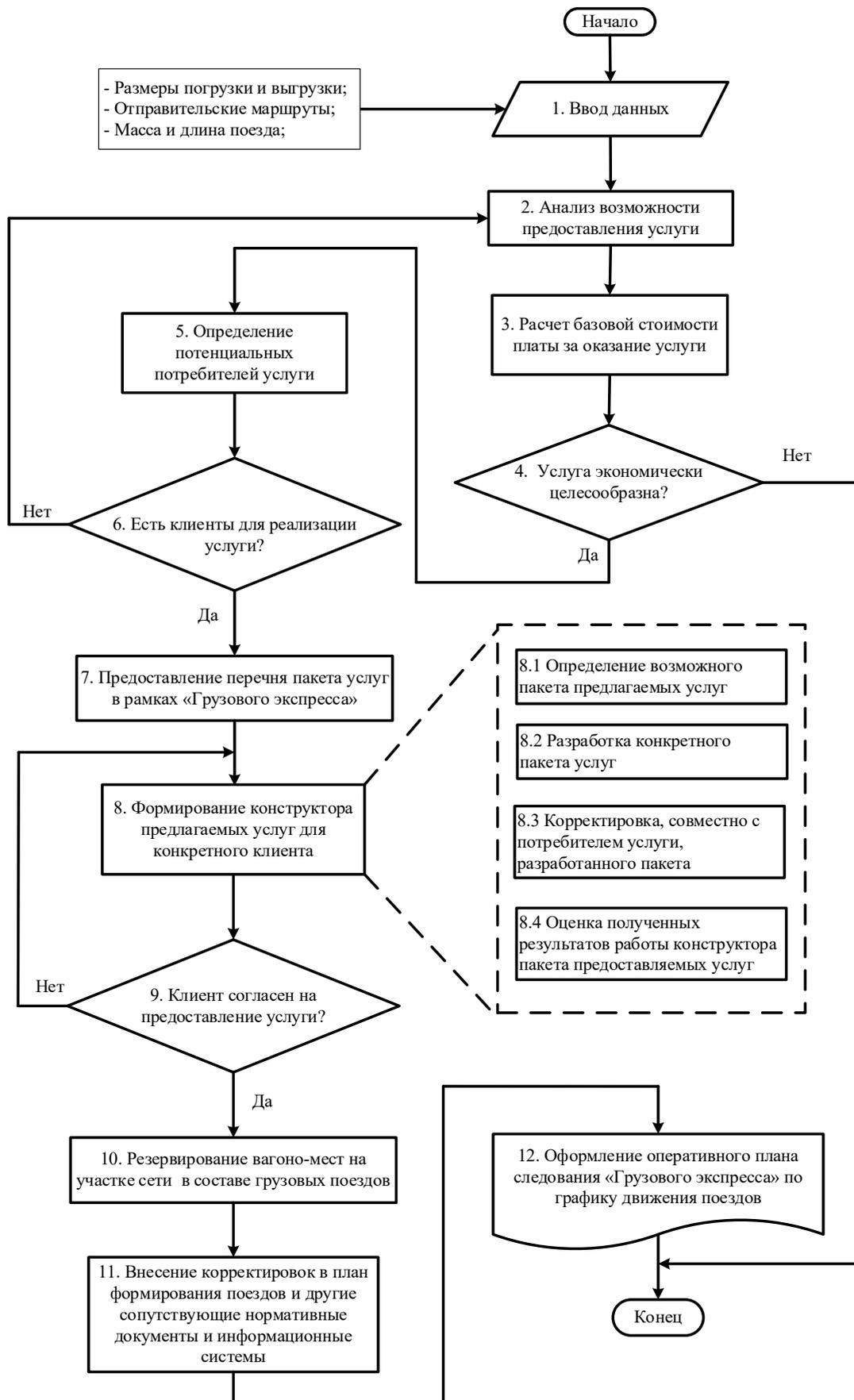


Рис. 3. Алгоритмическое обеспечение конструктора формирования услуг доставки грузов железнодорожным транспортом на примере «Грузового экспресса»

Таблица 2. **Способ массового внедрения конструктора услуг доставки грузов на примере «Грузового экспресса»**

Элемент	Информационная составляющая	Операционная (техническая) составляющая		Экономическая составляющая
Цель	Увеличение количества пользователей услуги	Повышение качества и конкурентоспособности продукта		Снижение себестоимости перевозки, увеличение доходов
Отв. сторона	ТЦФТО и подразделения	ТЦФТО и подразделения	ЦД и подразделения	ТЦФТО, ЦД и подразделения
Процесс решения	– реклама; – работа с клиентами (пользователями услуг); – предоставление специальных условий (специальных предложений)	– увеличение количества компонентов услуги (дополнения, связанные с организацией перевозки); – размещение в каталоге услуг в области грузовых перевозок на интернет-ресурсе etpgr.rzd.ru ¹	– разработка расписания движения поезда в соответствии с требованиями заказчика в действующем графике движения; – повышение взаимодействия между железными дорогами при реализации услуги; – увеличение количества станций, оказывающих услуги; – совершенствование технического процесса (железнодорожных станций) с целью максимального сокращения времени на формирование и расформирования состава поезда «Грузовой экспресс»	Получение экономического эффекта от мероприятий информационной и операционной (технической) составляющих
Результат	Популярный качественный продукт (услуга) — инструмент организации и оптимизации поездопотоков			

¹ Электронная торговая площадка «Грузовые перевозки».

пакета предлагаемых услуг; разработка конкретного пакета услуг; корректировка разработанного пакета совместно с потребителем; оценка полученных результатов работы конструктора пакета предоставляемых услуг. Блок-схема предоставления услуги «Грузовой экспресс» представлена на рис. 3.

При соблюдении условий и формировании конструктора услуги по согласованию с клиентом производится резервирование вагоно-мест на участке сети в составе грузовых поездов,

вносятся корректировки в план формирования поездов, по результатам которых оформляется оперативный план следования состава поезда «Грузовой экспресс» в соответствии с разработанным графиком движения.

Для широкого распространения услуги предлагается следующий способ массового внедрения конструктора, представленный в табл. 2.

Схема способа массового внедрения конструктора услуг доставки грузов на примере «Грузового экспресса» представлена на рис. 4.

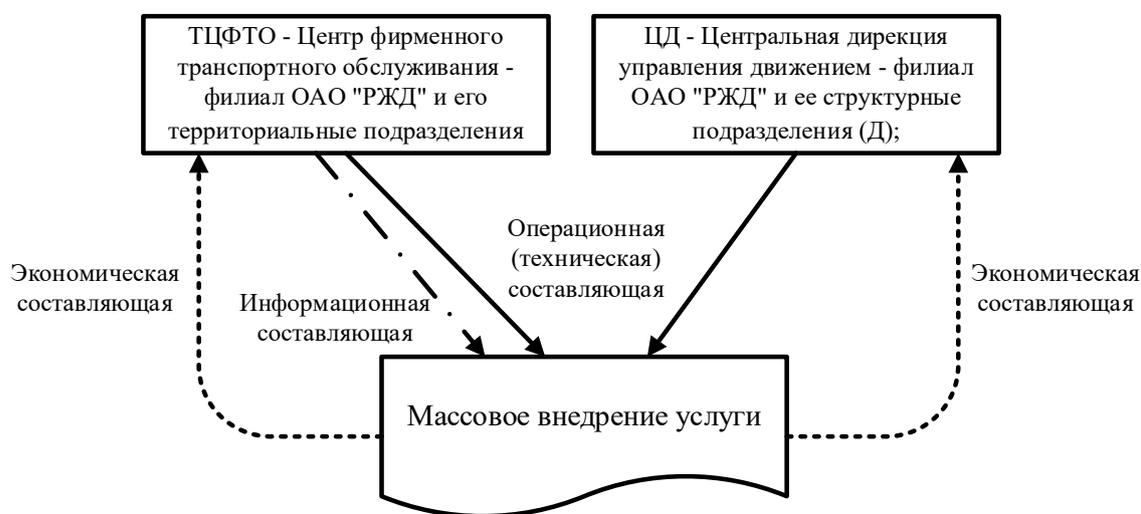


Рис. 4. Способ массового внедрения конструктора услуг доставки грузов на примере «Грузового экспресса»

При рассмотрении способа массового внедрения услуги «Грузовой экспресс» в рамках информационной, операционной (технической) и экономических составляющих определены ответственные стороны с указанием процессов решения (популяризации услуги), в рамках видов деятельности и компетенций сотрудников структурных подразделений холдинга ОАО «РЖД». Результатом предлагаемого способа является инструмент организации и оптимизации поездопотоков, имеющий спрос на рынке транспортных услуг железнодорожного транспорта, приносящий дополнительный доход компании и обеспечивающий рациональное использование технических средств и инфраструктуры, направленный на повышение пропускной способности участков железнодорожной сети.

Заключение

На основании вышеизложенного материала можно сделать следующие выводы об эффективности массового внедрения конструктора услуг для грузовых перевозок:

– несмотря на турбулентные изменения экономики в последние годы на полигоне деятельности Октябрьской железной дороги, услуга «Грузовой экспресс» пользуется спросом у клиентов компании ОАО «РЖД»;

– расширение перечня услуг и внедрение новых продуктов является одним из значимых направлений для ОАО «РЖД» на современном этапе развития;

– дегрессия рисков нарушения сроков доставки и повышение надежности перевозок относится к приоритетным задачам ОАО «РЖД», при этом услуга «Грузовой экспресс» является одним из эффективных способов их решения.

– разработка и реализация новых услуг и продуктов требуют совершенствования моделей и методов оптимизации поездопотоков, что является значимой научно-прикладной задачей для повышения эффективности перевозок на железнодорожном транспорте.

Одним из значимых результатов реализации и функционирования конструктора является отсутствие задержек вагонов (отправок)

на сортировочных станциях ввиду отсутствия переработки (следование «напрямую»), экономия возникает за счет минимизации простоя вагонов в пути следования и времени, затрачиваемого на выполнение технологических операций ввиду обхода сортировочных станций и «жестких» ниток графика движения поездов.

Негативными факторами, сдерживающими широкое применение предлагаемого конструктора, являются: недоформирование составов поезда по длине ввиду невыполнения грузоотправителями запланированных объемов перевозок по согласованным заявкам; индивидуальная разработка маршрута следования (в основном для крупных клиентов); ограниченное количество маршрутов. Эффективность оказываемой услуги ограничена выполнением всеми участниками процесса договорных обязательств без отклонения от запланированных параметров, в противном случае перевозчик несет риски, связанные с материальными потерями.

Направление дальнейших исследований лежит в области решения практических задач по совершенствованию системы управления перевозками при работе со специализированными линиями, формированию модели оптимизации поездопотока при вводе выделенных линий и разработки технологии работы участка железнодорожной линии после внедрения способа массового внедрения конструктора услуг доставки грузов на примере «Грузового экспресса». ▲

Библиографический список

1. Алферова А. А. Экономическое обоснование эффективности ускорения доставки грузов / А. А. Алферова // Транспортное дело России. — 2016. — № 1. — С. 132–135.
2. Замковой А. А. Анализ потенциала переключения транзитных грузов на железнодорожный транспорт / А. А. Замковой, Р. В. Мартышкин, С. П. Кудияров // Экономика железных дорог. — 2019. — № 11. — С. 17–24.
3. Xu M. Drawing the Economical Balanced Line for Railway and Sea Way Transportation between Iran and China / M. Xu, B. Besharati // International Journal of Business and Management. — 2017. — № 5. — Pp. 2017–2231. — DOI: 10.5539/ijbm.v12n5p217.
4. Chen X. Game-Theoretic Comparison Approach for Intercontinental Container Transportation: A Case between China and Europe with the B&R Initiative / X. Chen, X. Zhu, Q. Zhou et al. // Journal of Advanced Transportation. — URL:

- <https://www.hindawi.com/journals/jat/2017/3128372/>. — DOI: 10.1109/CNS48642.2020.9162290.
5. Xu Z. Eurasian Rail Freight in the One Belt One Road Era / Z. Xu, H. J. Schramm // Conference: Nofoma (The Nordic Logistics Research Network). — 2018. — At: Kolding, Denmark. — Pp. 1–19.
 6. Hummels D. Time as a Trade Barrier / D. Hummels, G. Schaur // American Economic Review. — 2013. — № 7. — Pp. 2935–2959. — DOI: 10.1257/aer.103.7.2935.
 7. Коровяковский Е. К. Пути повышения эффективности логистического обеспечения деятельности международной транспортной системы «Агроэкспресс» на основе инструментальной однокритериальной оптимизации / Е. К. Коровяковский, М. Б. Сабуров // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 276–285. — DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-276-285/.
 8. Дмитриев А. В. Развитие транспортно-логистического сервиса в агропромышленном комплексе / А. В. Дмитриев // Логистические системы в глобальной экономике. — 2021. — № 11. — С. 139–143.
 9. Палеев Д. Л. Проблемы интеграции транспортно-логистической инфраструктуры России и Казахстана в проекте шелкового пути / Д. Л. Палеев, М. В. Черняев, Ю. Н. Мосейкин // Экономические системы. — 2022. — Т. 15. — № 1. — С. 231–241.
 10. Ромашкин Р. А. Приоритеты и перспективные направления развития российского агропродовольственного экспорта / Р. А. Ромашкин, О. В. Черкасова, М. В. Авдеев // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. — 2020. — № 1(58). — С. 38–45. — DOI: 10.33938/201-38.
 11. Задорин С. А. На основе открытого диалога и конструктивных решений / С. А. Задорин // Железнодорожный транспорт. — 2019. — № 10. — С. 9–13.
 12. Ким А. С. Услуга «Грузовой экспресс» как способ повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта / А. С. Ким, Е. Д. Псеровская // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2020. — № 2(53). — С. 37–45.
 13. Vakulenko S. P. Technical solutions for loading and unloading operations on freight trains on an electrified track of a logistic terminal / S. P. Vakulenko, A. M. Nasybullin // T-Comm. — 2020. — Vol. 14. — № 4. — С. 66–72. — DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-4-66-72.
 14. Прокофьев М. Н. Перспективы транспортного коридора «Север — Юг» / М. Н. Прокофьев, М. М. Тохиров // Мир транспорта. — 2019. — Т. 17. — № 5(84). — С. 200–213. — DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-5-200-213.
 15. Псеровская Е. Д. Повышение эффективности услуги по ускоренной доставке грузов в направлении Дальнего Востока / Е. Д. Псеровская, А. С. Ким, О. А. Кузьмина // Транспорт Урала. — 2019. — № 2(61). — С. 32–37. — DOI: 10.20291/1815-9400-2019-2-32-37.
 16. Белоусов М. В. Забота о клиенте — главная задача / М. В. Белоусов // Железнодорожный транспорт. — 2016. — № 12. — С. 14–17.
 17. Ковалев К. Е. Разработка механизмов повышения эффективности функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин, О. А. Медведь // Автоматика на транспорте. — 2022. — Т. 8. — № 2. — С. 150–161. — DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-2-150-161.
 18. Ковалев К. Е. Комплексный синергетико-индикаторный подход к управлению процессами перевозок на интенсивных и малодеятельных линиях / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин // Автоматика на транспорте. — 2021. — Т. 7. — № 2. — С. 252–267. — DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-252-267.
 19. Комовкина Н. С. Анализ развития схем железнодорожного обслуживания морских портов / Н. С. Комовкина, П. К. Рыбин // Актуальные проблемы управления перевозочным процессом. — 2010. — Вып. 10. — С. 131–141.
 20. Groshov G. M. Автоматизация информационного обеспечения независимых участников мультимодальных перевозок контейнеров в морской порт в транспортном узле / Г. М. Грошев, Н. В. Климова, А. В. Сугоровский и др. // Автоматика на транспорте. — 2018. — Т. 4. — № 3. — С. 315–332.
 21. Свешникова Ю. С. Состояние и перспективы развития специализированных высокоскоростных железнодорожных грузовых перевозок / Ю. С. Свешникова, С. В. Карасев // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. — 2022. — № 1(4). — С. 71–83. — DOI: 10.52170/2712-9195/2022_1_71.
 22. Мамаев Э. А. Развитие транспортно-логистических услуг на припортовых железных дорогах в условиях цифровой трансформации отрасли / Э. А. Мамаев, В. Н. Зубков, Е. А. Чеботарева // Наука и техника транспорта. — 2021. — № 4. — С. 43–49. — doi: 10.53883/20749325_2021_04_43.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2022, Vol. 8, No. 4, pp. 367–376
DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-367-376

Constructor to Form Services of Railway Freight on Russian Railway Ltd Network

Information about authors

Vorobiev I. M., Department Graduate Student.

E-mail: iv-vorobeow2011@yandex.ru

Novichikhin A. V., Doctor in Engineering, Department Professor.

E-mail: novitchihin@bk.ru

Kovalev K. E., PhD in Engineering, Department Associate Professor.
E-mail: kovalev_kostia@mail.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Department of "Logistics and Commercial Work", Saint Petersburg

Abstract: The article defines the perspectives of "Freight Express" Service introduction which was approved on the polygons of Oktyabr'saya, Moscow, West-Siberian railways of Russian Federation. The task for service constructor formation for freight by railway transport with the purpose to rise route speed of train traffic was considered on the given service example. The given service characteristics and its realization analysis on the railway activity polygon are

presented with the perspective of this trend development. There has been fulfilled being pursued work analysis on the attraction of new clients for railway transport, the expansion of provided service list and of individual client-oriented approach while rendering services and while interaction with Traffic Management Head Office. The proposed scheme of informational accompanying of freight service by railway transport on “Freight Express” example describes the service rendering organizational process. In comparison with the service rendering existing approach, the approach algorithmization and automation for wide spread on railway network is proposed.

Keywords: freight process management; railway transport; freight and commercial work; delivery speed; rigid threads of train timetable; formation constructor for freight delivery services.

References

- Alferova A. A. Ekonomicheskoe obosnovanie effektivnosti uskoreniya dostavki gruzov [Economic substantiation of the efficiency of cargo delivery acceleration]. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia]. 2016, I. 1, pp. 132–135. (In Russian)
- Zamkovoy A. A., Martyskin R. V., Kudjarov S. P. Analiz potentsiala pereklyucheniya tranzitnykh gruzov na zhe-leznodorozhnyy transport [Analysis of the potential for switching transit cargo to rail transport]. *Jekonomika zheleznih dorog* [Railway economics]. 2019, I. 11, pp. 17–24. (In Russian)
- Xu M., Besharati B. Drawing the Economical Balanced Line for Railway and Sea Way Transportation between Iran and China. *International Journal of Business and Management*, 2017. № 5, pp. 2017–2231. DOI: 10.5539/ijbm.v12n5p217.
- Chen X., Zhu X., Zhou Q. Game-Theoretic Comparison Approach for Intercontinental Container Transportation: A Case between China and Europe with the B&R Initiative. *Journal of Advanced Transportation*. URL: <https://www.hindawi.com/journals/jat/2017/3128372/>. DOI: 10.1109/CNS48642.2020.9162290.
- Xu Z., Schramm H. J. Eurasian Rail Freight in the One Belt One Road Era. Conference: Nofoma (The Nordic Logistics Research Network), 2018, at: Kolding, Denmark, pp. 1–19.
- Hummels D., Schaur G. Time as a Trade Barrier. *American Economic Review*, 2013, I. 7, pp. 2935–2959. DOI: 10.1257/aer.103.7.2935.
- Korovjakovskij E. K., Saburov M. B. Puti povysheniya jeffektivnosti logisticheskogo obespecheniya dejatel'nosti mezhdunarodnoj transportnoj sistemy “Agrojekspress” na osnove instrumentariya odnokriterial'noj optimizacii [Ways to improve the efficiency of logistics support for the activities of the international transport system “Agroexpress” on the basis of a single-criteria optimization toolkit]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2022, vol. 19, I. 2, pp. 276–285. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-276-285/. (In Russian)
- Dmitriev A. V. Razvitie transportno-logisticheskogo servisa v agropromyshlennom komplekse [Development of transport and logistics services in the agro-industrial complex]. *Logisticheskie sistemy v global'noj jekonomike* [Logistics systems in the global economy]. 2021, I. 11, pp. 139–143. (In Russian)
- Paleev D. L., Chernjaev M. V., Mosejkin Ju. N. Problemy integracii trans-portno-logisticheskoy infrastruktury Rossii i Kazahstana v proekte shel-kovogo puti [Problems of integration of the transport and logistics infrastructure of Russia and Kazakhstan in the Silk Road project]. *Jekonomicheskie sistemy* [Economic systems]. 2022, vol. 15, I. 1, pp. 231–241. (In Russian)
- Romashkin R. A., Cherkasova O. V., Avdeev M. V. Prioritety i perspektivnye napravleniya razvitiya rossijskogo agropredovol'stvennogo jeksporta [Priorities and perspective directions of development of Russian agro-food export]. *Jekonomika, trud, upravlenie v sel'skom hozjajstve* [Economics, labor, management in agriculture]. 2020, I. 1(58), pp. 38–45. DOI: 10.33938/201-38. (In Russian)
- Zadorin S. A. Na osnove otkrytogo dialoga i konstruktivnyh reshenij [Based on an open dialogue and constructive solutions]. *Zheleznodorozhnyj transport* [Railway transport]. 2019, I. 10, pp. 9–13. (In Russian)
- Kim A. S., Pserovskaja E. D. Usluga “Gruzovoj jekspress” kak sposob povysheniya konkurentosposobnosti zheleznodorozhnogo transporta [“Freight Express” service as a way to increase the competitiveness of railway transport]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya* [Bulletin of the Siberian State University of Communications]. 2020, I. 2(53), pp. 37–45. (In Russian)
- Vakulenko S. P., Nasybullin A. M. Technical solutions for loading and unloading operations on freight trains on an electrified track of a logistic terminal. *T-Comm*, 2020, vol. 14, I. 4, pp. 66–72. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-4-66-72.
- Prokof'ev M. N., Tohirov M. M. Perspektivy transportnogo koridora “Sever — Jug” [Prospects for the North — South Transport Corridor]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2019, vol. 17, I. 5(84), pp. 200–213. DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-5-200-213. (In Russian)
- Pserovskaja E. D., Kim A. S., Kuz'mina O. A. Povyshenie jeffektivnosti uslugi po uskorennoj dostavke gruzov v napravlenii Dal'nego Vostoka [Increasing the efficiency of the service for the accelerated delivery of goods in the direction of the Far East]. *Transport Urala* [Ural transport]. 2019, I. 2(61), pp. 32–37. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-2-32-37. (In Russian)
- Belousov M. V. Zabota o kliente — glavnaja zadacha [Customer care is the top priority]. *Zheleznodorozhnyj transport* [Railway transport]. 2016, I. 12, pp. 14–17. (In Russian)
- Kovalev K. E., Novichihin A. V., Medved' O. A. Razrabotka mehanizmov po-vysheniya jeffektivnosti funkcionirovaniya malointensivnyh zheleznodo-rozhnyh linij [Development of mechanisms for increasing the efficiency of low-intensity railway lines]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2022, vol. 8, I. 2, pp. 150–161. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-2-150-161. (In Russian)
- Kovalev K. E., Novichihin A. V. Kompleksnyj sinergetiko-indikatornyj podhod k upravleniju processami perezovok na intensivnyh i malodejatel'-nyh liniyah [Integrated synergetic-indicator approach to the management of transportation processes on intensive and low-density lines]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2021, vol. 7, I. 2, pp. 252–267. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-252-267. (In Russian)
- Komovkina N. S., Rybin P. K. Analiz razvitiya shem zheleznodorozhnogo ob-slu-zhivaniya morskikh portov [Analysis of the development of railway service schemes for seaports]. *Aktual'nye problemy upravleniya perezovozhnyim processom* [Actual problems of transportation process management]. 2010, I. 10, pp. 131–141. (In Russian)
- Groshev G. M., Klimova N. V., Sugorovskij A. V. Avtomatizacija informacionnogo obespecheniya nezavisimyh uchastnikov mul'timodal'nyh perezovok kontejnerov v morskoy port v transportnom uzle [Automation of information support for independent participants in multimodal transportation of containers to the seaport in the transport hub]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2018, vol. 4, I. 3, pp. 315–332. (In Russian)
- Sveshnikova Ju. S., Karasev S. V. Sostojanie i perspektivy razvitiya specia-lizirovannyh vysokoskorostnyh zheleznodorozhnyh gruzovyh perezovok [Status and development prospects of specialized high-speed rail freight traffic]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy transporta* [Fundamental and applied issues of transport]. 2022, I. 1(4), pp. 71–83. DOI: 10.52170/2712-9195/2022_1_71. (In Russian)
- Mamaev Je. A., Zubkov V. N., Chebotareva E. A. Razvitie transportno-logisticheskikh uslug na priportovyh zheleznih dorogah v uslovijah cifro-voj transformacii otrasli [Development of transport and logistics services on port railways in the context of digital transformation of the industry]. *Nauka i tehnika transporta* [Science and technology of transport]. 2021, I. 4, pp. 43–49. DOI: 10.53883/20749325_2021_04_43. (In Russian)

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И МОДЕЛИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВТОРЫМ ЛОКОМОТИВОМ ПРИ ВИРТУАЛЬНОЙ СЦЕПКЕ

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

БЕСТЕМЬЯНОВ Петр Филимонович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»; e-mail: bestpetr4@gmail.com

БАЛАКИНА Екатерина Петровна, канд. техн. наук, доцент кафедры «Управление и защита информации»; e-mail: balakina_e@list.ru

ПУДОВИКОВ Олег Евгеньевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы»; e-mail: olegper@mail.ru

Российский университет транспорта (МИИТ), Москва

Рассмотрены модель системы автоматического управления локомотивом второго поезда при виртуальной сцепке и способы анализа качества управления. Управляемой величиной является рассчитываемое в процессе движения поездов расстояние между «хвостом» первого и «головой» второго поезда, обеспечивающее безопасность движения при экстренном торможении первого поезда. Это расстояние названо «длиной виртуальной сцепки». Введена формализация, позволяющая учесть отсутствие синхронизации при передаче информации о координате и скорости первого локомотива и такта работы цифровой системы управления вторым локомотивом. Рассмотрены погрешности измерений скорости и координат, связанные с запаздыванием при передаче информации, возможность отказа от декодирования получаемой информации по радиоканалу приемником второго локомотива. При определении длины виртуальной сцепки рассмотрены различные способы ее верхней оценки, выбран способ, учитывающий измерение скорости движения и координаты обоих поездов, путь экстренного торможения первого поезда, возможность начала экстренного торможения первого поезда в начале цикла передачи информации, методические и инструментальные погрешности измерения. В качестве оператора, преобразующего рассогласования при выборе управления вторым локомотивом, рассмотрен цифровой пропорциональный интегральный дифференцирующий закон управления. Разработана модель системы автоматического управления, относящаяся к классу импульсных систем, особенностью которой является расчет управляющего воздействия в процессе движения поездов. Параметрический синтез системы автоматического управления рекомендуется проводить методами имитационного моделирования. Выбраны критерии качества управления.

Ключевые слова: виртуальная сцепка; экстренное торможение; служебное торможение; система автоматического управления; радиоканал; длина виртуальной сцепки; модель системы; имитационное моделирование; закон управления; погрешности измерений; вычисление длины виртуальной сцепки; критерии качества управления.

DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-377-388

▼ Введение

Одним из возможных направлений повышения пропускной способности железнодорожных линий является использование «виртуальной сцепки», при которой по радиоканалу первым ведущим поездом передается второму поезду информация о своей координате и скорости. Второй поезд выбирает свой режим движения таким образом, чтобы при экстренном торможении первого поезда не произошло аварийного столкновения. Эта технология

является развитием направления, связанного с движением соединенных поездов, имеющих физическое объединение, реализованное сцепкой локомотива второго поезда с последним вагоном первого.

13 сентября 1972 г. первый соединенный поезд, в СССР оборудованный телемеханической системой «Братск 1», передающей команды управления локомотиву второго поезда, был успешно проведен на участке Вихоревка — Чуна Восточно-Сибирской железной дороги.

Эта система разработана в Московском институте инженеров железнодорожного транспорта (ныне Российский университет транспорта — РУТ (МИИТ)), использовала для обмена информацией между локомотивами высокочастотный канал связи по контактной сети и была реализована еще на навесных полупроводниковых элементах [1]. В 1973 г. уже на микросхемах модернизированный вариант системы (Братск 1 м.), выполненный на интегральных микросхемах, прошел успешные испытания на участке Россось — Лихая Юго-Восточной железной дороги. Это был первый опыт в нашей стране использования интегральной микросхемотехники на подвижном составе [2]. В дальнейшем технологией и системой управления соединенных поездов занимались ООО «АВП Технологии», АО «ВНИИЖТ», АО «Московский тормозной завод ТРАНСМАШ», ООО «НПО САУТ».

Ограниченность длины станционных путей создает трудности при формировании и разъединении соединенных поездов, что приводит к занятию горловин и перегонов. Этим недостатком лишена технология виртуальной сцепки. Информация при виртуальной сцепке о координате и скорости ведущего поезда передается по радиоканалу. Работы в этом направлении ведутся как в нашей стране, так и за рубежом [3–7]. При внедрении виртуальной сцепки необходимо решить ряд задач, связанных с обеспечением безопасности движения. В частности, необходимо разработать систему контроля целостности состава [8, 9], контроля исправности рельсов, реализуемой в современных системах в рамках «контрольного режима» [10], использовать радиоканал с высоким уровнем достоверности и защиты при обмене цифровой информацией, реализовать систему точного определения координат движущихся поездов, разработать систему автоматического управления движением второго поезда с определенными характеристиками качества управления и парированием с нормированной высокой вероятностью опасных отказов. Должны быть решены технологические проблемы, определяемые согласованием числа поездов с виртуальной сцепкой с количеством станционных путей [3].

В рамках данной статьи решается круг вопросов, связанных с принципами построения

системы автоматического управления движением второго из виртуально сцепленных поездов, разработки модели системы и методики анализа качества управления.

Целью системы управления второго поезда при виртуальной сцепке является обеспечение во время движения такого расстояния между «головой» второго и «хвостом» первого поезда, при котором экстренная остановка первого поезда не приводит к столкновению поездов. В дальнейшем для упрощения описания будем называть это расстояние длиной виртуальной сцепки — L . При создании системы управления необходимо выбрать оператора, преобразующий рассогласования Δ заданной и измеренной длиной виртуальной сцепки в сигнал управления режимами локомотива второго поезда. При тяговом приводе постоянного тока управление — это номер позиции управления N (тяговой, тормозной, выбег), при тяговом приводе на асинхронных двигателях — это сила тяги F_T , торможения $F_{\text{торм}}$ либо выбег.

Модель системы автоматического управления

Для описания модели управления используем следующие обозначения: пусть время $t = (m + \varepsilon)T$ для первого локомотива. Здесь $m = 0, 1, 2, \dots, 0 \leq \varepsilon \leq 1$ (рис. 1, а), T — шаг временной дискретизации при измерении координаты «головы» S_1^* и скорости V_1 первого поезда. Аналогично для второго поезда $t = (n + \varepsilon)T$, $n = 0, 1, 2, \dots, 0 \leq \varepsilon \leq 1$ (рис. 1, б), S_2 — координата «головы» и скорость V_2 второго поезда.

Такая формализация позволяет учесть отсутствие синхронизации при измерении координаты пути и скорости поездов. Шаг временной дискретизации T должен быть согласован с временем доставки информации по радиоканалу от первого локомотива ко второму. Так, если время передачи пакета незначительно меньше T , то координата пути и скорость первого локомотива, соответствующая моменту времени mT , получены вторым локомотивом в момент $(m + 1)T = (n + \varepsilon_1)T$ и, следовательно, запаздывают на T , что вносит дополнительную погрешность от запаздывания при определении рассогласования.

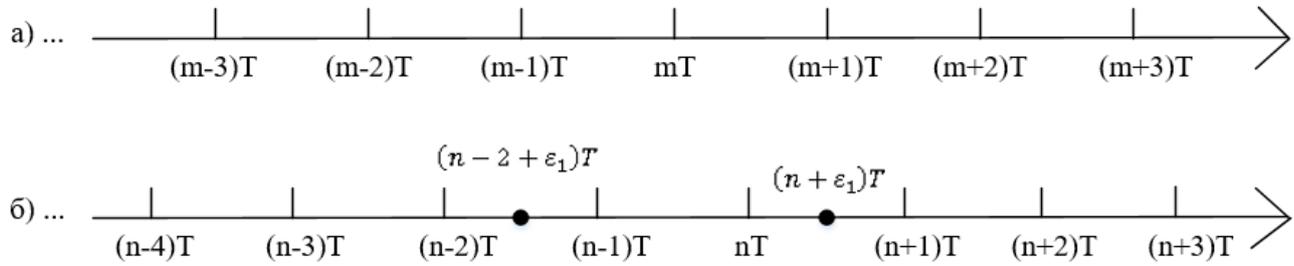


Рис. 1. Введение дискретного времени

Пусть l — длина первого поезда. Обозначим координату его «хвоста» как $S_1 = S_1^* - l$. Тогда в момент времени nT в системе управления второго поезда известны значение координаты «хвоста» первого поезда, измеренной в момент времени $(m-1)T = (n-2+\varepsilon_1)T$, и погрешность от запаздывания равна:

$$\Delta S_1[nT] = S_1[nT] - S_1[(n-2+\varepsilon_1)T]. \quad (1)$$

Эта величина соответствует ситуации, когда все последовательно передаваемые пакеты с первого локомотива принимаются вторым локомотивом и отсутствуют случаи отказа приемника от декодирования при обнаружении ошибки. Если первая передаваемая кодовая серия не принимается приемником, то

$$\Delta S_1[nT] = S_1[nT] - S_1[(n-3+\varepsilon_1)T]. \quad (2)$$

В общем случае, когда непринятными могут быть подряд k кодовых серий:

$$\Delta S_{1,k}[nT] = S_1[nT] - S_1[(n-2-k+\varepsilon_1)T]. \quad (3)$$

Аналогично погрешность от запаздывания при учете времени передачи информации составляет:

$$\Delta V_1[nT] = V_1[nT] - V_1[(n-2-k+\varepsilon_1)T]. \quad (4)$$

Максимальные значения погрешностей соответствуют $\varepsilon_1 = 0$ и $k = k_{\max}$. Пусть P — вероятность отказа от декодирования кодовых серий. События отказа от декодирования статистически независимы. Тогда вероятность того, что будет принята $(k+1)$ -я кодовая серия,

составляет $P^k(1-P)$. Величина k_{\max} , следовательно, и максимальная оценка погрешности от запаздывания могут быть приняты с определенной вероятностью. Данное рассмотрение соответствует ситуации, когда вероятность трансформации кодовой серии пренебрежимо мала. Современные методы помехозащитного кодирования позволяют решить эту задачу.

Кроме погрешностей ΔS_1 и ΔV_1 , определяемых запаздыванием, связанных с передачей информации с первого локомотива, имеют место методические и инструментальные погрешности измерения скорости и координаты. Пусть ΔS_{1a} , ΔS_{2a} , ΔV_{1a} , ΔV_{2a} — соответственно значения этих погрешностей измерения скорости и координаты первого и второго поездов. Погрешности ΔV_{1a} и ΔS_{1a} суммируются с погрешностями ΔS_1 и ΔV_1 . В частности, методическая погрешность измерения скорости определяется квантованием по уровню и погрешностью от запаздывания [11, 12].

Последняя объясняется тем, что измеряется средняя скорость поезда за время измерения $T_v < T$ [11, 12].

Анализ величины погрешностей измерительных тактов особенно существен, так как они определяют показатели качества системы управления и не парируются обратной связью. Модель измерительных тактов системы управления длиной виртуальной сцепки приведена на рис. 2. Так как информация о координате и скорости первого поезда используется в системе управления вторым поездом с запаздыванием, определяемом временем передачи, в модели включены соответствующие звенья с запаздыванием на $(k+2-\varepsilon_1)T$.

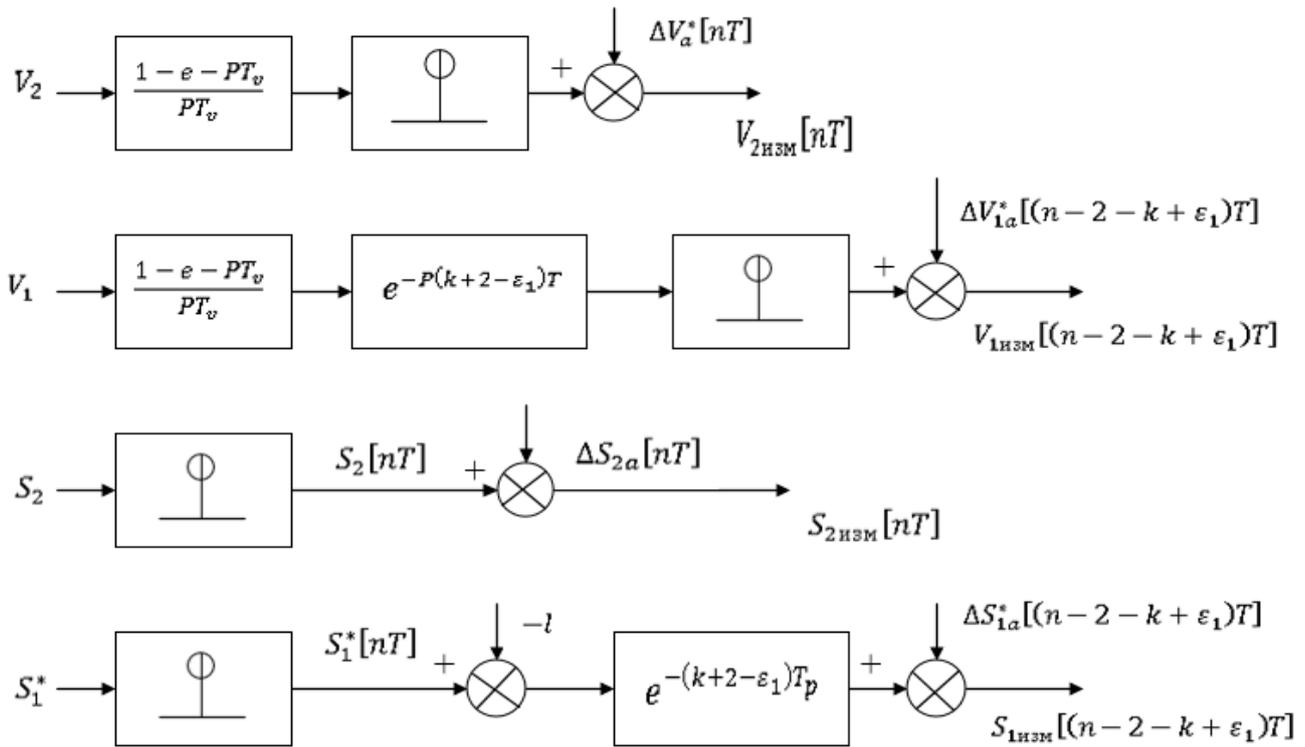


Рис. 2. Модель измерительных тактов

В измерительных тактах скорости звеня с передаточными функциями $\frac{1 - e^{-pT_v}}{pT_v}$ определяют усреднение за время T_v при измерении скорости [11, 12], импульсный элемент моделирует временную дискретизацию — преобразование функции непрерывного аргумента t в функцию дискретного аргумента nT , $n = 0, 1, 2, \dots$. Аналогичны тракты измерения координат. Отдельно рассмотрим составляющие погрешности измерения скорости. Сумму методической погрешности квантования по уровню и инструментальными погрешностями обозначим как ΔV_{1a}^{MI} или ΔV_{2a}^{MI} . Вместе с тем наличие звена $\frac{1 - e^{-pT_v}}{pT_v}$, частотная характеристика которого $\frac{1 - e^{-j\omega T_v}}{j\omega T_v} = \frac{\sin \frac{\omega T_v}{2}}{\frac{\omega T_v}{2}} e^{-j\omega \frac{T_v}{2}}$ говорит о запаздывании на $\frac{T_v}{2}$ в тракте измерения

и, следовательно, дополнительной погрешности от запаздывания. Эту погрешность можно оценить сверху [11, 12] как $a_{\max} \frac{T_v}{2}$, где a_{\max} — максимальное ускорение или замедление поезда. Тогда $\Delta V_{1a}^* \leq \Delta V_{1a}^{MI} + a_{\max} \frac{T_v}{2}$ и $\Delta V_{2a}^* \leq \Delta V_{1a}^{MI} + \frac{a_{\max} T_v}{2}$. При аналитических оценках длины виртуальной сцепки из условий обеспечения безопасности будем считать, что сумма $\Delta V_{1a}^{MI} + a_{\max} \frac{T_v}{2}$ и $V_{2a}^{MI} + \frac{a_{\max} T_v}{2}$ равны соответственно ΔV_{1a}^{\max} и ΔV_{2a}^{\max} . При имитационном моделировании функционирования системы отдельно моделируется звено $\frac{1 - e^{-pT_v}}{pT_v}$, а составляющие ΔV_{1a}^{MI} и ΔV_{2a}^{MI} задаются своими законами распределения плотности вероятности.

В качестве оператора управления выберем цифровой ПИД (пропорциональный, интегральный, дифференцирующий) закон управления. Управление u в этом случае определяется выражением:

$$u = k_1 \Delta[nT] + k_2 \sum_{m=0}^n \Delta[mT] + k_3 \Delta[nT] - \Delta[(n-1)T], \quad (5)$$

где k_1, k_2, k_3 — коэффициенты;
 $\Delta[nT]$ — величина рассогласования;
 $\Delta[nT] - \Delta[(n-1)T]$ — обратная первая разность рассогласования;

$\sum_{m=0}^n \Delta[mT]$ — эквивалент интегрирования

рассогласования $\Delta[mT]$.

Величина рассогласования:

$$\Delta[nT] = L[nT] - L_{\text{изм}}[nT], \quad (6)$$

где $L[nT]$ — заданная в момент nT требуемая длина виртуальной сцепки;
 $L_{\text{изм}}[nT]$ — измеренная на втором локомотиве в момент времени nT длина виртуальной сцепки.

$$L_{\text{изм}}[nT] = S_{2\text{изм}}[nT] - S_{1\text{изм}}[nT], \quad (7)$$

где $S_{2\text{изм}}[nT]$ — известная в момент nT координата «головы» второго локомотива;
 $S_{1\text{изм}}[nT]$ — полученное значение устройством управления второго локомотива из канала в момент времени nT значения координаты «хвоста» первого поезда, измеренное на первом локомотиве в момент времени $(n-k-1-\varepsilon_1)T$.

Способы преобразования величины u при дискретном управлении тягой и торможением в номер N позиции управления является самостоятельной задачей. В этом случае появляется дополнительное требование — уменьшение числа переключений позиций управления тяговым приводом при выполнении заданных показателей качества функционирования системы автоматического управления.

Выбор длины виртуальной сцепки

Длина виртуальной сцепки $L[nT]$ — выбирается из условий обеспечения безопасности движения при экстренном торможении первого поезда. Для идеального случая, когда отсутствуют погрешности измерений скорости и координаты поездов:

$$L[nT] = S_1^*[nT] - l - S_2[nT] + S_{1\text{эторм}}(V_1) \geq S_{2\text{слторм}}(V_2), \quad (8)$$

где $S_{1\text{эторм}}(V_1)$ — путь экстренного торможения первого поезда, движущегося со скоростью V_1 ;
 $S_{2\text{слторм}}(V_2)$ — путь служебного торможения второго поезда, движущегося со скоростью V_2 .

Учитывая наличие погрешностей от запаздывания, методических, аппаратных погрешностей при измерении скоростей и координат поездов, разброс в задании путей экстренного и служебного торможения, величина L выбирается для «худших условий» — максимальных величин погрешностей.

Максимальная величина погрешностей запаздывания $\Delta S_{1,k}[nT]$ определяется из (3) при $\varepsilon_1 = 0$ и величине k , при которой $P^k(1-P) \leq 10^{-8}$ согласно SIL 4.

Оттуда:

$$k \geq -\frac{8 + \lg(1-P)}{\lg P}. \quad (9)$$

Оценку сверху погрешности от запаздывания вычислим как путь, пройденный первым поездом при максимальной скорости за максимальное время запаздывания:

$$\Delta S_{1,k}^{\max} = (k+2)TV_{1\max}. \quad (10)$$

Тогда оценка максимальной погрешности координаты первого поезда, используемой для управления вторым поездом, определяется выражением:

$$\Delta S_{1\max} = \Delta S_{1a}^{\max} + \Delta S_{1,k}^{\max} \leq \Delta S_{1a}^{\max} + (k+2)TV_{1\max}, \quad (11)$$

где ΔS_{1a}^{\max} — максимум модуля погрешности ΔS_{1a} .

Оценка сверху погрешности измерения координаты второго поезда определяется только методическими и инструментальными составляющими:

$$\Delta S_{2\max} = \Delta S_{2a}^{\max},$$

где ΔS_{2a}^{\max} — максимум модуля погрешности ΔS_{2a} . Тогда:

$$L \geq S_{2\text{торм}}(V_{2\max}) - S_{1\text{э}}(V_1) + \Delta S_{1a}^{\max} + \Delta S_{2a}^{\max} + \Delta l + (k+2)TV_{1\max}, \quad (12)$$

где Δl — погрешность в задании длины первого поезда.

Для верхней оценки величины L можно не учитывать путь экстренного торможения первого поезда и принять:

$$L \geq S_{2\text{торм}}(V_{2\max}) + \Delta S_{1a}^{\max} + \Delta S_{2a}^{\max} + \Delta l. \quad (13)$$

Величина $S_{2\text{торм}}(V_{2\max})$ может определяться следующим образом:

$$S_{2\text{торм}}(V_{2\max}) = \frac{V_{2\max}^2}{2g_{\max}}, \quad (14)$$

где g_{\max} — максимальное замедление второго поезда при служебном торможении.

В выражениях (12) и (13) погрешность от запаздывания при передаче информации о координате первого поезда учитывается оценкой сверху, что соответствует управлению вторым поездом с запасом по условиям безопасности. Вместе с тем эту погрешность нужно учитывать при имитационном моделировании всей системы управления для анализа изменений длины виртуальной сцепки в процессе движения.

Полученная верхняя оценка длины виртуальной сцепки не учитывает погрешностей, возникающих в системе автоматического управления вторым поездом, анализ которых проводится методами имитационного моделирования. После разработки адекватной математической модели системы, верифицированного программного обеспечения модели проводится параметрический синтез системы. Задачей параметрического синтеза является выбор значений

коэффициентов k_1, k_2, k_3 закона управления, при которых обеспечиваются заданные показатели качества управления. Учитывая, что при функционировании системы автоматического управления длины виртуальной сцепки имеются динамические и статические погрешности, требуемая величина L должна быть увеличена на максимальное значение суммарной погрешности системы.

Описанный выше способ определения минимальной длины виртуальной сцепки и управления вторым поездом по этой длине не единственен. Рассмотрим вычисления длины L с учетом известной скорости V_2 второго поезда и управления без учета пути экстренного торможения первого поезда. В этом случае на каждом такте управления может быть вычислена величина L по выражению (13) после замены $S_{2\text{торм}}(V_{\max})$ на $S_{2\text{торм}}[V_{2\text{изм}}[nT] + \Delta V_{2a}^{\max}]$, где ΔV_{2a}^{\max} — максимальная величина погрешности измерения скорости второго поезда, и $S_{2\text{торм}}$ вычисляется по (14) после замены $V_{2\max}$ на $[V_{2\text{изм}}[nT] + \Delta V_{2a}^{\max}]$. При этом допустимая величина L уменьшается. Следующий способ уменьшения длины виртуальной сцепки является учет пути экстренного торможения первого поезда, движущегося со скоростью V_1 . Длина пути возможного экстренного торможения первого поезда при $V_{1\text{изм}}[nT] - \Delta V_{1a}^{\max}$ вычисляется на борту этого поезда и передается в общем пакете вместе с координатой и скоростью второму поезду, где и учитывается при вычислении L согласно (12). При этом расчет первого слагаемого в (12) зависит от выбора одного из двух способов, описанных выше.

Вместе с тем расчет пути экстренного торможения первого поезда должен учитывать возможность уменьшения его скорости за время $(k+2)T$ передачи информации второму поезду (рассматриваем длительность передачи для худшего случая). За время $(k+2)T$ скорость первого поезда перед экстренным торможением может уменьшиться с V_1 до $V_1 - g_{\max}(k+2)T$, где g_{\max} — максимальное замедление поезда. Следовательно, путь экстренного торможения первого поезда, движущего со скоростью V_1 , для гарантии безопасности должен быть уменьшен с учетом возможного уменьшения его скорости и определяться выражением:

$$S_{1a} [V_1 - g_{\max} (k+2)T] = \frac{[V_1 - \Delta V_{1a}^{\max} - g_{\max} (k+2)T]^2}{2g_3}, \quad (15)$$

где g_{\max} — максимальное замедление, которое можно выбрать равное g_3 .

Приведем анализ различных способов вычисления L — длины виртуальной сцепки. Для дальнейшего рассмотрения введем обозначения этих способов:

1-й способ — для расчета L используется путь служебного торможения второго поезда от скорости $V_{2\max}$, путь экстренного торможения первого поезда принимается равным 0;

2-й способ — для расчета L используется путь служебного торможения второго поезда с учетом начала торможения от скорости $V_{2\text{изм}} [nT] + \Delta V_{2a}^{\max}$, путь экстренного торможения первого поезда принимается равным 0;

3-й способ — путь служебного торможения второго поезда определяется от скорости начала торможения $V_{2\max}$ (так же как и в первом способе), учитывается путь экстренного торможения от скорости $V_{1\text{изм}} [nT] - \Delta V_{1a}^{\max}$ первого поезда;

4-й способ — путь служебного торможения 2-го поезда определяется от скорости $V_{2\text{изм}} [nT] + \Delta V_{2a}^{\max}$ (так же как и во втором способе), учитывается путь экстренного торможения от скорости $V_{1\text{изм}} [nT] - \Delta V_{1a}^{\max}$ первого поезда.

Выражение для определения длины виртуальной сцепки для рассмотренных четырех способов сведены в табл. 1.

Из качественных соображений очевидно, что минимальную из рассмотренных способов определения длину виртуальной сцепки обеспечивает 4-й способ при обеспечении условий безопасности одинаковых максимальных погрешностях трактов измерения и методах передачи информации.

Для получения численных результатов зададим следующие исходные данные: $\Delta S_{1a}^{\max} = 10$ м; $\Delta S_{2a}^{\max} = 10$ м; $\Delta V_{1a}^{\max} = 1$ км/ч; $\Delta V_{2a}^{\max} = 1$ км/ч, $k = 10$, $T = 140$ мс; $g_{\text{сл}} = 0,6$ м/с²; $g_3 = 0,7$ м/с²; $g_{\max} = 0,7$ м/с²; $V_{2\max} = 80$ км/ч. В выбранных данных $T = 140$ мс при передаче сообщения длиной 24 байта по радиоканалу на частоте 160 МГц. При использовании радиоканала на частоте 2130 МГц время передачи 24 информационных байта составляет 70 мс. Результаты расчета сведены в табл. 2.

Обратим внимание, что допустимая длина виртуальной сцепки для второго способа, когда $V_{2\text{изм}} = V_{2\max} = 80$ км/ч превышает соответствующую величину для первого способа. Это вызвано тем, что $V_{2\text{изм}} = 80$ км/ч известно с погрешностью, равной 1 км/ч. При выборе L в соответствии с первым и третьим способами величина $V_{2\max}$ известна точно.

Анализ результатов третьего способа определения L говорит о том, что его использование

Таблица 1. Выражения для расчета длины виртуальной сцепки

Способ	$L > 0$	
1	$L \geq \frac{V_{2\max}^2}{2g_{\text{сл}}} + \Delta S_{1a}^{\max} + \Delta S_{2a}^{\max} + \Delta l$	(16)
2	$L \geq \frac{(V_{2\text{изм}} [nT] + \Delta V_{2a}^{\max})^2}{2g_{\text{сл}}} + \Delta S_{1a}^{\max} + \Delta S_{2a}^{\max} + \Delta l$	(17)
3	$L \geq \frac{V_{2\max}^2}{2g_{\text{сл}}} + \Delta S_{1a}^{\max} + \Delta S_{2a}^{\max} + \Delta l - \frac{[V_{1\text{изм}} [nT] - \Delta V_{1a}^{\max} - a_{\max} (k+2)T]^2}{2g_3}$	(18)
4	$L \geq \frac{(V_{2\text{изм}} [nT] + \Delta V_{2a}^{\max})^2}{2g_{\text{сл}}} + \Delta S_{1a}^{\max} + \Delta S_{2a}^{\max} + \Delta l - \frac{[V_{1\text{изм}} [nT] - \Delta V_{1a}^{\max} - a_{\max} (k+2)T]^2}{2g_3}$	(19)

Таблица 2. Допустимая длина виртуальной сцепки

Способ	L			
	$V_{2\max} = 80$ км/ч	$V_{2\text{изм}} = 80$ км/ч	$V_{2\text{изм}} = 60$ км/ч	$V_{2\text{изм}} = 40$ км/ч
1	441,4 м	—	—	—
2	—	451,75 м	269,13 м	108,11 м
3	140,05 м при $V_{1\text{изм}} = 80$ км/ч	150,52 м при $V_{1\text{изм}} = 80$ км/ч	281,11 м при $V_{1\text{изм}} = 60$ км/ч	377,88 м при $V_{1\text{изм}} = 40$ км/ч
4	—	150,4 м при $V_{1\text{изм}} = 80$ км/ч	108,84 м при $V_{1\text{изм}} = 60$ км/ч	44,59 м при $V_{1\text{изм}} = 40$ км/ч

приводит к увеличению допустимой величины длины виртуальной сцепки при низких скоростях движения за счет уменьшения пути экстренного торможения первого поезда при завышенной верхней оценке пути служебного торможения второго поезда. Перспективным для использования в автоматической системе управления вторым поездом можно считать четвертый способ, учитывающий значения измеренных координат и скоростей первого и второго поездов, при выполнении:

$$\frac{[V_{2\text{изм}} + \Delta V_{2a}^{\max}]^2}{2g_{\text{сл}}} + \Delta S_{1a}^{\max} + \Delta S_{2a}^{\max} + \Delta l > \frac{[V_{1\text{изм}} - \Delta V_{1a}^{\max} - g_{\text{э}}(k+2)T]^2}{2g_{\text{э}}}. \quad (20)$$

Условие (20) выполняется, так как в противном случае скорость второго поезда настолько мала, что его путь служебного торможения меньше пути экстренного торможения первого поезда. Следовательно, система управления может увеличить скорость второго поезда и приблизить его к первому. При равенстве скоростей движения величина L приведена в табл. 2. Результаты расчета количественно показывают, как изменяется длина виртуальной сцепки при учете пути экстренного торможения первого поезда.

Проанализируем дополнительно выражение (19) для четвертого способа вычисления длины виртуальной сцепки. После несложных преобразований получаем:

$$L \geq \frac{V_{2\text{изм}}^2}{2g_{\text{сл}}} - \frac{V_{1\text{изм}}^2}{2g_{\text{э}}} + L_0 + L_1, \quad (21)$$

где $L_0 = \Delta S_{1a}^{\max} + \Delta S_{2a}^{\max} + \Delta l$;

$$L_1 = V_{2\text{изм}} \frac{\Delta V_{2a}^{\max}}{g_{\text{сл}}} + V_{1\text{изм}} \frac{\Delta V_{1a}^{\max} + g_{\text{max}}(k+2)T}{g_{\text{э}}}.$$

Величина L_0 определяется только максимальными погрешностями измерений и известна заранее.

Величина L_1 зависит как от максимальных погрешностей измерений, так и от измеренных значений скорости и возможного максимального уменьшения скорости первого поезда во время передачи информации. L_1 можно оценить сверху, приняв $V_{2\text{изм}} = V_{2\max}$, $V_{1\text{изм}} = V_{1\max}$. Тогда верхняя оценка этой составляющей

$$L_1^* = V_{2\max} \frac{\Delta V_{2a}^{\max}}{g_{\text{сл}}} + V_{1\max} \frac{\Delta V_{1a}^{\max} + g_{\text{max}}(k+2)T}{g_{\text{э}}}$$

и

$$L \geq \frac{V_{2\text{изм}}^2}{2g_{\text{сл}}} - \frac{V_{1\text{изм}}^2}{2g_{\text{э}}} + L_0 + L_1^*. \quad (22)$$

Сумму величин $L_0 + L_1^*$ по существу можно определить как длину защитного промежутка при сближении поездов. Для приведенных выше исходных данных $L_0 + L_1^* = 80,37$ м.

Таким образом, длина виртуальной сцепки в соответствии с выражением (22) определяется как сумма, разность путей служебного торможения второго и экстренного торможения первого поездов при измеренных значениях их скоростей и длины защитного промежутка.

3. Блок-схема модели

Блок-схема модели для анализа функционирования системы управления вторым поездом в условиях применения виртуальной сцепки

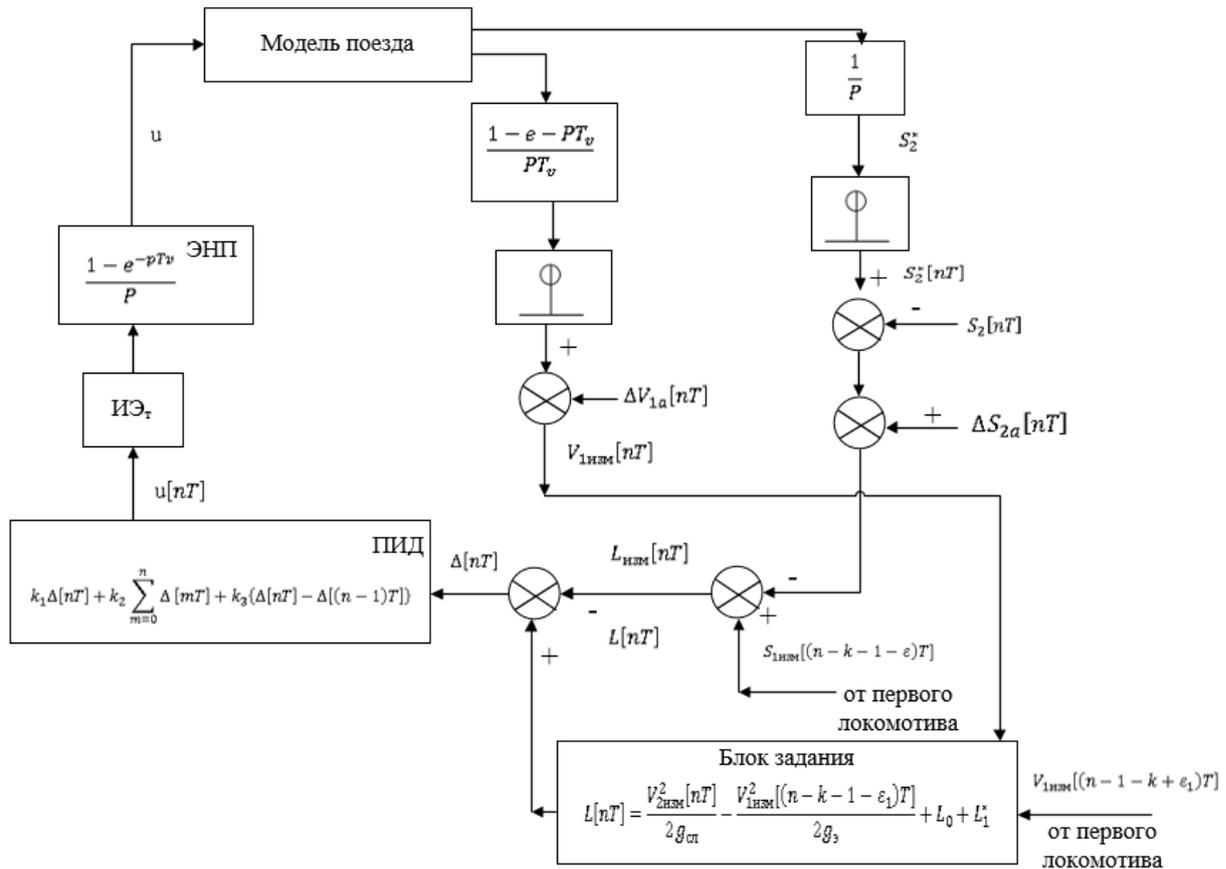


Рис 3. Блок-схема модели

при заданном управлении $u_1(t)$ первого поезда приведена на рис. 3.

Модель поезда задается системами известных дифференциальных уравнений [13]. В частности, поезд может рассматриваться как материальная точка, «нерастяжимая нить» [14]. Возможно, использование более сложных моделей, если исследователя интересует продольная динамика поезда [15–19]. Модели измерительных трактов координат и скоростей поездов с учетом запаздывания при передаче информации соответствуют описанным выше и приведенным на рис 2. Закон управления реализуется блоком ПИД, моделирующим преобразование рассогласования $\Delta[nT]$ в управление $u[nT]$. Идеальный импульсный элемент ИЭ_Т преобразует функцию дискретного аргумента $u[nT]$ в решетчатую функцию — последовательность δ -функций с весами $u[nT]$. Решетчатая функция экстраполятором нулевого порядка ЭНП, передаточная функция

которого $1 - \frac{e^{-PT}}{P}$, преобразуется в ступенчатый сигнал управления u , поступающий на вход объекта — вход управления локомотивом.

Задаваемая системе управления величина длины виртуальной сцепки вычисляется в «Блоке задания» при известных измеренных величинах $V_{1изм}[nT]$, $V_{1изм}[(n-k-1-\epsilon_1)T]$ и заданных L_0 и L_1^* в соответствии с выражением (22). Измеренное в момент времени значение длины виртуальной сцепки $L_{изм}[nT]$ вычисляется как разность $S_{1изм}[(n-k-1-\epsilon)T]$ и $S_{2изм}[nT]$. Величина рассогласования $\Delta[nT]$ вычисляется как разность $L[nT] - L_{изм}[nT]$.

Качество управления системы характеризуют: — $L_g[nT] = S_1[nT] - S_2[nT]$ — зависимость действительной длины виртуальной сцепки от времени получаемой при различных временах хода первого поезда по заданному участку, где $S_1[nT]$ — зависимость координаты пути «хвоста» первого поезда от времени;

$S_2[nT]$ — зависимость координаты «головы» второго поезда от времени;

— $\Delta[nT] = L[nT] - L_g[nT]$ — зависимость погрешности реализации заданной длины виртуальной сцепки от действительной, получаемой при различных временах хода первого поезда по заданному участку;

— максимальные, средние и среднеквадратические оценки $L[nT]$ и $\Delta[nT]$ по времени при движении по заданному участку;

— усредненные по времени и по множеству средние и среднеквадратические оценки $L_g[nT]$ и $\Delta[nT]$ при движении по различным участкам;

— число переключений управления при релейно-контакторном управлении привода локомотива;

— обязательное отсутствие случаев $\Delta[nT] < 0$, что определяет удовлетворение условий безопасности.

Таким образом, разработанная модель позволяет создать алгоритмическое и программное обеспечение для проведения имитационных экспериментов функционирования системы автоматического управления вторым локомотивом при виртуальной сцепке. По результатам имитационных экспериментов при выбранных показателях качества управления проводится параметрический синтез системы и вычисляются характеристики ее функционирования.

Заключение

Повышение использования пропускной способности участков железных дорог возможно при использовании технологии виртуальной сцепки. Реализация этой технологии связана с решением сложных технических и технологических задач.

Существенной проблемой при внедрении технологии виртуальной сцепки является, в частности, создание системы автоматического управления движением второго локомотива при передаче информации по радиоканалу по скорости и координате первого локомотива.

Предложенные принципы построения системы автоматического управления движением второго локомотива при виртуальной сцепке, разработка математической модели

системы, выбор показателей качества управления являются фундаментальным для решения задачи параметрического синтеза этой системы, определения характеристик ее функционирования.

Описанные в данной статье результаты исследований являются определенным этапом, предшествующим разработке алгоритмического программного и информационного обеспечения цифрового двойника технологии виртуальной сцепки. ▲

Библиографический список

1. Баранов Л. А. Система автоматического и телемеханического управления электроподвижным составом / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, В. И. Астрахан и др.; под ред. Л. А. Баранова. — М.: Транспорт, 1984. — 311 с.
2. Баранов Л. А. 35 лет кафедре «Автоматика и телемеханика» / Л. А. Баранов // Автоматическое управление технологическими процессами на транспорте. Юбилейный сборник научных трудов. — М.: МИИТ, 1996. — Вып. 892. — С. 3–8.
3. Бушуев С. В. Повышение пропускной способности участка железной дороги с применением технологии виртуальной сцепки / С. В. Бушуев, К. В. Гундырев, Н. С. Голочалов // Автоматика на транспорте. — 2021. — № 1. — С. 7–20. — DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-7-20.
4. Климова Е. Е. Технология виртуальной сцепки поездов как инструмент, повышения пропускной и провозной способности линии / Е. Е. Климова, Л. Е. Пилинушка, В. С. Рябов // Транспортная инфраструктура сибирского региона: материалы десятой Международной научно-практической конференции. — 2019. — С. 60–64.
5. Flammini F. Towards Railway Virtual Coupling / F. Flammini, S. Marrone, R. Nardone et al. // International Conference of Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and International Transportation Electrification Conference. — 2019.
6. Mitchell I. Train Convoys or Virtual Coupling / I. Mitchell, E. Goddard, F. Montes // IRSE news. Institution of railway signal engineers. — 2016. — Iss. 219.
7. Goikoetxea J. Roadmap Towards the Wireless Virtual Coupling of Trains / J. Goikoetxea // Springer International Publishing Switzerland. — 2016. — Pp. 3–9.
8. Никитин А. Б. Результаты исследования технических средств контроля целостности поездов / А. Б. Никитин, И. В. Кушпиль // Автоматика на транспорте. — 2020. — № 4. С. 411–434. — DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-4-411-434.
9. Quante F. Контроль полноставности грузовых поездов / F. Quante // Железные дороги мира. — 2005. — № 2. — С. 43–48.
10. Bestem`yanov P. F. Energy efficient algorithms assessment of the Rail circuit operation / P. F. Bestem`yanov // Russian Electrical Engineering. — 2017. — Vol. 88. — № 9. — С. 557–562.

11. Баранов Л. А. Квантование по уровню и временная дискретизация в цифровых системах управления / Л. А. Баранов. — М.: Энергоатомиздат, 1990. С. 306.
12. Баранов Л. А. Микропроцессорные системы автоведения поездов / Л. А. Баранов, Я. М. Головичер, Е. В. Ерофеев и др.; под ред. Л. А. Баранова. — М.: Транспорт, 1990. — С. 272.
13. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров; под ред. И. П. Исаева. — М.: Транспорт, 1995. — С. 294.
14. Баранов Л. А. Оптимизация управления движением поездов / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, И. С. Милешин и др.; под ред. Л. А. Баранова. — М.: МИИТ, 2011. — С. 164.
15. Лисицын А. Л. Нестационарные режимы тяги (Тяговое обеспечение перевозочного процесса) / А. Л. Лисицын, Л. А. Мугинштейн. — М.: Интекст, 1996. — 159 с.
16. Gao G. J. of longitudinal forces of coupler devices in emergency braking process for heavy haul trains / G. J. Gao, W. Chen, J. Zhang et al. // J. Cent. South Univ. — 2017. — № 24. Pp. 2449–2457. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-017-3656-9>
17. Pugi L. Modelling the longitudinal dynamics of long freight trains during the braking phase. / L. Pugi, D. Fioravanti, A. Rindi // 12th IFToMM World Congress. Besancon, France. — 2007. Pp. 1–6.
18. Cole C. Longitudinal train dynamics / C. Cole, S. Iwnicki (ed.) // Handbook of railway vehicle dynamics. Taylor & Francis. — London, 2006. — Pp. 239–278.
19. Wu Q. A review of dynamics modelling of friction draft gear / Q. Wu, C. Cole, S. Luo et al. // Veh Syst Dyn. — 2014. № 52(6). Pp. 733–758.

Благодарность РФФИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и образовательного фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-37-51001.

Acknowledgments. The reported study was funded by RFBR, Sirius University of Science and Technology, JSC Russian Railways and Educational Fund «Talent and success», project number 20-37-51001.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2022, Vol. 8, No. 4, pp. 377–388
DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-377-388

Design Principles and Models of Automatic Control System for Second Locomotive at Virtual Assessment

Information about authors

Baranov L. A., Doctor in Engineering, Professor, Professor of the Department of “Information Management and Protection”.
E-mail: baranov.miiit@gmail.com

Bestemyanov P. F., Doctor in Engineering, Professor, Professor of the Department of “Automation, Remote Control and Communication in Railway Transport”. E-mail: bestpetr4@gmail.com

Balakina E. P., PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of “Information Management and Protection”. E-mail balakina_e@list.ru

Pudovikov O. E., Doctor in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of “Electric Trains and Locomotives”. E-mail: olegep@mail.ru

Russian University of Transport (MIIT), Moscow

Abstract: Automatic control system model of second train locomotive at virtual assessment as well as control quality analysis approaches have been considered. The controlled value represents being calculated in train traffic process the distance between “tail” of a first train and “head” of a second one, providing traffic safety at emergency braking of a first train. This distance is called “virtual replacer length”. Formalization has been introduced allowing to account for synchronization absence at transfer of information on the coordinate and speed of a first locomotive and the control digital system work cycle of a second one. Speed and coordinate measurement errors have been considered which’re connected with lagging at information transfer and possibility of failing in decoding of received by radio channel information by second locomotive receiver. At virtual length assessment, various ways of its upper assessment have been considered, the way has been

chosen, taking into account motion speeds and the coordinates of both trains, emergency braking path of a first train, the possibility of emergency braking of a first train at the beginning of the cycle of information transfer, measurement methodological and instrumental errors. Digital proportional integral differentiating control law has been considered as an operator, transforming mismatches at the choice of a control of a second locomotive. Automatic control system model has been developed which relates to impulse system class and which feature is the calculation of control action in train traffic process. The parametric synthesis of automatic control system is recommended to be held by simulation modelling methods. Control quality criteria have been chosen.

Keywords: virtual replacer; emergency braking; service braking; automatic control system; radio channel; virtual replacer length; system model; simulation modelling; control law; measurement errors; virtual replacer length calculation; control quality criteria.

References

1. Baranov L. A., Erofeev E. V., Astrakhan V. I., Golovicher Ya. M., Maksimov V. M., Solyus P. G. *Sistema avtomaticheskogo i telemekhanicheskogo upravleniya elektro-podvizhnym sostavom* [System of automatic and telemechanical control of electric rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1984. 311 p. (In Russian)
2. Baranov L. A. 35 let kafedre «Avtomatika i telemekhanika» [35 years of the department “Automation and telemechanics”. Automatic control of technological processes in transport]. *Avtomaticheskoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami na transporte/Yubileynyy sbornik nauchnykh trudov* [Anniversary collection of scientific papers]. I. 892. Moscow: MIIT Publ., 1996, pp. 3–8. (In Russian)
3. Bushuev S. V., Gundyrev K. V., Golochalov N. S. Povyshenie propusknoy sposobnosti uchastka zheleznoy dorogi s primeneniem tekhnologii virtual'noy stseпки [Increasing the capacity of a railway section using virtual coupler technology]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. I. 1, 2021, pp. 7–20. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-1-7-20. (In Russian)
4. Klimova E. E., Pilinushka L. E., Ryabov V. S. Tekhnologiya virtual'noy stseпки poezdov kak instrument, povysheniya propusknoy i provoznoy sposobnosti linii [The technology of virtual coupler as an instrument for increasing the capacity and traction capacity of the line].

- ogy of virtual train coupling as a tool to increase the throughput and carrying capacity of the line]. *Transportnaya infrastruktura sibirskogo regiona: Materialy desyatoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Transport infrastructure of the Siberian region: Proceedings of the tenth International scientific and practical conference]. 2019, pp. 60–64. (In Russian)
5. Flammini F., Marrone S., Nardone R., Petrillo A., Santini S., Vittorini V. Towards Railway Virtual Coupling. – International Conference of Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and International Transportation Electrification Conference. 2019.
 6. Mitchell I., Goddard E., Montes F., Stanley P., Muttram R., Coenraad W., Pore J., Andrews S., Lochman L. ERTMS Level 4, Train Convoys or Virtual Coupling. Institution of railway signal engineers, IRSE news issue 219. 2016.
 7. Goikoetxea J. Roadmap Towards the Wireless Virtual Coupling of Trains. Springer International Publishing Switzerland, 2016, pp. 3–9.
 8. Nikitin A. B., Kushpil' I. V. Rezul'taty issledovaniya tekhnicheskikh sredstv kontrolya tselostnosti poezdov [Results of the study of technical means for monitoring the integrity of trains]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. I. 4, 2020, pp. 411–434. DOI 10.20295/2412-9186-2020-6-4-411-434. (In Russian)
 9. Quante F. Kontrol' polnosostavnosti gruzovykh poezdov [Control of the completeness of freight trains]. *Zheleznyye dorogi mira* [Railways of the world]. 2005, I. 2, pp. 43–48. (In Russian)
 10. Bestem`yanov P. F. Energy efficient algorithms assessment of the Rail circuit operation. *Russian Electrical Engineering*. 2017, vol. 88, I. 9, pp. 557–562. (In Russian)
 11. Baranov L. A. *Kvantovanie po urovnyu i vremennaya diskretizatsiya v tsifrovyykh sistemakh upravleniya* [Level quantization and temporal discretization in digital control systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. P. 306. (In Russian)
 12. Baranov L. A., Golovicher Ya. M., Erofeev E. V., Maksimov V. M. *Mikroprotsessornye sistemy avtovedeniya poezdov* [Microprocessor-based systems of automatic train guidance]. Moscow: Transport Publ., 1990, p. 272. (In Russian)
 13. Rozenfel'd V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N. *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Theory of Electric Traction]. Moscow: Transport Publ., 1995, p. 294. (In Russian)
 14. Baranov L. A., Erofeev E. V., Mileschin I. S., Chin' L. M. *Optimizatsiya upravleniya dvizheniem poezdov* [Optimization of train traffic control]. Moscow: MIIT Publ., 2011, p. 164. (In Russian)
 15. Lisitsyn A. L. *Nestatsionarnyye rezhimy tyagi (Tyagovoe obespechenie perevochnogo protsesssa)* [Non-stationary traction modes (Traction support for the transportation process)]. Moscow: Intekst Publ., 1996. 159 p. (In Russian)
 16. Gao, G., Chen, W., Zhang, J. et al. Analysis of longitudinal forces of coupler devices in emergency braking process for heavy haul trains. *J. Cent. South Univ.* 2017, pp. 2449–2457. DOI: 10.1007/s11771-017-3656-9
 17. Pugi L., Fioravanti D., & Rindi A. Modelling the longitudinal dynamics of long freight trains during the braking phase. 12th IFToMM World Congress. Besancon, France. 2007, pp. 1–6.
 18. Cole C. Longitudinal train dynamics. In: Iwnicki S (ed) *Handbook of railway vehicle dynamics*. Taylor & Francis, London. 2006, pp 239–278.
 19. Wu Q., Cole C., Luo S., Spiriyagin M. A review of dynamics modelling of friction draft gear. *Veh Syst Dyn.* 2014, I. 52(6), pp. 733–758.

УДК 681.51:004.94

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ КРАНА ПЛАТФОРМЕННОГО ТИПА НА ОСНОВЕ РЕГУЛЯТОРА С НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКОЙ

ЧЕРНЫШЕВ Денис Валентинович, канд. техн. наук; e-mail: fersy@mail.ru

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, кафедра «Автоматика, телемеханика и связь», Хабаровск

Моделируется система управления на основе нечеткой логики электроприводом главного движения крана, расположенного на платформе. В качестве основы для регуляторов используются теория нечеткой логики и стандартные настройки. Модель силовой части системы регулирования построена согласно способу векторного управления, электроприводом с опорным вектором потокосцепления ротора. Система управления выполнена по подчиненному способу регулирования с классическим регулятором тока и нечетким регулятором скорости, при этом внутренний контур тока настроен на модульный оптимум. Целью разработки модели системы управления является улучшение энергетических характеристик при питании от источников с ограниченной мощностью, при соблюдении требований к качеству регулирования. В сравнении с системой управления с нечетким регулятором скорости используется система подчиненного регулирования с внутренним контуром тока настроенного на модульный оптимум и внешним контуром скорости настроенным на симметричный оптимум. Полученные параметры и логику настройки нечеткого регулятора математической модели возможно использовать как основу для программирования в системах управления. В изменяемых внешних условиях работы корректировка параметров такого регулятора выполняется персоналом на основе понятных логических правил и функций принадлежности.

Ключевые слова: система управления; нечеткая логика; электродвигатель; математическое моделирование; регулятор.

DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-389-398

▼ Введение

Техническое устройство, такое как железнодорожный кран, расположенный на платформе, определяется как механизм, который обеспечивает движение по железнодорожному полотну, при этом выполняющий погрузочно-разгрузочные работы. Краны такого типа являются полноповоротными и оборудованы стрелой. Краны платформенного типа применяются при проведении монтажных и строительных работ на железной дороге.

Как правило, такие устройства работают удаленно от внешних источников энергии, и это определяет дополнительные требования к энергоэффективности работы всей системы. Источники энергии для работы являются локальными и, соответственно, ограниченными по мощности. Это ограничение учитывается в требованиях к системе управления электроприводом крана. Применение теории нечеткой логики для реализации регуляторов

в системе автоматического управления позволяет обеспечить энергоэффективное управление, а также компенсировать упругие связи и случайные нагрузки, присущие крановым механизмам [1–5].

Требования, применяемые к силовой части и системе управления электроприводом подъема крана, с учетом специфики работы и расположения, определяются как:

- защита системы управления и силовой части от коротких замыканий и длительных перегрузок;
- реверсивный привод;
- ограничение управления по параметрам механической части;
- экономное потребление энергии.

В качестве электропривода главного движения возможно использовать асинхронный электропривод с частотным управлением.

Цель настоящей статьи состоит в построении модели и математическом моделировании

системы управления двигателем нечетким регулятором, который определяет нелинейную зависимость в управлении скоростью электродвигателя и выполняет ограничение тока, а также в определении основных параметров нечеткого регулятора и его настроек как базиса для практического программирования параметров контроллера в системе управления скоростью, определении математическим моделированием основных параметров переходного процесса на соответствие требуемому качеству.

1. Особенности применения частотного управления в электроприводе

В настоящее время для управления асинхронными двигателями широко применяется частотное регулирование. Это определяется тем, что такой электропривод обеспечивает высокий уровень стабильности работы, энергоэффективности и требований к точности управления.

С развитием силовой преобразовательной техники стали широко применяться различные виды полупроводниковых преобразователей частоты.

Внедрение преобразователя частоты в систему позволяет продлить ресурс ее использования и повысить среднюю наработку на отказ. Уменьшаются перегрузки механической и электрической части, а также пусковые токи. Встроенные регуляторы преобразователя позволяют выполнить стандартные настройки управляемых переменных [1, 6–9].

Особенности работы асинхронного двигателя с системой частотного регулирования:

- уменьшение потерь энергии в режиме торможения, что позволяет выполнить систему электропривода на электродвигателях с более высоким значением номинальной скорости вращения;

- широкий диапазон регулирования скорости электродвигателя;

- экономия электрической энергии;

- уменьшение критических нагрузок, вызванных пусковым моментом.

Специализированные преобразователи частоты оснащаются дополнительными функциями, например, для грузоподъемных кранов создаются алгоритмы, которые предотвращают

раскачивание груза и контролируют натяжение троса, регулируют параметры привода в зависимости от нагрузки.

В современных преобразователях широко применяется система векторного управления. В такой системе управления электроприводом содержится математическая модель двигателя, позволяющая рассчитать скорость вращения, поток и ток.

При повышенных требованиях к точности управления устанавливаются датчики тока фаз статора двигателя и датчик скорости [1, 6].

Преимущества векторного метода управления асинхронным двигателем в электроприводе крана:

- вращения двигателя на малых частотах происходит плавно и без рывков;

- высокий уровень точности при регулировании скорости вращения;

- быстрое реагирование на возможное изменение нагрузки.

2. Математическое описание системы управления со стандартными настройками регуляторов электропривода

Метод векторного управления имеет в качестве недостатков большую сложность вычислений, и необходимо точное знание параметров электродвигателя.

Информация о переменных состояния электропривода получается от прямого измерения величин регулирования или от их моделирования на основе математического описания и построения математической модели. Математические модели менее точные по сравнению с прямыми измерениями, но позволяют на практике реализовывать требуемые алгоритмы управления.

В математической модели используется переход от трехфазных переменных к двухфазным переменным. Это является основой использования методов подчиненного регулирования координатами электропривода.

Применяем систему управления с опорным вектором потокосцепления ротора ψ_2 . При этом в системе два канала управления. Один — это управление потокосцеплением ψ_2 ,

другой — управление скоростью двигателя ω . Определение вектора ψ_2 происходит математическим моделированием на основе уравнений электродвигателя. В этом неточность модели, так как параметры системы уравнений задаются с определенной точностью и являются постоянными, в отличие от реальных параметров электродвигателя, которые изменяются в процессе работы [1, 6–10].

Система уравнений, на основе которых строится модель электродвигателя, определяется в системе координат x, y , вращающихся с синхронной скоростью магнитного поля двигателя, при ориентации вектора потокосцепления ротора ψ_2 по оси x , для статора и ротора [1, 6, 8, 9]:

$$\begin{cases} U_{1x} = \frac{d\psi_{1x}}{dt} + I_{1x}R_1 + \omega_{0эл}\psi_{1y} \\ U_{1y} = \frac{d\psi_{1y}}{dt} + I_{1y}R_1 + \omega_{0эл}\psi_{1x}, \\ 0 = \frac{d\psi_{2x}}{dt} + I'_{2x}R'_2 \\ 0 = I'_{2y}R'_2 + (\omega_{0эл} - p_n\omega)\psi_{2x} \end{cases}, \quad (1)$$

где U_{1x} и U_{1y} — проекции напряжения питания статора на оси x и y ;

I_{1x} и I_{1y} — проекции тока статора на оси x и y ;

I'_{2x} и I'_{2y} — проекции тока ротора на оси x и y ;

R_1 — сопротивление статора;

R'_2 — сопротивление ротора;

ψ_{1x} и ψ_{1y} — проекции потокосцепления статора на оси x и y ;

ψ_{2x} — проекция потокосцепления ротора на ось x ;

$\omega_{0эл}$ — угловая скорость электромагнитного поля;

ω — угловая скорость электродвигателя;

p_n — число пар полюсов.

Момент определяется по формуле:

$$\bar{M} = \frac{3}{2} p_n \frac{L_{12}}{L'_2} [\bar{\psi}_2 \cdot \bar{I}_1], \quad (2)$$

где L_{12} — взаимная индуктивность обмоток статора и ротора;

L'_2 — приведенная индуктивность обмоток ротора.

Зависимость между векторами ψ_2 и I_1 , при ориентации вектора потокосцепления по оси x , определяет систему уравнений напряжений для статора и ротора.

При построении системы управления в передаточных функциях уравнения записываются в операторной форме.

Тогда система уравнений модели электродвигателя определяется как:

$$\begin{cases} U_{1x}(p) + E_{1x}(p) = R_{1э}(1 + T_{1э}p)I_{1x}(p) \\ U_{1y}(p) - E_{1y}(p) = R_{1э}(1 + T_{1э}p)I_{1y}(p) \\ d\psi_{2x} = L_{12} \frac{1}{(1 + T_2p)} I_{1x}(p) \\ (\omega_{0эл}(p) - p_n\omega(p))\psi_{2x}(p) = \frac{L_{12}}{T_2} I_{1y}(p) \end{cases}, \quad (3)$$

где E_{1x} и E_{1y} — составляющие ЭДС, наводимые в статоре по осям x и y ;

$R_{1э}$ — эквивалентное активное сопротивление цепи статора:

$$R_{1э} = R_1 + k_2^2 R'_2; \quad (4)$$

$T_{1э}$ — электромагнитная постоянная цепи статора:

$$T_{1э} = \frac{\sigma L_1}{R_{1э}}; \quad (5)$$

T_2 — электромагнитная постоянная цепи ротора:

$$T_2 = \frac{L'_2}{R'_2}; \quad (6)$$

k_2 — коэффициент электромагнитной связи:

$$k_2 = \frac{L_{12}}{L'_2}; \quad (7)$$

σ — коэффициент рассеяния магнитного поля:

$$\sigma = 1 - \frac{L_{12}^2}{L_1 L'_2}; \quad (8)$$

L_1 — индуктивность обмоток статора.

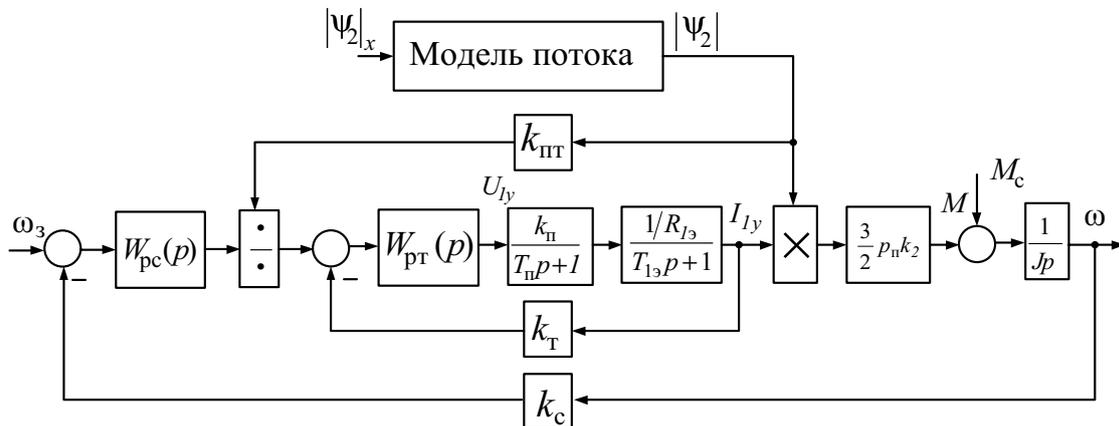


Рис. 1. Структурная схема управления скоростью с классическими регуляторами

На основании этих уравнений составляется структурная схема системы регулирования в передаточных функциях [1, 6–12].

Передаточная функция силового преобразователя представлена как апериодическое звено первого порядка, с постоянной времени T_n и коэффициентом усиления k_n силового преобразователя:

$$W_n(p) = \frac{k_n}{T_n p + 1}. \quad (9)$$

При математическом моделировании системы с классическим управлением выполняется расчет регулятора тока и регулятора скорости. Передаточная функция регулятора тока определяется из настройки контура тока на модульный оптимум с постоянной времени $T_\mu = T_n$

$$W_{pt}(p) = \frac{R_{Iy} T_{Iy} (T_{Iy} p + 1)}{2 T_\mu k_n k_T T_{Iy} p}, \quad (10)$$

где k_T — коэффициент обратной связи по току.

Передаточная функция регулятора скорости определяется из настройки контура скорости на симметричный оптимум с постоянной малой времени контура скорости $T_{\mu c} = 2 T_\mu$:

$$W_{pc}(p) = \frac{2 J k_T (4 T_{\mu c} p + 1)}{6 T_{\mu c} k_c p_n k_2 4 T_{\mu c} p}, \quad (11)$$

где k_c — коэффициент обратной связи по скорости;

J — момент инерции.

Структурная схема системы управления, полученная для моделирования, представлена на рис. 1.

Модель потока строится на основании уравнений электродвигателя. Сигналом задания для контура потока является $|d\psi_2|_x$, а выходной координатой — значение потокосцепления $|d\psi_2|$.

При моделировании системы управления использовался язык программирования Python и применялись параметры асинхронного двигателя мощностью 37 кВт, номинальный ток 912 А, номинальная скорость 740 об/мин.

3. Система управления с нечетким регулятором скорости электропривода

В целях улучшения энергетических показателей электропривода используем в качестве регулятора скорости нечеткий метод управления. В качестве обратных связей для такого регулятора используется обратная связь по ошибке скорости, по первой производной скорости и интегральная составляющая скорости [6–15]. Структурная схема такой системы с нечетким регулятором скорости представлена на рис. 2.

Нечеткий регулятор выполнен по структуре, изображенной на рис. 3. В основе работы используется метод Мамдани.

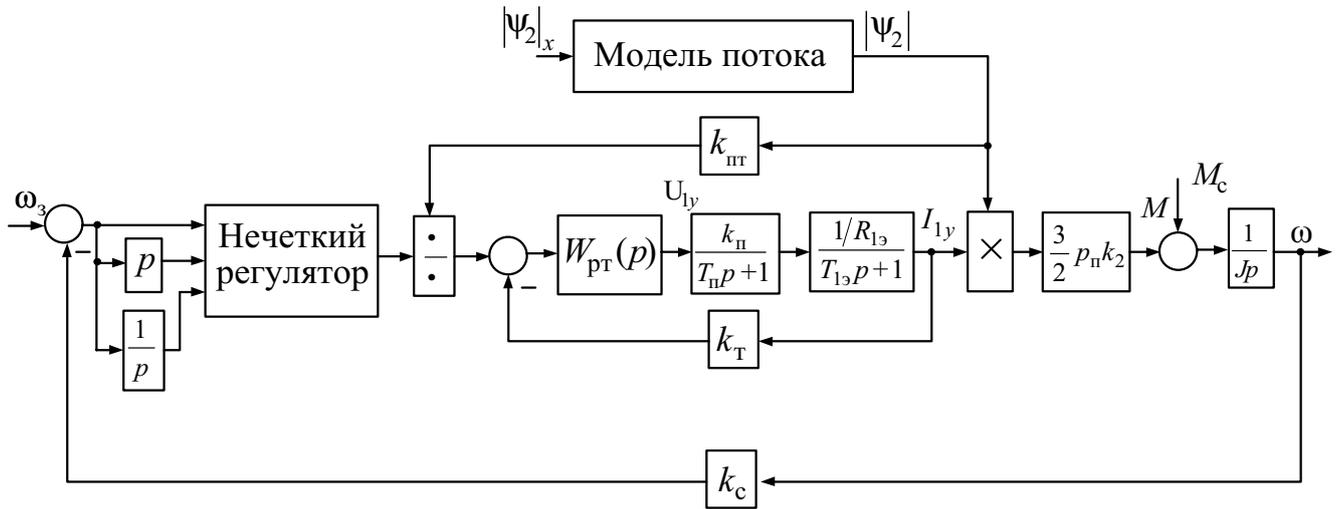


Рис. 2. Структурная схема управления с нечетким регулятором скорости

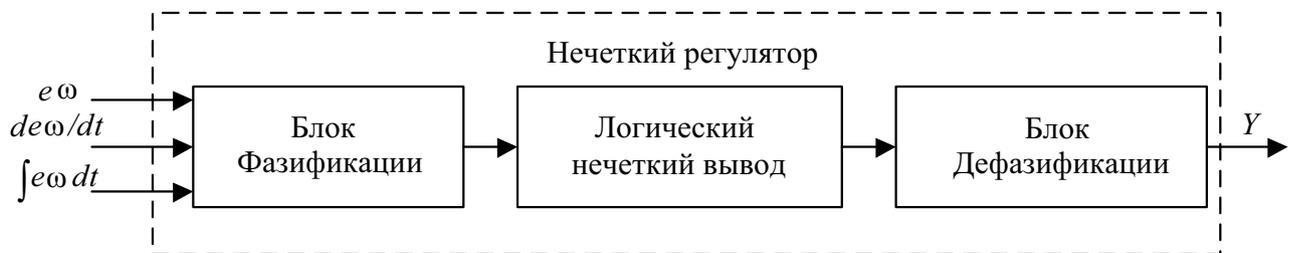


Рис. 3. Структурная схема нечеткого регулятора

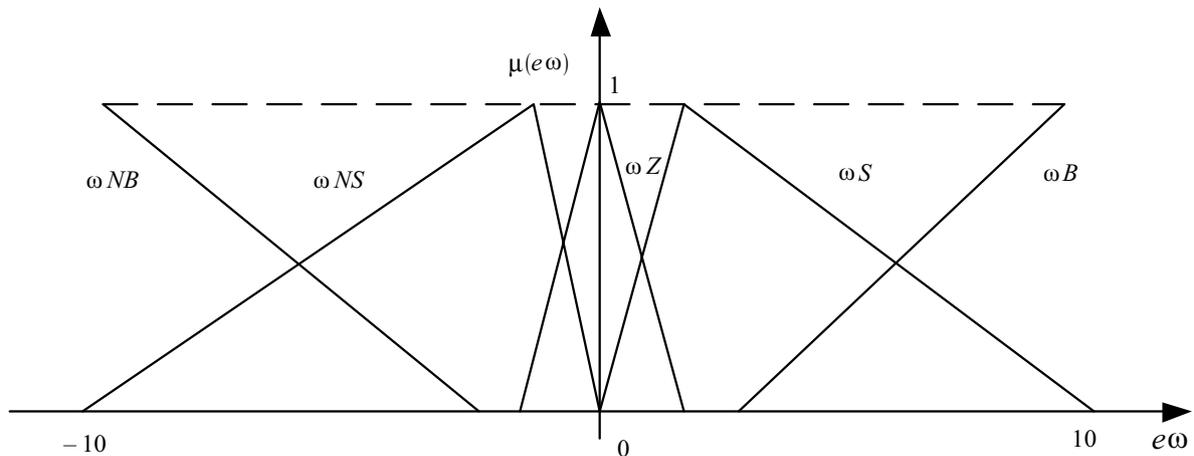


Рис. 4. График функций принадлежности ошибки по скорости

В основе нечеткого регулятора лежит база знаний эксперта, которая выполнена как набор функций принадлежности и правил вывода [15–19]. В процессе работы эти правила могут меняться персоналом в зависимости от требуемого качества управления и энергоэффективности. Структура функций принадлежности по входным параметрам нечеткого регулятора показана на рис. 4–6. Каждой функции присвоено

свое обозначение, которое используется при работе в базе правил нечеткого регулятора.

Набор правил нечеткого регулятора составлен из множества в виде:

Если $e\omega$ есть $\mu(\omega NB)$ и $\frac{de\omega}{dt}$ есть $\mu(p\omega NB)$, и $\int e\omega dt$ есть $\mu(NBI)$, тогда y есть $\mu(YLN)$.

Если $e\omega$ есть $\mu(\omega B)$ и $\frac{de\omega}{dt}$ есть $\mu(p\omega B)$, и $\int e\omega dt$ есть $\mu(BI)$, тогда y есть $\mu(YLB)$,

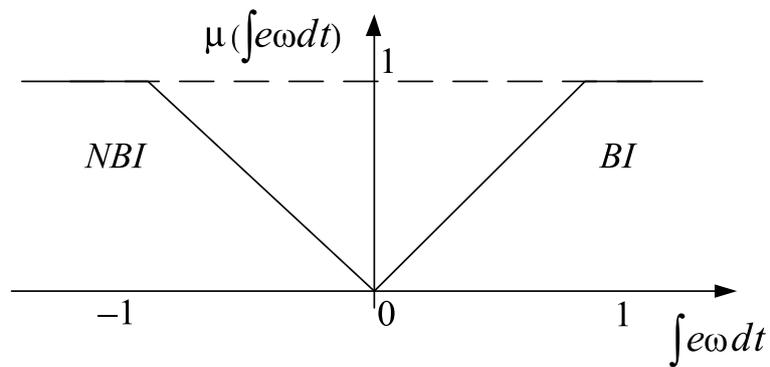


Рис. 5. График функций принадлежности интеграла ошибки по скорости

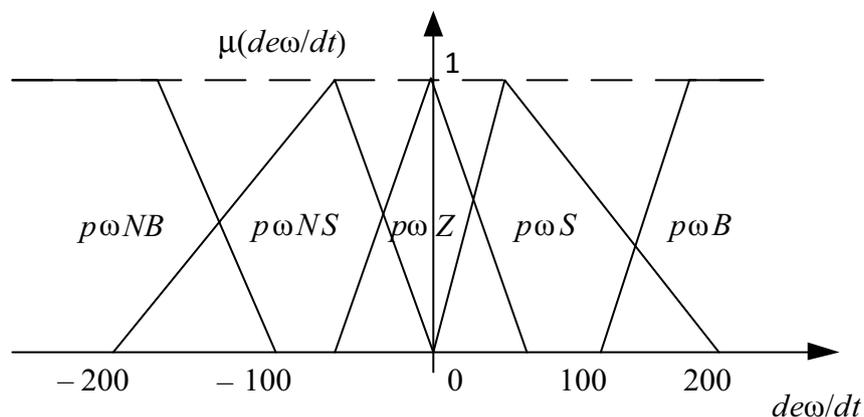


Рис. 6. График функций принадлежности интеграла ошибки по скорости

где $e\omega$, $\frac{de\omega}{dt}$, $\int e\omega dt$ — переменные ошибки по

скорости, производной ошибки по скорости и интеграла ошибки по скорости;

y — переменная управления выхода нечеткого регулятора;

$\mu(e\omega)$, $\mu\left(\frac{de\omega}{dt}\right)$, $\mu(\int e\omega dt)$, $\mu(Y)$ — заданные

функции принадлежности ошибки по скорости, производной ошибки по скорости, интегральной составляющей ошибки по скорости и выходного сигнала управления нечеткого регулятора.

Математические действия регулятора определяются как [16–19]:

1) определение принадлежности для правил каждой переменной;

2) нечеткий вывод по каждому правилу посредством логического минимума;

3) композиция посредством логического максимума и получения итогового нечеткого подмножества для переменной выхода;

4) определение значения выходного сигнала управления Y проводится центроидным методом.

Нечеткий регулятор является нелинейным и при работе позволяет реализовывать управление с ограничением координат управляемой системы. Это используется при ограничении тока двигателя. На рис. 7, 8 показаны графики тока и скорости в относительных единицах при ступенчатом входном воздействии. На рис. 7, 8 цифрой 1 отмечены ток и скорость при классическом управлении, цифрой 2 отмечены ток и скорость при применении нечеткого регулятора скорости.

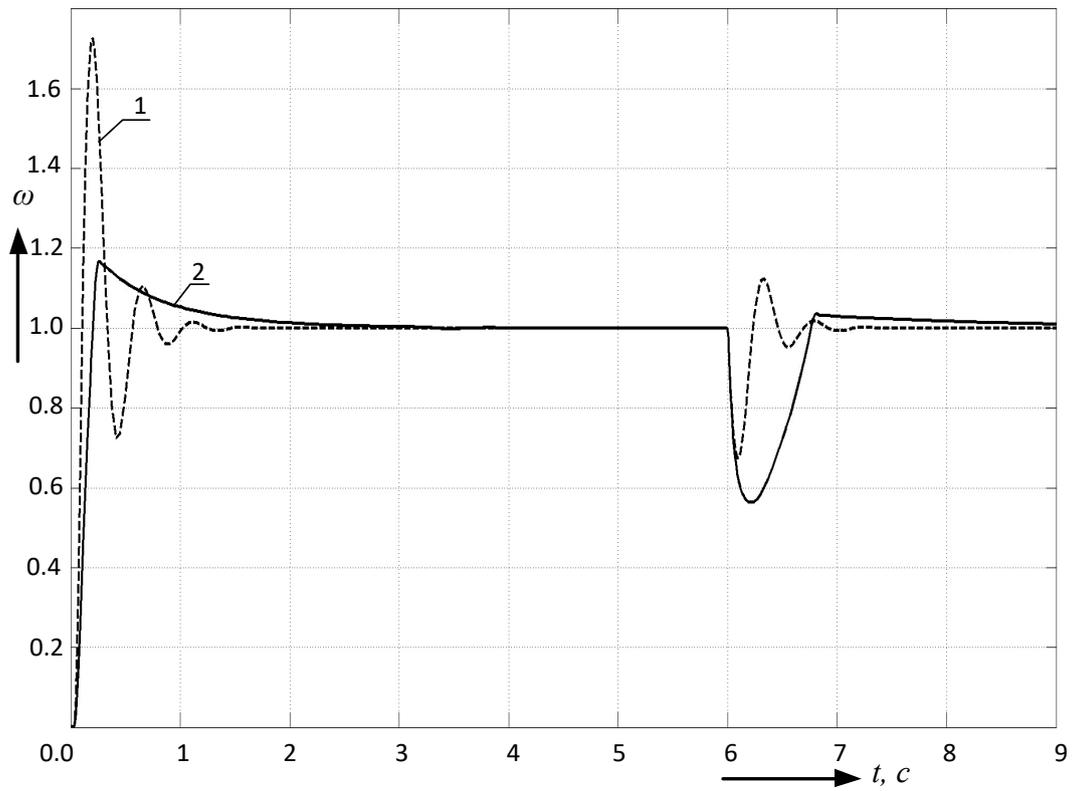


Рис. 7. Графики скорости

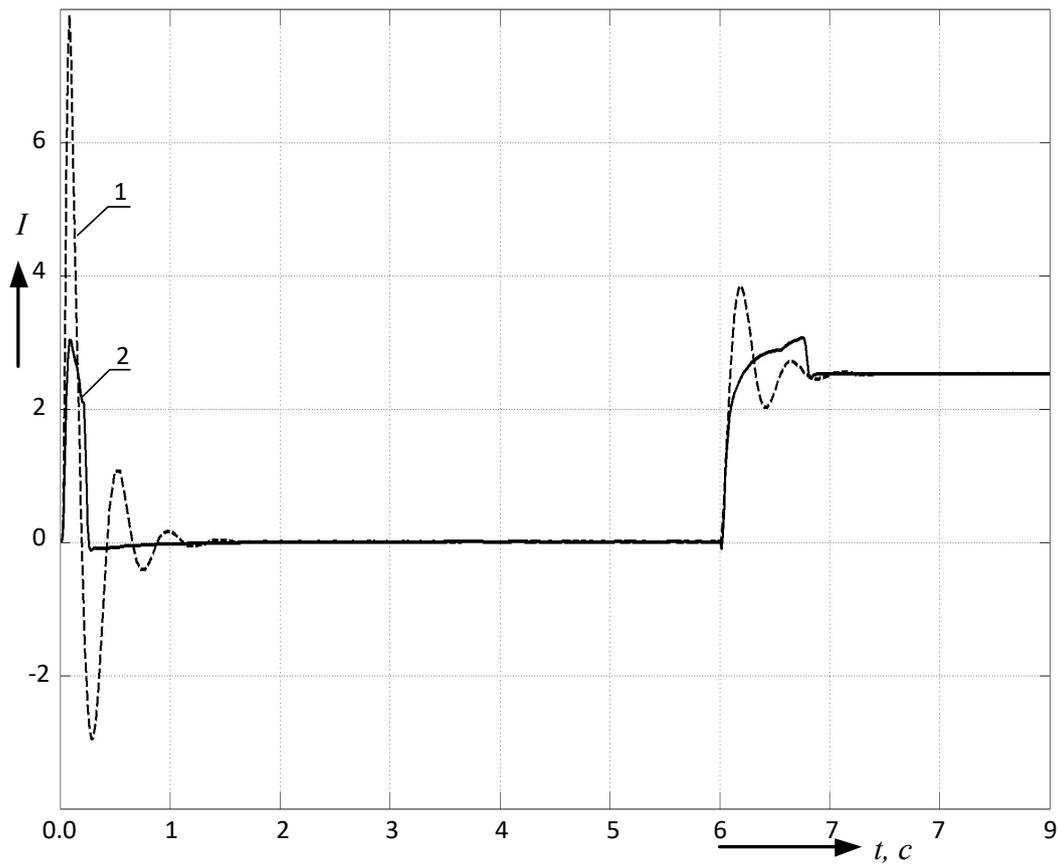


Рис. 8. Графики тока

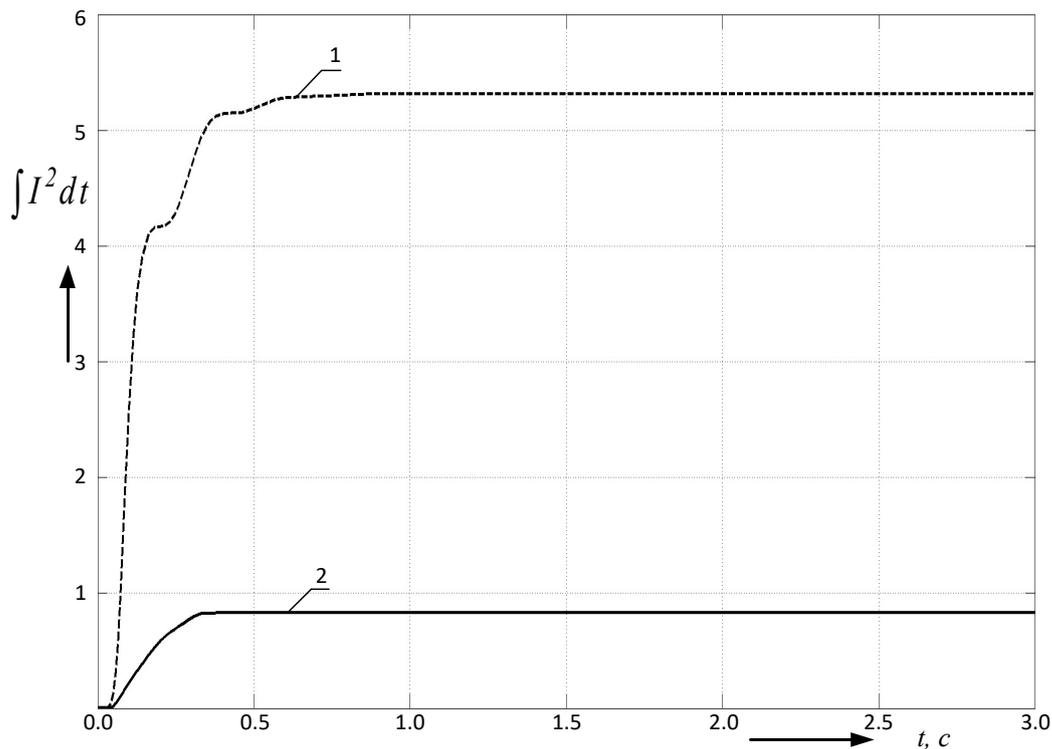


Рис. 9. Графики изменения $\int I^2 dt$ при пуске

Согласно моделированию, нечеткий регулятор управляет как координатой скорости, так и выполняет токоограничение. Поэтому в системе с нечетким регулятором ток не превышает допустимых значений в переходном процессе. После пуска с течением времени к системе приложено внешнее воздействие. В результате этого ток увеличивается и принимает новое установившееся значение в обеих системах управления. Контур скорости обрабатывает внешнее воздействие, и скорость стремится к величине задания, так как контур настроен на симметричный оптимум. При этом в системе управления с нечетким регулятором скорость двигателя также принимает величину задания скорости.

На основании [1, 6, 8, 9] термин «энергоэффективность потребления энергии из сети или автономного источника электроприводом» определяется как потери в сопротивлениях источника, линии и приемника энергии. Так как приемник энергии электродвигатель, то суммарная мощность потерь в электродвигателе определяется как:

$$\Delta P_{\text{дв}\Sigma} = \Delta P_c + \Delta P_v, \quad (12)$$

где ΔP_c — постоянные потери;

ΔP_v — переменные потери.

Переменные потери определяются протекающим током по сопротивлениям силовой части. Потери в двигателе и электрических элементах питания определяются как:

$$\Delta P_{\text{дв}\Sigma} = \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i + \Delta P_{\text{ст}}, \quad (13)$$

где I_i — ток i -го элемента;

R_i — сопротивление i -го элемента;

$\Delta P_{\text{ст}}$ — потери в стали.

Переменные потери асинхронного двигателя, в роторной и статорной цепях, определяются как:

$$\Delta P_v = 3I_1^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2'. \quad (14)$$

Принимается $I_1 \approx I_2'$ с учетом того, что потери от тока холостого хода условно учтены в постоянных потерях.

$$\Delta P_v \approx 3I_2'^2 (R_1 + R_2'). \quad (15)$$

При этом потери в силовой части в переходном процессе определяются как:

$$\Delta A_{\Sigma \text{ п.п.}} = \int_0^T \Delta P_{\text{дв}\Sigma}(t) dt \sim \int_0^T I^2(t) dt. \quad (16)$$

На рис. 9 показано математическим моделированием изменение $\int I^2 dt$ при стандартном I и нечетком 2 управлении в относительных единицах.

Ограничение тока, при нечетком управлении, в переходном процессе пуска, снижает $\int I^2 dt$, в результате уменьшаются $\Delta A_{\Sigma \text{ п.п.}}$ по сравнению с управлением со стандартными настройками регуляторов.

Заключение

Применение нечеткого регулятора в контуре скорости позволяет реализовывать управление главным движением с выполнением требований к электромеханической системе крана. В крановом механизме это дает возможность ограничивать ток в процессе работы и потери энергии при переходных процессах в системах с ограниченной мощностью источника электропитания. Определенные математическим моделированием основные параметры переходного процесса соответствуют требуемому качеству. Перерегулирование не превышает допустимого уровня при ступенчатом управляющем воздействии. Ошибка по скорости стремится к нулю, как при настройке классического регулятора на симметричный оптимум, при внешнем воздействии.

Параметры и логику работы нечеткого регулятора, полученные в результате математического моделирования, возможно применять при программировании системы управления скоростью электродвигателя главного движения. ▲

Библиографический список

1. Системы управления электроприводов: учебник для вузов / Под ред. В. М. Терехова. — 3-е изд. — М.: Академия, 2008. — 304 с.
2. Сапожников В. В. Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики: учебник для вузов ж.-д. транспорта / В. В. Сапожников, Ю. А. Кравцов, Вл. В. Сапожников; под ред. В. В. Сапожникова. — М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. — 394 с.
3. Певзнер Е. М. Электрооборудование грузоподъемных кранов / Е. М. Певзнер, Е. В. Попов и др. — Москва, 2009. — 359 с.
4. Мужичков В. И. Грузоподъемные краны на железнодорожном ходу / В. И. Мужичков, В. А. Редников. — М.: Транспорт, 1978. — 429 с.
5. Лифанов В. А. Грузоподъемные и транспортные механизмы: учебник / В. А. Лифанов, Б. П. Дофанов. — М.: Машиностроение, 1990. — 671 с.
6. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник / Г. Г. Соколовский. — М.: Издательский центр «Академия», 2006. — 272 с.
7. Москаленко В. В. Электрический привод: учебник / В. В. Москаленко. — М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. — 364 с.
8. Ключев В. И. Теория электропривода / В. И. Ключев. — М.: Энергоатомиздат, 2001. — 690 с.
9. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода: учеб. для вузов. — 6-е изд., перераб. и доп. / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. — М.: Энергоиздат, 1981. — 576 с.
10. Шрейнер Р. Т. Токоограничение в двухзонных системах частотного управления асинхронными электроприводами / Р. Т. Шрейнер, В. К. Кривовяз, С. И. Шилин // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. — Пермь, 3–7 октября 2016. — С. 243–247.
11. Виноградов А. Б. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом / А. Б. Виноградов, В. Л. Чистосердов, А. Н. Сибирцев // Электротехника. — 2003. — № 7. — С. 7–17.
12. Ещин Е. К. Энергосберегающее управление состоянием асинхронного электродвигателя // Известия вузов. Электромеханика. — 2018. — Т. 61. — № 3. — С. 31–36.
13. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: учебник для вузов / И. П. Копылов. — М.: Высшая школа, 1994. — 318 с.
14. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д. А. Поспелова. — М.: Наука, 1986. — 312 с.
15. Чернышев Д. В. Система двухуровневого управления на основе нечеткой логики. Патент на полезную модель № 117652, зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 27 июня 2012 г. / Д. В. Чернышев.
16. Поспелов Д. А. Логико-лингвистические модели в системах управления / Д. А. Поспелов. — М.: Энергоиздат, 1981. — 232 с.
17. Герман-Галкин С. Г. Проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман-Галкин. — СПб.: КОРОНА-Век, 2008. — 368 с.
18. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: Пер. с англ. / Л. Заде. — М.: Мир, 1976. 166 с.
19. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика / Д. А. Поспелов. — М.: Наука, 1986. — 288 с.

Control System of Crane Electric Drive of Platform Type on the Basis of Controller with Fuzzy Logic

Information about author

Chernyshev D. V., PhD in Engineering.

E-Mail: fersy@mail.ru

Far East State Transport University, Department of "Automation, Remote Control and Communication", Khabarovsk

Abstract: Control system on fuzzy logic basis is modelled for the electric drive of main motion of crane, located on a platform. As a basis for controllers, fuzzy logic theory and standard settings are used. The model of control system powered part is built according to vectorial control approach, with electric drive with rotor flux reference vector. Control system is implemented by submittal regulation mode with classic controller of current and with speed fuzzy controller, together, current inner circuit is setup on modular optimum. The purpose of system model development is energetical characteristics improvement at power supply from the sources with limited capacity and at meeting the requirements on control quality. In comparison with a control system with a fuzzy speed controller, a control system is used with the internal current loop tuned to the modular optimum and the external speed loop tuned to the sym-metrical optimum. The obtained parameters and setup logic of fuzzy controller of mathematical model may be used as a basis for programming in control systems. In being changed work outdoor conditions, the correction of such controller parameters is embodied by personnel on the basis of understandable logic rules and functions of belonging.

Keywords: control system; fuzzy logic; electric drive; mathematical modelling; controller.

References

1. Sistemy upravleniya jelektrorivodov: uchebnik dlja vuzov [Electric drive control systems: a textbook for universities]. Moscow: Academy Publ., 2008. 304 p. (In Russian)
2. Sapozhnikov V. V., Kravtsov Yu. A., Sapozhnikov V. I. Teoreticheskie osnovy zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemehaniki: uchebnik dlja vuzov zh.-d. transporta [Theoretical basics of railway automation and remote control: textbook for railway transport universities]. Moscow: GOU "Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte" Publ., 2008. 394 p. (In Russian)
3. Pevzner E. M., Popov E. V. Jelektrooborudovanie gruzopod'emnyh kranov [Electrical equipment for cranes]. Moscow, 2009. 359 p. (In Russian)
4. Muzhichkov V. I., Rednikov V. A. Gruzopod'emnye kranj na zheleznodorozhnom hodu [Railway cranes]. Moscow: Transport Publ., 1978. 429 p. (In Russian)
5. Lifanov V. A., B. P. Dofanov Gruzopod'emnye i transportnye mehanizmy: uchebnik [Lifting and transport mechanisms: textbook]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1990. 671 p. (In Russian)
6. Sokolovskij G. G. Jelektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovanijem: uchebnik [AC electric drives with frequency regulation: textbook]. Moscow: Akademija Publ., 2006. 272 p. (In Russian)
7. Moskalenko V. V. Jelekticheskiy privod: uchebnik [Electric drive: textbook]. Moscow: INFRA-M Publ., 2015. 364 p. (In Russian)
8. Klyuchev V. I. Teorija jelektrorivoda [Theory of electric drive]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2001. 690 p. (In Russian)
9. Chilikin M. G., Sandler A. S. Obschij kurs jelektrorivoda: ucheb. dlja vuzov [General course of the electric drive: textbook for universities]. Moscow: Energoizdat Publ., 1981. 576 p. (In Russian)
10. Shreiner R. T., Krivovjaz V. K., Shilin S. I. Tokoogranichenie v dvuhzonnnyh sistemah chastotnogo upravlenija asinhronnymi jelektrorivodami [Current limitation in two-zone frequency control systems for asynchronous electric drives]. *Trudy IX Mezhdunarodnoj (XX Vserossijskoj) konferencii po avtomatizirovannomu jelektrorivodu AJeP-2016* [Proceedings of the IX International (XX All-Russian) conference on automated electric drive AEP-2016]. 2016, pp. 243–247. (In Russian)
11. Vinogradov A. B., Chistoserdov V. L., Sibircev A. N. Adaptivnaja sistema vektornogo upravlenija asinhronnym jelektrorivodom [Adaptive system of vector control of asynchronous electric drive]. *Jelektrotehnika* [Electrical engineering]. 2003, l. 7, pp. 7–17. (In Russian)
12. Eshchin E. K. Jenergozberegajushhee upravlenie sostojanijem asinhronnogo jelektrorivodatelja [Energy-saving control of the state of an asynchronous electric motor]. *Izvestija vuzov. Jelektromehanika* [Izvestiya vuzov. Electromechanics]. 2018, vol. 61, l. 3, pp. 31–36. (In Russian)
13. Kopylov I. P. Matematicheskoe modelirovanie jelektricheskiy mashin: uchebnik dlja vuzov [Mathematical modeling of electrical machines: a textbook for universities]. Moscow: Vysshaja shkola Publ., 1994. 318 p. (In Russian)
14. Nechetkie mnozhestva v modeljah upravlenija i iskusstvennogo intellekta [Fuzzy Sets in Control Models and Artificial Intelligence]. Moscow: Nauka Publ., 1986. 312 p. (In Russian)
15. Chernyshev D. V. *Sistema dvuhurovneвого upravlenija na osnove nechetkoj logiki* [Two-level control system based on fuzzy logic]. Patent RF, no. 117652, 2012. (In Russian)
16. Pospelov D. A. Logiko-lingvisticheskie modeli v sistemah upravlenija [Logical-linguistic models in control systems]. Moscow: Energoizdat Publ., 1981. 232 p. (In Russian)
17. German-Galkin S. G. Proektirovanie mehatronnyh sistem na PK [Design of mechatronic systems on a PC]. St. Petersburg: KORONA-Vek Publ., 2008. 368 p. (In Russian)
18. Zadeh L. Ponjatje lingvisticheskoj peremennoj i ego primenenie k prinjatiyu priblizhennyh reshenij [The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions]. Moscow: Mir Publ., 1976. 166 p. (In Russian)
19. Pospelov D. A. Situacionnoe upravlenie: teorija i praktika [Situational management: theory and practice]. Moscow: Nauka Publ., 1986. 288 p. (In Russian)

МЕТОД СИНТЕЗА САМОПРОВЕРЯЕМЫХ УСТРОЙСТВ С КОНТРОЛЕМ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПО ДВУМ ДИАГНОСТИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ СЖАТИЕМ СИГНАЛОВ ОТ ОБЪЕКТА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

ЕФАНОВ Дмитрий Викторович, д-р техн. наук, доцент, член Института инженеров электротехники и электроники (IEEE member), действительный член Международной академии транспорта, заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе¹, профессор^{2,3}; e-mail: TrES-4b@yandex.ru
ПИВОВАРОВ Дмитрий Вячеславович, канд. техн. наук, старший преподаватель⁴; e-mail: pivovarov.d.v.spb@gmail.com
ЛЕОНЕНКО Олег Викторович, канд. техн. наук, научный руководитель⁵; e-mail: olegleonenko@gmail.com

¹ООО «НИПИ «ТрансСтройбезопасность»»

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

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

⁴Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах», Санкт-Петербург

⁵Белорусско-Российский университет, Инжиниринговый центр SimTech, Могилев

Предложена структура организации самопроверяемых цифровых устройств с контролем вычислений по двум диагностическим параметрам. В качестве первого параметра используется принадлежность формируемого в схеме встроенного контроля кодового слова равновесному коду «2 из 4». Вторым параметром является принадлежность каждой вычисляемой функции классу самодвойственных булевых функций. Особенностью описываемой в статье структуры организации самопроверяемых цифровых устройств является наличие схемы предварительного сжатия сигналов от объекта диагностирования. Ее использование позволяет существенно сократить структурную избыточность конечного устройства. При этом, однако, на входах элементов сжатия могут маскироваться ошибки. В статье отмечаются особенности выбора выходов объекта диагностирования, сигналы с которых будут сжиматься, и предлагается алгоритм, позволяющий минимизировать риск возникновения необнаруживаемых ошибок на входах схемы сжатия. Приведен алгоритм синтеза схемы встроенного контроля по двум диагностическим параметрам, учитывающий условия формирования полного множества проверяющих комбинаций для тестеров и элементов преобразования в блоке коррекции сигналов. Рассмотрен пример реализации алгоритма синтеза полностью самопроверяемого устройства в Logisim. Отмечаются ключевые особенности схемы встроенного контроля, реализуемой по предлагаемой структуре. Способ организации контроля вычислений по двум диагностическим параметрам представляет интерес при синтезе полностью самопроверяемых цифровых вычислительных устройств и систем.

Ключевые слова: самопроверяемая схема встроенного контроля; контроль вычислений комбинационными устройствами; предварительное сжатие сигналов; кодовый метод контроля вычислений; контроль самодвойственности функций.

DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-399-417

▼ Введение

Современные системы автоматики и вычислительной техники снабжаются специализированным диагностическим обеспечением на всех уровнях реализации, что позволяет своевременно обнаруживать ошибки и их источники, а также парировать неверные данные для исключения их влияния на

технологический процесс. Для этого устройства и функциональные модули, входящие в системы, реализуются с контролепригодными структурами и развитыми средствами самодиагностирования и рабочего диагностирования [1, 2]. Широко для контроля вычислений применяются схемы встроенного контроля (СВК) [3].

Организация СВК позволяет реализовывать рабочее диагностирование устройств автоматики и вычислительной техники [4–7]. В СВК контролируются вычисления функций объектом диагностирования. Таким образом, задача СВК заключается в фиксации возникающих искажений, что позволяет косвенно определять моменты возникновения сбоев и неисправностей. Существует несколько подходов к организации СВК.

Стандартным методом является дублирование с последующим сравнением результатов вычислений самопроверяемым компаратором [8, 9]. Такой метод широко распространен за счет типизации процесса синтеза (не требуется сложных вычислений при построении СВК, а применяется двойная модульная избыточность) и своих обнаруживающих характеристик (обнаруживаются любые сочетания искажений на выходах объекта диагностирования). Недостатком же метода дублирования является высокая вносимая структурная избыточность, которая оценивается зачастую более чем трехкратным увеличением показателей сложности технической реализации конечного устройства, наделенного свойством самопроверяемости. Еще один недостаток — это сложность (и в ряде случаев даже невозможность) обеспечения полной самопроверяемости компаратора [10].

Для снижения структурной избыточности СВК применяются методы, основанные не на модульной избыточности, а на учете особенностей реализуемых на выходах объектов диагностирования функций. К таким методам, например, относятся кодовые методы [11–15] и методы, основанные на специальном представлении вычисляемых самопроверяемым устройством функций [16, 17].

Кодовые методы подразумевают построение СВК с использованием какого-либо двоичного избыточного кода. В этом случае выходы объекта диагностирования в СВК либо дополняются, либо преобразуются в кодовые слова заранее выбранных двоичных избыточных кодов. Существует большое разнообразие таких кодов и методов синтеза СВК на их основе [18–20].

Метод, подразумевающий специальное представление вычисляемых устройством функций, основан на использовании особенностей самих

формируемых в СВК функций. Например, одним из подходов к организации СВК является выбор в качестве диагностического параметра принадлежности вычисляемых функций классу самодвойственных булевых функций [21]. На диагностические способности самодвойственных функций обращали внимание ученые и инженеры достаточно давно, например, известна работа [16], в которой обращается внимание на использование самодвойственных функций. В [22] описан метод инвертирования данных, основанный на самодвойственном представлении функций в конечных автоматах, приводятся примеры синтеза самодвойственных триггеров. Самодвойственные самопроверяемые вычислительные устройства исследованы в [23–28]. Известны три монографии [17, 29, 30], обобщающие исследования в этом направлении.

Исследования авторов данной статьи направлены на развитие комплексного использования кодового метода и метода, основанного на самодвойственном представлении функций, вычисляемых объектом диагностирования. Подробный анализ показал, что если взять произвольное комбинационное устройство и не модифицировать его структуру, то один из кодовых методов не всегда позволит покрывать все множество возникающих на его выходах ошибок. Увеличение же процента покрываемых ошибок достигается за счет применения дополнительного контроля самодвойственности вычисляемых устройством функций. Так, в статьях [31, 32] мы предложили использовать для диагностирования комбинационных устройств разделение их выходов на группы по четыре выхода в каждой с одновременным контролем в СВК принадлежности формируемого кодового вектора равновесному коду «2 из 4», а каждой из четырех функций — классу самодвойственных функций алгебры логики. В ряде случаев удается добиться весомого снижения структурной избыточности цифрового устройства по сравнению с применением дублирования при 100%-м покрытии ошибок на выходах объекта диагностирования.

Дальнейшие исследования показали, что можно еще более сократить вносимую структурную избыточность при организации СВК за

счет использования так называемого предварительного сжатия сигналов [33] с последующим контролем вычислений. Данная работа посвящена описанию обозначенного подхода к организации самопроверяемых цифровых вычислительных устройств и систем.

1. Структура организации самодвойственной схемы встроенного контроля

Гибридная структура для организации самодвойственной схемы встроенного контроля изображена на рис. 1. В ней объектом диагностирования является комбинационное устройство $F(x)$, вычисляющее 8 булевых функций $f_1...f_8$.

В СВК для организации контроля вычислений использовано несколько блоков. Выходы объекта диагностирования в СВК непосредственно подключаются ко входам схемы сжатия сигналов (СС — схема сжатия). В представленной структуре подразумевается попарное

сжатие сигналов с применением двухвходовых элементов сложения по модулю $M = 2$ (элементов XOR). Таким образом, восьмибитный вектор рабочих функций $\langle F \rangle$ преобразуется в четырехбитный вектор $\langle \Phi \rangle$: $\langle F \rangle \rightarrow \langle \Phi \rangle$. Далее этот вектор $\langle \Phi \rangle$ контролируется по способу, описанному нами в [31, 32].

Каждая из функций вектора $\langle \Phi \rangle$ преобразуется в блоке коррекции сигналов (БКС) по правилу: $\phi_i \oplus g_i = h_i, i = \overline{1,4}$. Таким образом, вектор $\langle \Phi \rangle$ преобразуется в вектор $\langle H \rangle$: $\langle \Phi \rangle \rightarrow \langle H \rangle$.

Преобразование осуществляется с использованием функций дополнения $g_1...g_4$, вычисляемых блоком контрольной логики $G(x)$, и подразумевает получение из любого вектора $\langle \phi_4 \phi_3 \phi_2 \phi_1 \rangle$ вектора $\langle h_4 h_3 h_2 h_1 \rangle$, принадлежащего равновесному коду «2 из 4» (2/4-коду). Это возможно всегда и большим числом способов, что позволяет влиять на показатели сложности технической реализации блока $G(x)$ [34].

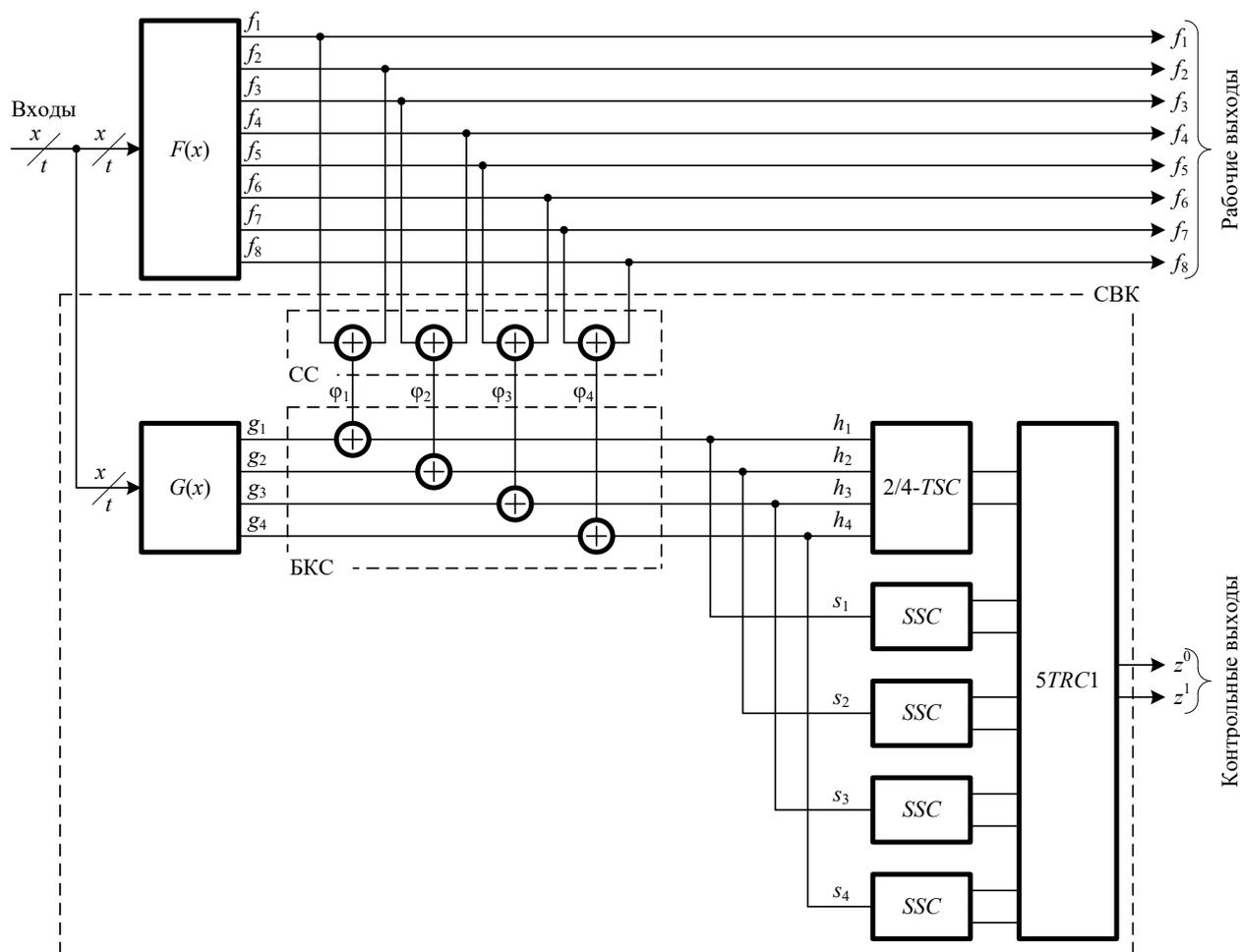


Рис. 1. Структура организации гибридной самодвойственной схемы встроенного контроля

Контроль принадлежности кодового вектора $\langle h_4 h_3 h_2 h_1 \rangle$ 2/4-коду осуществляется с использованием полностью самопроверяемого тестера 2/4-*TSC* [35]. 2/4-*TSC* снабжен четырьмя входами и двумя выходами. При поступлении на его входы кодового слова 2/4-кода на выходах формируется парафазный сигнал. Присутствие непарафазного сигнала свидетельствует о наличии ошибки в вычислениях либо о наличии внутренней ошибки 2/4-*TSC*. Особенности синтеза 2/4-*TSC* и его свойства подробно описаны в большом числе работ, в том числе в [36]. Необходимо напомнить читателю, что 2/4-*TSC* имеет наиболее простую структуру по сравнению с тестерами любых других равновесных кодов, что является несомненным его преимуществом при организации СВК. Кроме того, наиболее простая реализация 2/4-*TSC* позволяет для полной его проверки подавать на входы только четыре из шести рабочих кодовых комбинаций, принадлежащих множеству $\{0011, 1001, 0110, 1100\}$.

Преобразование функций φ_i таково, что позволяет получать функции h_i , принадлежащие к классу самодвойственных булевых функций. Каждая самодвойственная функция $s_1 \dots s_4$ контролируется с помощью отдельного тестера самодвойственности (*SSC, self-dual self-checking checker*) [31, 32]. Он имеет один вход и два выхода, так же как и 2/4-*TSC*, функционирующих в парафазной логике. Выходы всех пяти тестеров объединяются на входах самопроверяемой схемы сжатия парафазных сигналов *STRC1*, реализуемой на основе стандартных модулей сжатия двух парафазных сигналов в один (*TRC, two-rail checker*) [37]. Выходы схемы сжатия z^0 и z^1 являются контрольными выходами СВК. Смысл значений на них трактуется аналогично значениям на выходах тестера равновесного кода или тестера самодвойственности.

Структура (см. рис. 1) функционирует в импульсном режиме. Двоичные сигналы 0 и 1 представляются в ней последовательностями импульсов: 0 — 0101...01, 1 — 1010...10. Здесь мы сознательно опускаем подробное описание самодвойственных цифровых устройств, фокусируя внимание читателя на самом методе. Особенности же обустройства структуры при импульсном режиме работы рассмотрены в [29, 30].

Важным для работы схемы является то, что в СВК для тестирования используется пара ортогональных по всем переменным кодовых векторов. На каждом из векторов пары формируется кодовое слово 2/4-кода (соответственно, эти кодовые слова также ортогональны по всем переменным).

Неисправность в блоке $F(x)$ искажает значения каких-либо из выходов, что воспринимается схемой встроенного контроля и приводит либо к нарушению принадлежности кодового вектора $\langle h_4 h_3 h_2 h_1 \rangle$ 2/4-коду, либо к нарушению самодвойственности каждой из функций $h_i = s_i, i = \overline{1, 4}$, либо к тому и другому событию.

Обнаруживающая способность СВК повышается за счет использования именно двух диагностических параметров. 2/4-кодом не обнаруживаются любые ошибки, сохраняющие вес кодового слова. К ним относятся двукратные ошибки, связанные с искажением одного нулевого и одного единичного разрядов, а также любые четырехкратные ошибки. Число таких ошибок в общем случае равно $C_4^2(C_4^2 - 1) = 30$. Контроль самодвойственности позволяет повысить число обнаруживаемых в СВК ошибок. При контроле самодвойственности ошибка не будет обнаружена, если не нарушится самодвойственность функции на паре противоположных наборов. Это условие значительно повышает обнаруживающие характеристики метода.

Структура (см. рис. 1) является частным случаем обобщенной гибридной структуры, приведенной на рис. 2 в [38], считается базовой и строится для группы из восьми выходов устройства $F(x)$. Для многовыходных устройств осуществляется разделение на несколько групп по 8 выходов. Может быть использована схема с разделением выходов и на группы с меньшим числом выходов в каждой. Например, на рис. 2 представлен вариант для контроля по описанному методу устройства с 6 выходами. В отличие от структуры, приведенной на рис. 1, здесь один из выходов блока $G(x)$ напрямую подключается к входу 2/4-*TSC*, а для контроля самодвойственности используется три тестера *SSC*.

В качестве схемы сжатия сигналов можно использовать любой другой преобразователь.

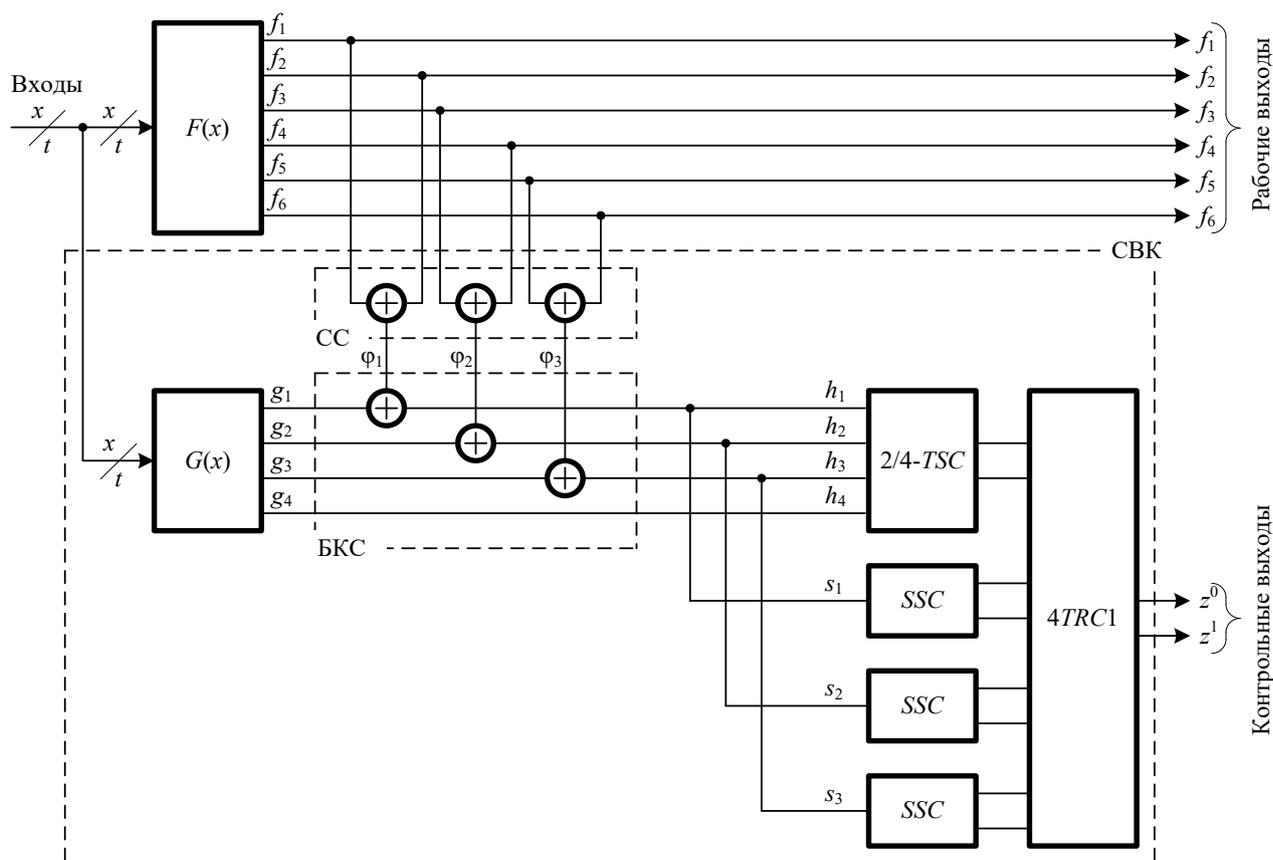


Рис. 2. Структура организации гибридной самодвойственной схемы встроенного контроля для 6-выходного устройства

К примеру, можно сжимать на сумматоре по модулю $M=2$ сигналы с нескольких выходов объекта диагностирования или же реализовывать схему сжатия по кодам с суммированием [39].

2. Особенности выбора пар сжимаемых выходов

Особенностью приведенных выше структур (см рис. 1, 2) является использование схемы сжатия сигналов. Преимуществом ее использования является уменьшение числа контролируемых выходов и, соответственно, уменьшение аппаратных затрат на реализацию СВК. Недостаток же связан с тем, что снижается обнаруживающая способность самой СВК. Анализ показывает, что даже при использовании для контроля вычислений двух диагностических параметров двукратная ошибка в паре выходов, сигналы с которых сжимаются, может оказаться замаскированной. Для повышения обнаруживающих способностей СВК используются исключительно схемотехнические методы. К таким методам

относятся увеличение числа групп выходов с дополнительным включением их в различные группы или же целенаправленный подбор таких пар сжимаемых выходов, на которых исключены одновременные искажения.

В [40] предложен алгоритм выбора пар сжимаемых выходов, подразумевающий покрытие выходов контролируемого устройства парами независимых выходов (Н-выходов). На практике встречаются такие устройства, выходы которых невозможно полностью покрыть парами Н-выходов. В этом случае требуется иное решение.

Рассмотрим пример, представленный на рис. 3.

Устройство снабжено 4 входами x_1, x_2, x_3, x_4 и 8 выходами f_1, f_2, \dots, f_8 . Для организации СВК данного устройства необходимо подобрать пары сжимаемых выходов.

В идеальном случае пары не должны иметь общих логических элементов, пути от которых ведут к обоим выходам. В пары следует объединять выходы, имеющие наименьшее число

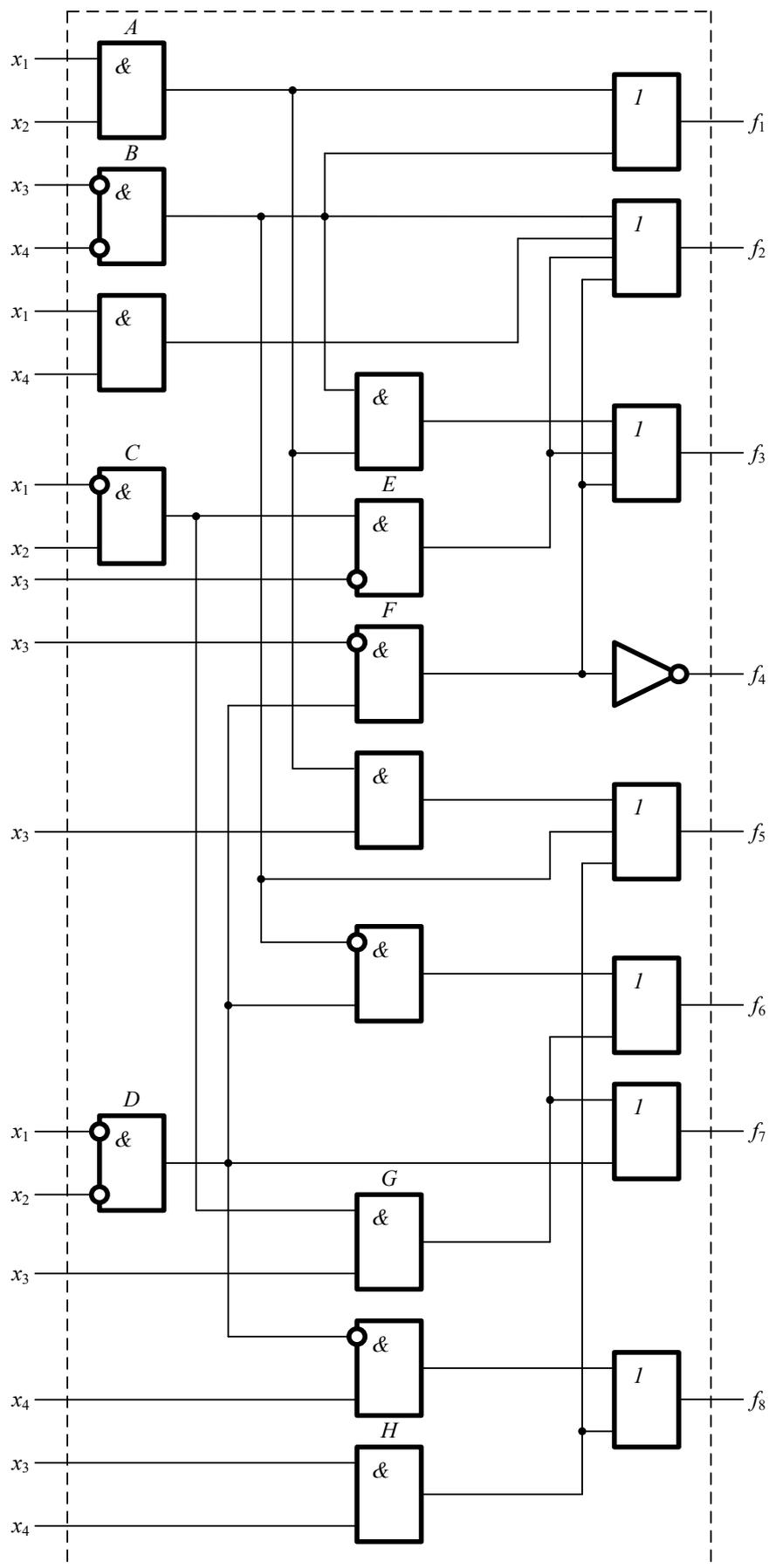


Рис. 3. Схема исходного комбинационного устройства

общих элементов. Для этого можно воспользоваться следующим подходом.

На рис. 3 латинскими буквами указаны те элементы устройства, которые связаны путями более чем с одним его выходом. Неисправности данных элементов могут приводить к кратным ошибкам на выходах схемы.

Шаг 1 — построение матрицы парности выходов устройства.

Матрица представляет собой таблицу, в которой по строкам и столбцам перечисляются выходы устройства. На пересечении строки и столбца указывается число общих элементов для каждой пары.

Для рассматриваемого примера матрица парности приведена в табл. 1.

Шаг 2 — построение таблицы пар выходов.

Таблица пар выходов представляет собой таблицу, в которой пары выходов разбиваются на группы по числу общих логических элементов (табл. 2).

Шаг 3 — выбор граничного значения допустимого количества общих элементов.

На практике зачастую оказывается так, что все выходы устройства не могут быть разбиты на пары без общих элементов. Поэтому необходимо разбить выходы на пары таким образом, чтобы можно было покрыть все выходы такими группами N , которые содержат наименьшее число общих элементов. Это можно сделать пошагово, покрывая выходы группами по числу общих элементов от меньшего их числа к большему и выбирая граничное число N .

Описываемый подход подразумевает поиск такого числа N , которое дает реализуемый случай разбиения выходов на пары. Ясно, что можно было бы выбрать максимальное число, но при этом не исключалось бы такое покрытие, при котором пары будут иметь большое число общих элементов. Для уменьшения их числа определим по таблице покрытия, последовательно анализируя части, соответствующие той или иной группе, удастся или нет покрыть все выходы парами с наименьшим числом N .

Парами из группы с № 0 покрыть все выходы невозможно. Отсюда как раз следует невозможность применения алгоритма, описанного в [40] для выбора пар сжимаемых выходов.

Таблица 1. Матрица парности выходов

Выход	Пара							
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8
f_1	—	1	2	0	2	1	0	0
f_2	1	—	5	2	1	3	2	1
f_3	2	5	—	2	2	3	2	1
f_4	0	2	2	—	0	1	1	1
f_5	2	1	2	0	—	1	0	1
f_6	1	3	3	1	1	—	3	1
f_7	0	2	2	1	0	3	—	1
f_8	0	1	1	1	1	1	1	—

Таблица 2. Классификация пар выходов по числу общих элементов

	Группа по числу общих элементов					
	0	1	2	3	4	5
(f_1, f_4)		(f_1, f_2)	(f_1, f_3)	(f_2, f_6)	—	(f_2, f_3)
(f_1, f_7)		(f_1, f_6)	(f_1, f_5)	(f_3, f_6)		
(f_1, f_8)		(f_2, f_5)	(f_2, f_4)			
(f_4, f_5)		(f_2, f_8)	(f_2, f_7)			
(f_5, f_7)		(f_3, f_8)	(f_3, f_4)			
		(f_4, f_8)	(f_3, f_5)			
		(f_5, f_6)	(f_3, f_7)			
		(f_5, f_8)	(f_4, f_6)			
		(f_6, f_8)	(f_4, f_7)			
		(f_7, f_8)	(f_6, f_7)			

Анализируется часть таблицы, соответствующая группе с № 1. При этом необходимо учитывать и покрытия группы с номером № 0. В данном случае также покрыть все выходы не удастся.

Учитывая часть таблицы, соответствующую группе с № 2, выходы становятся возможным покрыть парами без пересечений выходов в каждой.

В рассматриваемом примере число $N = 2$.

Шаг 4 — выбор пар для покрытия выходов.

Группы с числом общих элементов, меньшим или равным числу N , назовем «желательными», а группы с числом общих элементов, большим N , — «нежелательными». При использовании метода подбора может оказаться так, что при поиске последних пар выходов возможен их выбор только из группы нежелательных выходов. В этом случае подбор придется начинать заново. Именно поэтому рассмотрим сначала группу нежелательных пар выходов.

Для того чтобы исключить использование пар из нежелательных групп, необходимо, чтобы как минимум один выход из каждой пары присутствовал в паре из группы желательных. Поэтому из пар нежелательной группы выбирается выход и находится пара из желательной группы с данным выходом. При этом рекомендуется выбирать выход, наиболее часто встречающийся в группе нежелательных пар. В данном примере это выход f_6 .

При выборе пары выходов с f_6 необходимо выбрать пару, имеющую минимальное количество общих элементов. При этом если существует несколько таких пар, то рекомендуется выбирать пару с тем выходом, который наименьшее количество раз встречается в парах с меньшим количеством общих элементов. В данном примере выберем пару (f_6, f_8) .

После этого в группе нежелательных выходов остается пара (f_2, f_3) . Оба выхода встречаются в группе нежелательных выходов одинаковое количество раз, поэтому можно выбрать любой. Выберем выход f_2 . Для него выбирается группа (f_2, f_5) .

Далее рассматриваются группы желательных пар. Из них поочередно выбираются оставшиеся возможные пары, начиная с пар с наименьшим количеством общих элементов. В данном случае сначала выбирается пара (f_1, f_4) . После этого остается одна возможная пара выходов — (f_3, f_7) .

Таким образом, получается четыре пары (f_6, f_8) , (f_2, f_5) , (f_1, f_4) , (f_3, f_7) с количеством общих элементов соответственно 1, 1, 0, 2. В случае если не удастся выбрать пары выходов, следует вернуться к выбору числа N и уменьшить его значение.

3. Пример синтеза самодвойственного цифрового устройства

После выбора пар сжимаемых выходов можно перейти к процедуре синтеза самодвойственного цифрового устройства по структуре, изображенной на рис. 1. Из рис. 1 ясно, что все модули в СВК являются стандартными, за исключением блока контрольной логики $G(x)$. Задачей синтеза как раз является получение его структуры в выбранном элементном базисе. В нашем случае ограничимся только получением логических выражений, описывающих его выходы.

Таблица 3. Описание работы исходного устройства

№	x_1	x_2	x_3	x_4	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8
0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0
1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0
2	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0
3	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
4	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
5	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1
6	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0
7	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
8	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0
9	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1
10	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
11	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1
12	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
13	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1
14	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0
15	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1

Рассмотрим пример, приведенный на рис. 3. Таблица 3 является таблицей истинности, описывающей его работу.

Получим функции выходов блока контрольной логики $G(x)$. Для этого необходимо выполнить следующее.

Шаг 1 — получение функций на выходах схемы сжатия.

Из предыдущего пункта были получены пары сжимаемых выходов: $\varphi_1 = f_6 \oplus f_8$, $\varphi_2 = f_2 \oplus f_5$, $\varphi_3 = f_1 \oplus f_4$, $\varphi_4 = f_3 \oplus f_7$. Их значения заносятся в табл. 4, где приводятся значения сигналов на каждой линии СВК.

Шаг 2 — получение значений функций h_1 , h_2 , h_3 и h_4 .

Значения данных функций получаются путем их доопределения с учетом двух аспектов:

Кодовое слово, соответствующее функциям h_1 , h_2 , h_3 и h_4 , на каждом входном наборе должно принадлежать 2/4-коду. При этом целесообразно использовать наиболее простую реализацию тестера из [36], для полной проверки которого требуется подать на входы кодовые слова из множества {0011, 1001, 0110, 1100}.

Каждая из функций h_1 , h_2 , h_3 и h_4 должна быть самодвойственной. Это означает, что на противоположных входных наборах относительно

Таблица 4. Значения функций на линиях СВК и тестовые комбинации для элементов преобразования

№	x_1	x_2	x_3	x_4	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	h_1	h_2	h_3	h_4	g_1	g_2	g_3	g_4	XOR_1	XOR_2	XOR_3	XOR_4
0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	00	00	10	01
1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	10	10	00	00
2	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	10	00	11	10
3	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	00	10	10	11
4	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	00	00	01	10
5	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	11	10	10	11
6	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	10	00	11	10
7	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	01	10	00	11
8	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	00	00	10	01
9	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	11	10	10	00
10	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	01	00	11	01
11	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	10	01	00	00
12	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	01	00	00	10
13	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	11	10	00	00
14	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	00	11	00	01
15	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	10	01	01	00

середины таблицы истинности каждая из функций h_1, h_2, h_3 и h_4 должна иметь противоположное значение.

Из п. 2 становится ясным, что требуется заполнить либо нижнюю, либо верхнюю половину таблицы истинности в столбцах h_1, h_2, h_3 и h_4 . Сделаем это для первой половины таблицы, а затем отразим антисимметрично относительно ее середины (см. табл. 4).

При заполнении столбцов эвристически мы старались сформировать каждую из четырех комбинаций множества {0011, 1001, 0110, 1100} одинаковое количество раз. В этом случае тест на входы 2/4-TSC будет поступать чаще с большей вероятностью (в зависимости, конечно, от режима работы устройства), чем при неравномерном формировании кодовых слов. Тем не менее это не самый принципиальный момент синтеза. Важной особенностью является возможность получения функций g_1, g_2, g_3 и g_4 с наиболее простой логической записью, что позволит построить более простой блок контрольной логики.

Шаг 3 — проверка формирования полного теста для элементов преобразования в блоке коррекции сигналов.

На входы каждого сумматора по модулю $M = 2$ (элемента XOR) должны хотя бы по разу поступать тестовые комбинации из множества {00, 01, 10, 11} [41]. Проверка формирования полного множества тестовых комбинаций осуществляется по табл. 4 путем сравнения значений в соответствующих столбцах построчно. В столбцы $XOR_1 — XOR_4$ в табл. 4 занесены формирующиеся на входах элементов коррекции комбинации. Полное множество тестовых комбинаций в рассматриваемом примере для каждого элемента преобразования формируется. Если для какого-то из элементов преобразования одна из тестовых комбинаций не формируется, то блок коррекции полностью самопроверяемым не будет. Для достижения данного свойства нужно вернуться к шагу 2 и иначе доопределить значения функций h_1, h_2, h_3 и h_4 на выборочных входных наборах. Подобная процедура ранее рассматривалась для синтеза СВК для несамодвойственных устройств с контролем вычислений по равновесным кодам «1 из m » [42].

Шаг 4 — получение значений функций g_1, g_2, g_3 и g_4 .

Значения данных функций получаются путем оптимизации по любому из известных

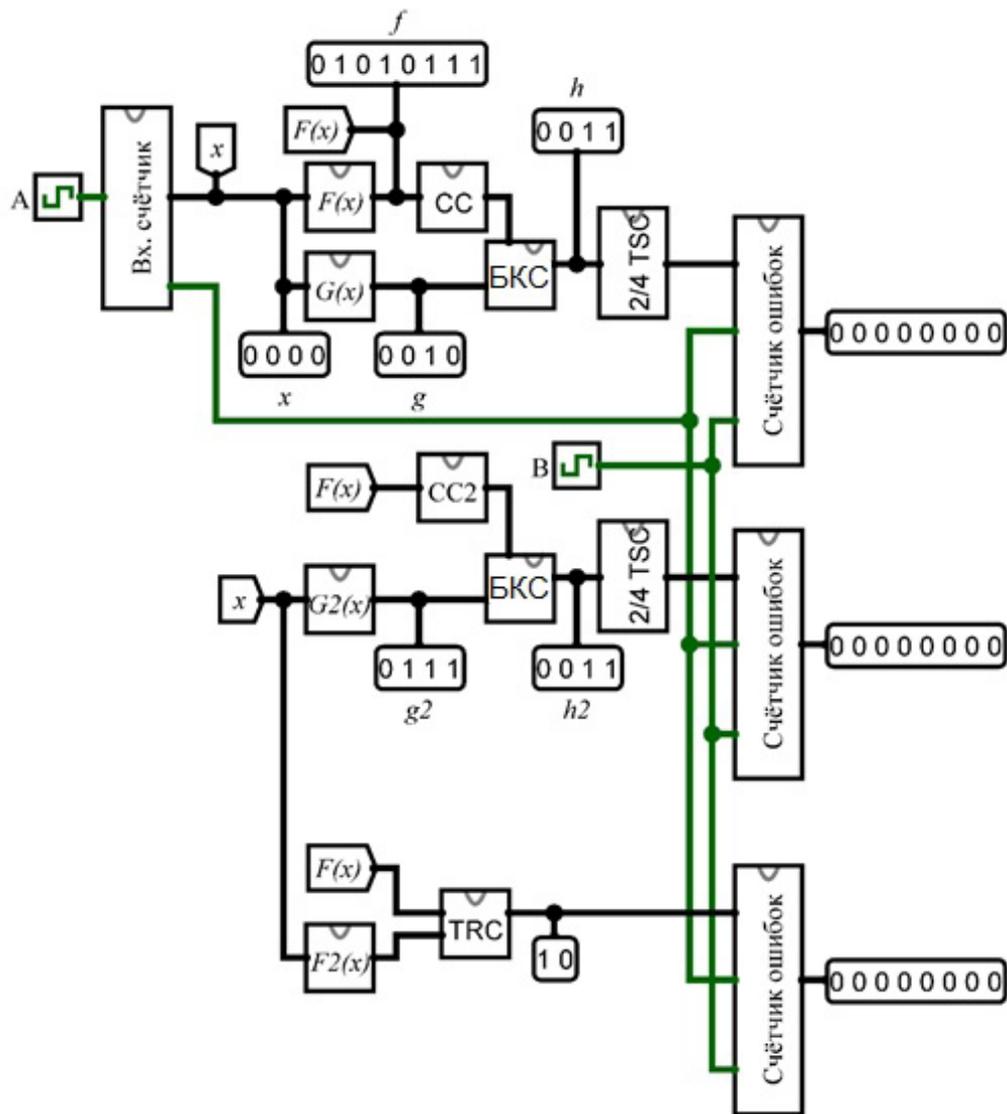


Рис. 4. Общая схема эксперимента

методов как отдельной функции, так и системы функций [43]. Используем метод Карно и оптимизируем каждую из функций g_1, g_2, g_3 и g_4 . Процедура оптимизации тривиальна и здесь не приводится. Результат оптимизации следующий:

$$g_1 = \overline{x_1 x_2 x_3} \vee \overline{x_1 x_2 x_4} \vee \overline{x_1 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4};$$

$$g_2 = x_1 x_3 x_4 \vee x_1 x_2 x_3;$$

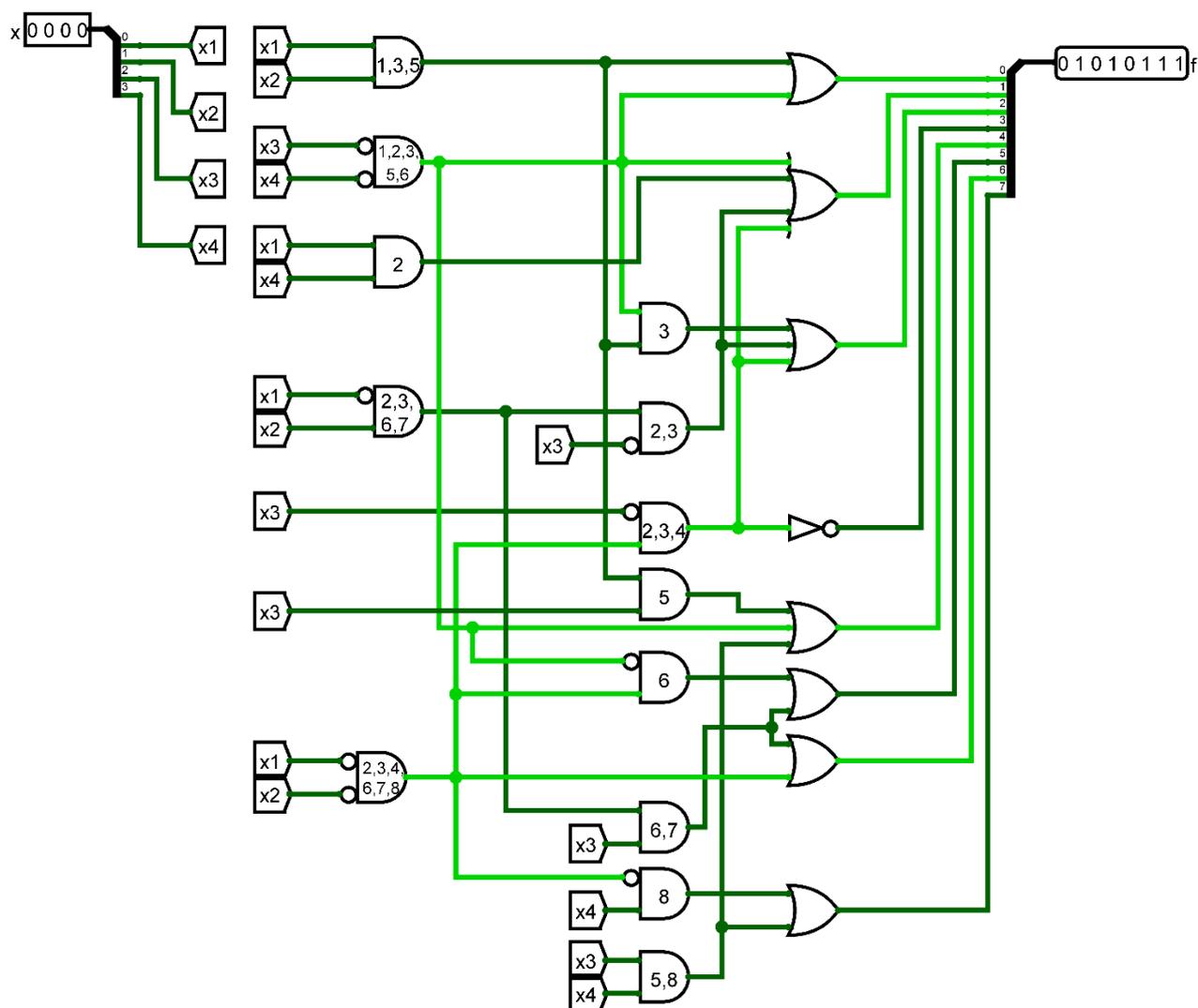
$$g_3 = \overline{x_1 x_2 x_4} \vee \overline{x_2 x_3 x_4} \vee x_1 x_2 x_3 x_4;$$

$$g_4 = \overline{x_1 x_3 x_4} \vee \overline{x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_4}.$$

В данной работе мы демонстрируем сам подход и не обсуждаем вопросы оценки сложности

технической реализации самопроверяемого устройства, не вводя каких-либо метрик. Подобная оценка должна производиться с использованием наборов контрольных комбинационных схем и специальных средств синтеза логических структур [44–46].

Также отметим, что в статье не рассмотрен вопрос тестируемости элементов схемы сжатия. Соответственно, алгоритм выбора пар сжимаемых выходов не учитывает возможность гарантированного формирования полного множества тестовых комбинаций на входах каждого из элементов сжатия сигналов. Однако из сравнения соответствующих столбцов в табл. 3 можно сделать вывод о том, что полный тест на элементы схемы сжатия поступает. Вопрос выбора пар


 Рис. 5. Схема блока $F(x)$

сжимаемых выходов с учетом критерия формирования полного теста на входах элементов сжатия является темой будущих исследований.

4. Моделирование самодвойственного цифрового устройства

Для проверки эффективности описанного метода был проведен эксперимент со схемой из примера рис. 3. В эксперименте сравнивалось количество обнаруженных ошибок в устройстве, реализованном по описанному выше методу, с устройством, при реализации которого пары сжимаемых выходов выбирались случайным образом.

На рис. 4 показана общая схема для проведения эксперимента. Схема построена аналогично

схеме, описанной в [31, 47]. Входной счетчик синхронно с генератором A генерирует входные комбинации для устройств с тремя СВК. Блок $F(x)$ — контролируемая схема, изображенная на рис. 3. Ее реализация в Logisim приведена на рис. 5. Блоки $G(x)$, $G2(x)$ — это блоки контрольной логики для СВК, реализованных по предложенному методу с выбором определенных пар сжимаемых выходов и со сжатием случайно выбранных выходов соответственно. Схемы блоков $G(x)$ и $G2(x)$ приведены на рис. 6 и 7. БКС преобразуют при помощи элементов «сложение по модулю 2» сигналы с выходов СС в слова соответствующего кода с обнаружением ошибок. Блок $F2(x)$ на рис. 4 представляет собой копию контролируемой схемы с инверсией

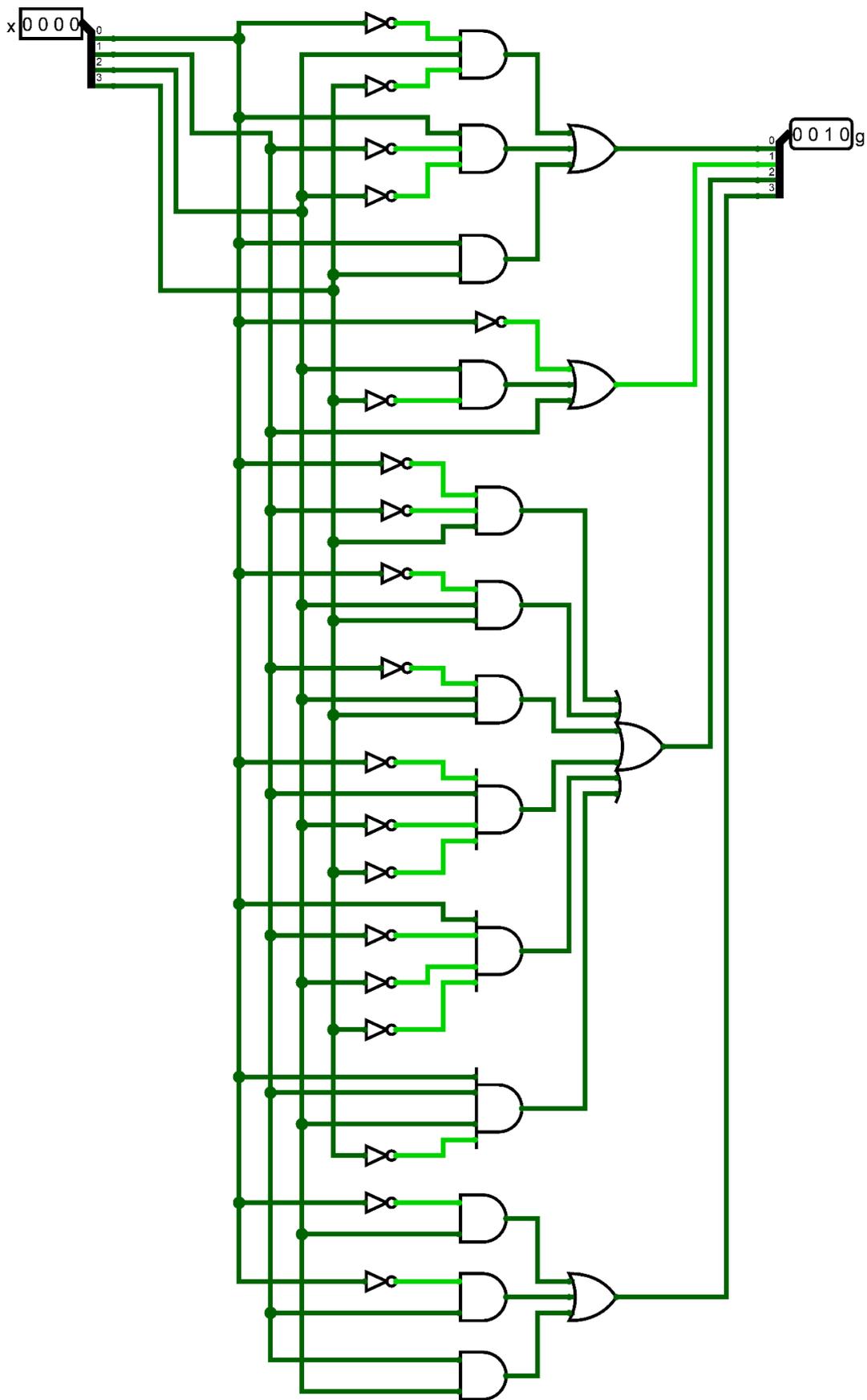


Рис. 6. Схема блока $G(x)$

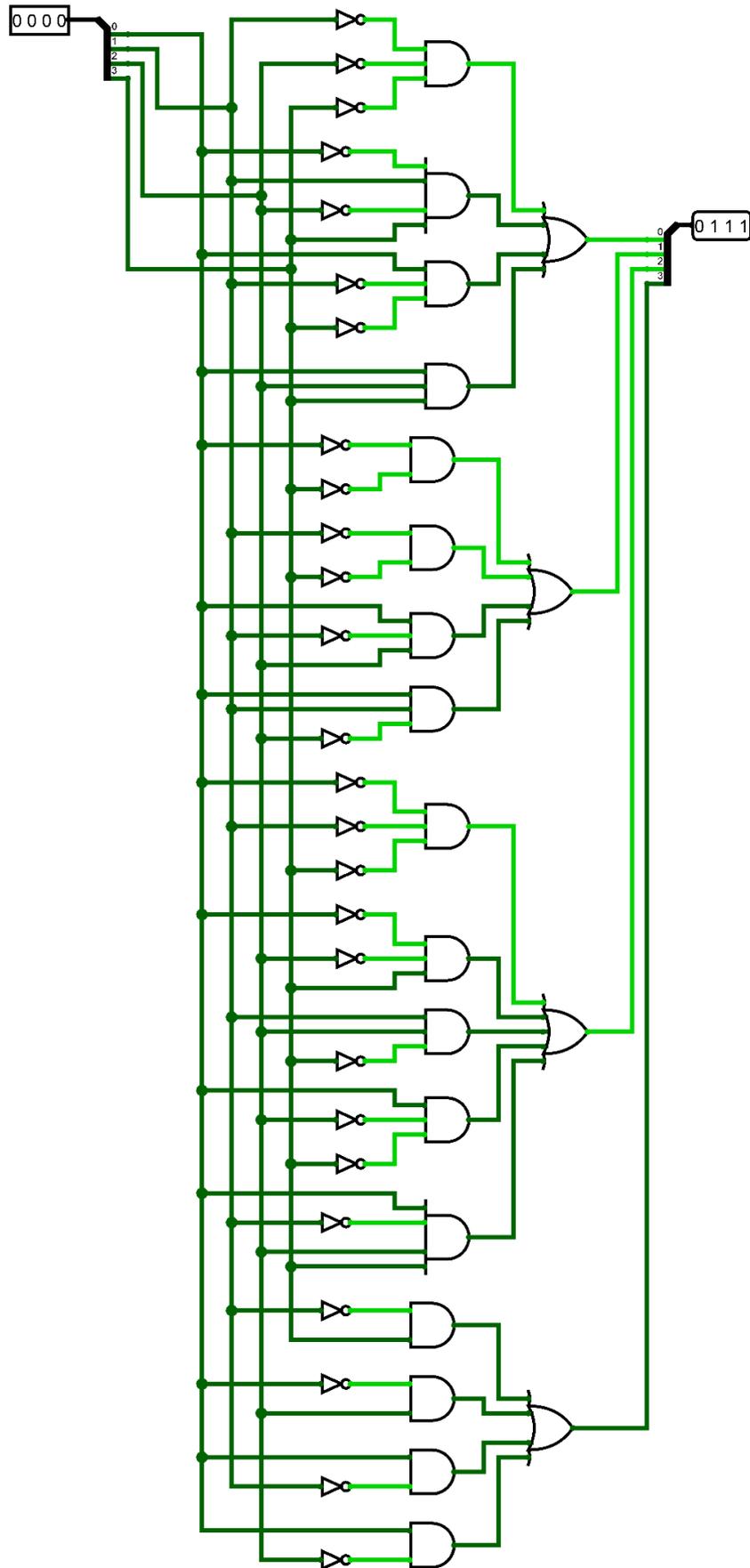


Рис. 7. Схема блока $G2(x)$

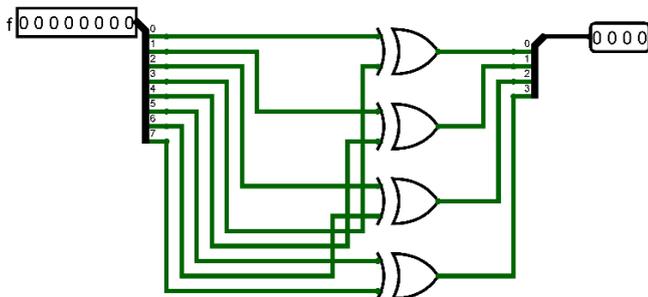


Рис. 8. Схема блока СС

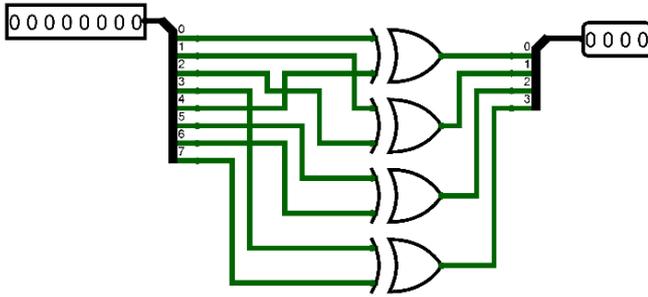


Рис. 9. Схема блока СС2

выходов. Он использован для реализации СВК по методу дублирования. Дублирование позволяет идентифицировать любые возникающие в контролируемой схеме ошибки, что использовано для подсчета общего их количества. Блоки СС и СС2 на рис. 4 являются схемами сжатия для СВК с применением выбора пар сжимаемых выходов и при выборе случайных выходов для сжатия. Их реализации в Logisim даны на рис. 8 и 9 соответственно.

Счетчик ошибок на рис. 4 реализован аналогично такому же в [31, 47]. Верхний счетчик ошибок работает для СВК, реализованной с использованием предложенного в статье метода, средний — при сжатии произвольных выходов, а нижний — при использовании метода дублирования. Генератор В тактирует и синхронизирует работу этих счетчиков.

В эксперименте вносились одиночные константные неисправности на выходах логических элементов в структуре блока $F(x)$ и подсчитывалось возникающее на его выходах количество ошибок при подаче на его входы полного множества входных комбинаций. Дублирование позволило обнаружить 106 ошибок. Так как дублирование обнаруживает все ошибки, то можно принять это число за общее число ошибок. В СВК с использованием

предложенного метода в данной статье обнаружено 74 ошибки. В СВК, предполагающей случайный выбор пар сжимаемых выходов, — только 55 ошибок, что на 25 % меньше. Таким образом, применение предложенного метода позволяет идентифицировать большее количество ошибок на выходах устройства. Необходимо отметить, что схема сжатия представляет собой наиболее уязвимое звено в СВК (см. рис. 1), где и маскируются ошибки.

Заключение

Предложенный метод организации СВК с применением двух диагностических параметров и предварительным сжатием сигналов позволяет уменьшить структурную избыточность самопроверяемого цифрового устройства по сравнению с известными методами, в том числе по сравнению с описанным ранее методом, не подразумевающим предварительного сжатия сигналов [31, 32].

Особенностью предлагаемого метода является использование схемы сжатия сигналов в СВК, что требует специальных схемотехнических методов или выбора пар сжимаемых выходов для исключения компенсации ошибок на входах элементов сжатия.

Для сжатия может применяться и абсолютно другая схема, позволяющая фактически реализовывать не сжатие информации, а ее кодирование в заранее выбранный избыточный код с высокими показателями обнаружения ошибок. Обнаруживающая способность на выходах схемы сжатия будет определяться характеристиками выбранного для преобразования избыточного кода [18, 19].

Необходимо признать, что вопросы выбора способа реализации схемы сжатия остаются к настоящему моменту изученными не до конца. Существует проблема выбора пар и групп сжимаемых выходов таким образом, чтобы не происходило пропуска возникающих в них ошибок. Схемотехнически подобная задача решается при моделировании работы самого устройства и поиске тех групп выходов, при сжатии которых возможна компенсация ошибки. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение именно особенностей сжатия сигналов и влияния их на конечную структурную

избыточность полностью самопроверяемого цифрового устройства. Также интересным является вопрос исследования диагностических способностей предлагаемого подхода при синтезе СВК в условиях возникновения скрытых неисправностей [48, 49]. Это актуально при рассмотрении систем критического действия, когда входные данные меняются не столь часто и создаются условия накопления неисправностей, и, как следствие, требуется оценка влияния кратных отказов на выходы объекта диагностирования. К таким системам относятся, например, системы управления движением поездов на железнодорожных станциях и перегонах [50].

В заключение отметим, что структура с контролем вычислений по двум диагностическим параметрам может использоваться на практике при синтезе самопроверяемых цифровых устройств на современной программируемой элементной базе с соответствующей адаптацией под нее. Ее применение позволяет учесть индивидуальные особенности объектов диагностирования и синтезировать наименее избыточное самопроверяемое цифровое устройство. ▲

Библиографический список

- Mikoni S. Top Level Diagnostic Models of Complex Objects / S. Mikoni // *Lecture Notes in Networks and Systems*. — 2022. — Vol. 442. — Pp. 238–249. — DOI: 10.1007/978-3-030-98832-6_21.
- Матросова А. Ю. Построение последовательности, обнаруживающей робастно тестируемые неисправности задержек путей в схемах с памятью / А. Ю. Матросова, С. В. Чернышов, О. Х. Ким и др. // *Автоматика и телемеханика*. — 2021. — № 11. — С. 148–168. — DOI: 10.31857/S0005231021110106.
- Слабаков Е. В. Самопроверяемые вычислительные устройства и системы (обзор) / Е. В. Слабаков, Е. С. Согомоян // *Автоматика и телемеханика*. — 1981. — № 11. — С. 147–167.
- Микони С. В. Общие диагностические базы знаний вычислительных систем / С. В. Микони. — СПб.: СПИИРАН, 1992. — 234 с.
- Lala P. K. *Self-Checking and Fault-Tolerant Digital Design* / P. K. Lala. — San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001. — 216 p.
- Fujiwara E. *Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications* / E. Fujiwara. — John Wiley & Sons, 2006. — 720 p.
- 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.
- Пархоменко П. П. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомоян. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 320 с.
- Согомоян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомоян, Е. В. Слабаков. — М.: Радио и связь, 1989. — 208 с.
- 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.
- Nicolaidis M. On-Line Testing for VLSI — A Compendium of Approaches / M. Nicolaidis, Y. Zorian // *Journal of Electronic Testing: Theory and Application*. — 1998. — Vol. 12. — Iss. 1–2. — Pp. 7–20. — DOI: 10.1023/A:1008244815697.
- Мехов В. Б. Контроль комбинационных схем на основе модифицированных кодов с суммированием / В. Б. Мехов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // *Автоматика и телемеханика*. — 2008. — № 8. — С. 153–165.
- Гаврилов С. В. Применение теории кодирования для повышения помехозащищенности комбинационных схем / С. В. Гаврилов, С. И. Гуров, Т. Д. Жукова и др. // *Информационные технологии*. — 2016. — Т. 22. — № 12. — С. 931–937.
- 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.
- Пашуков А. В. Синтез устройств управления объектами напольной автоматизации железнодорожного транспорта на программируемых логических интегральных схемах / А. В. Пашуков // *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)*. — 2021. — № 1. — С. 61–69. — DOI: 10.31114/2078-7707-2021-1-61-69.
- Reynolds D. A. Fault Detection Capabilities of Alternating Logic / D. A. Reynolds, G. Meize // *IEEE Transactions on Computers*. — 1978. — Vol. C-27. — Iss. 12. — Pp. 1093–1098.
- 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.
- Сапожников В. В. Коды Хэмминга в системах функционального контроля логических устройств / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. — СПб.: Наука, 2018. — 151 с.
- Сапожников В. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 1: Классические

- коды Бергера и их модификации / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. — М.: Наука, 2020. — 383 с.
20. Сапожников В. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 2: Взвешенные коды с суммированием / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. — М.: Наука, 2021. — 455 с.
21. Яблонский С. В. Введение в дискретную математику: учеб. пособие для вузов / С. В. Яблонский; под ред. В. А. Садовничева. 4-е изд., стер. — М.: Высшая школа, 2003. — 384 с.
22. Аксенова Г. П. Восстановление в дублированных устройствах методом инвертирования данных / Г. П. Аксенова // Автоматика и телемеханика. — 1987. — № 10. — С. 144–153.
23. Sapozhnikov V. V. Self-Dual Parity Checking — a New Method for on Line Testing / V. V. Sapozhnikov, A. Dmitriev, M. Goessel et al. // Proceedings of 14th IEEE VLSI Test Symposium. — USA, Princeton, 1996. — Pp. 162–168.
24. Гессель М. Обнаружение неисправностей в самопроверяемых комбинационных схемах с использованием свойств самодвойственных функций / М. Гессель, В. И. Мошанин, В. В. Сапожников и др. // Автоматика и телемеханика. — 1997. — № 12. — С. 193–200.
25. Гессель М. Самотестируемая структура для функционального обнаружения отказов в комбинационных схемах / М. Гессель, А. В. Дмитриев, В. В. Сапожников и др. // Автоматика и телемеханика. — 1999. — № 11. — С. 162–174.
26. Гессель М. Построение самопроверяемых комбинационных схем на основе свойств самодвойственных функций / М. Гессель, А. А. Морозов, В. В. Сапожников и др. // Автоматика и телемеханика. — 2000. — № 2. — С. 151–163.
27. Гессель М. Обнаружение неисправностей в комбинационных схемах с помощью самодвойственного контроля / М. Гессель, А. В. Дмитриев, В. В. Сапожников и др. // Автоматика и телемеханика. — 2000. — № 7. — С. 140–149.
28. Гессель М. Исследование свойств самодвойственных самопроверяемых многотактных схем / М. Гессель, А. В. Дмитриев, В. В. Сапожников и др. // Автоматика и телемеханика. — 2001. — № 4. — С. 148–159.
29. Сапожников В. В. Самодвойственные дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, М. Гессель. — СПб: Энергоатомиздат (Санкт-Петербургское отделение), 2001. — 331 с.
30. Сапожников В. В. Синтез самодвойственных дискретных систем / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Р. Ш. Валиев. — СПб: Элмор, 2006. — 220 с.
31. Efanov D. Self-Dual Complement Method up to Constant-Weight Codes for Arrangement of Combinational Logical Circuits Concurrent Error-Detection Systems / D. Efanov, V. Sapozhnikov, V. Sapozhnikov et al. // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDS'2019), Batumi, Georgia, September 13–16, 2019. — Pp. 136–143. — DOI: 10.1109/EWDS.2019.8884398.
32. Ефанов Д. В. Метод функционального контроля комбинационных логических устройств на основе самодвойственного дополнения до равновесных кодов / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников и др. // Электронное моделирование. — 2020. — Т. 42. — № 3. — С. 27–52. — DOI: 10.15407/emodel.42.03.027.
33. Efanov D. V. Organization of Testing of Combinational Devices Based on Boolean Complement to Constant-Weight “1-out-of-4” Code with Signal Compression / D. Efanov, V. Sapozhnikov, V. Sapozhnikov // Automatic Control and Computer Sciences. — 2021. — Vol. 55. — Iss. 2. — Pp. 113–124. — DOI: 10.3103/S014641162102005X.
34. 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.
35. Piestrak S. J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes / S. J. Piestrak. — Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1995. — 111 p.
36. Сапожников В. В. Самопроверяемые дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. — СПб: Энергоатомиздат, 1992. — 224 с.
37. Carter W. C. Self-Checking Error Checker for Two-Rail Coded Data / W. C. Carter, K. A. Duke, P. R. Schneider // United States Patent Office, filed July 25, 1968. — Ser. No. 747533, patented Jan. 26, 1971. N. Y. — 10 p.
38. Ефанов Д. В. Синтез самопроверяемых комбинационных устройств с контролем вычислений по двум диагностическим параметрам / Д. В. Ефанов, Д. В. Пивоваров // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2022. — Т. 65. — № 7. — С. 461–477. — DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-7-461-477.
39. Ефанов Д. В. Организация схем встроенного контроля на основе метода логического дополнения с предварительным преобразованием рабочих функций в контрольные векторы кодов Бергера / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Информационные технологии. — 2021. — Т. 27. — № 6. — С. 306–313. — DOI: 10.17587/it.27.306-313.
40. Ефанов Д. В. Синтез схем встроенного контроля на основе метода логического дополнения с предварительным сжатием сигналов рабочих функций / Д. В. Ефанов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Г. В. Осадчий // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. — 2021. — № 1. — С. 97–115. — DOI: 10.17223/19988605/54/12.
41. Аксенова Г. П. Необходимые и достаточные условия построения полностью проверяемых схем свертки по модулю 2 / Г. П. Аксенова // Автоматика и телемеханика. — 1979. — № 9. — С. 126–135.
42. Efanov D. V. Synthesis of Built-in Self-Test Control Circuits Based on the Method of Boolean Complement to Constant-Weight 1-out-of-n Codes / D. V. Efanov, V. V. Sapozhnikov, V. V. Sapozhnikov et al. // Automatic Control and Computer Sciences. — 2019. — Vol. 53. — Iss. 6. — Pp. 481–491. — DOI: 10.3103/S014641161906004X.
43. Zakrevskij A. Optimization in Boolean Space / A. Zakrevskij, Yu. Pottosin, L. Cheremisinova. — Tallinn: TUT Press, 2009. — 241 p.
44. Sentovich E. M. Sequential Circuit Design Using Synthesis and Optimization / E. M. Sentovich, K. J. Singh, C. Moon et al. // Proceedings IEEE International Conference on Computer Design: VLSI in Computers & Processors, 11–14 October 1992,

- Cambridge, MA, USA. — Pp. 328–333. — DOI: 10.1109/ICCD.1992.276282.
45. Sentovich M. SIS: A System for Sequential Circuit Synthesis / E. M. Sentovich, K. J. Singh, L. Lavagno et al. // Electronics Research Laboratory, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Berkeley, 4 May 1992. — 45 p.
46. Collection of Digital Design Benchmarks. — URL: <http://ddd.fit.cvut.cz/www/prj/Benchmarks/>.
47. Efanov D. V. The Hybrid Structure of a Self-Dual Built-In Control Circuit for Combinational Devices with Pre-Compression of Signals and Checking of Calculations by Two Diagnostic Parameters / D. V. Efanov, D. V. Pivovarov // Proceedings of 19th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2021), Batumi, Georgia, September 10–13, 2021. — Pp. 200–206. — DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581019.
48. Drozd O. Hidden Fault Analysis of FPGA Projects for Critical Applications / O. Drozd, I. Perebeinos, O. Martynyuk et al. // Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 25–29 February 2020. — Lviv-Slavsko, Ukraine. — P. 142. — DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235591.
49. Drozd A. Checkability of the Digital Components in Safety-Critical Systems: Problems and Solutions / A. Drozd, V. Kharchenko, S. Antoshchuk et al. // Proceedings of 9th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2011). — Sevastopol, Ukraine, 2011. — Pp. 411–416. — DOI: 10.1109/EWDTS.2011.6116606.
50. Сапожников Вл. В. Синтез систем управления движением поездов на железнодорожных станциях с исключением опасных отказов / Вл. В. Сапожников. — М.: Наука, 2021. — 229 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2022, Vol. 8, No. 4, pp. 399–417
DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-399-417

Synthesis Method of Self-Checking Devices with Calculation Control by Two Diagnostic Parameters with Preliminary Compression of Signals from the Object of Diagnosis

Information about authors

Efanov D. V., Doctor in Engineering, Assistant Professor, IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) Member, Full-member of International Transport Academy, General Director Deputy on Scientific Research Work¹, Professor^{2,3}.

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

Pivovarov D. V., PhD in Engineering, Lecturer⁴.

E-mail: pivovarov.d.v.spb@gmail.com

Leonenko O. V., PhD in Engineering, Associate Professor, Scientific Chief⁵.

E-mail: olegleonenko@gmail.com

¹«Scientific Research and Design Institute “Transport and Construction Safety”» LLC, St. Petersburg

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

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

⁴Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, “Automation and Remote Control on Railways” Department, St. Petersburg

⁵Belarus-Russia University, Engineering Center “SimTech”, Mogilev

Abstract: The structure of self-checking digital devices with calculation control by two diagnostic parameters has been proposed. The belonging of being formed in in-built control circuit codeword to constant-weight code “2-out-of-4” is used as a first parameter. A second parameter is the belonging of each being calculated function to the class of self-dual Boolean functions. The specificity of being described in the article the organization structure of self-checking digital devices is the presence of the circuit of preliminary compression of signals from diagnosis object. Its usage allows to cut structural redundancy of end device down essentially. Besides, nevertheless, errors can be masked at the inputs of compression elements. The article underlines the features of the choice of being compressed outputs of diagnosis object and the algorithm is proposed allowing to minimize the risk of undetectable error occurrence at compression scheme output. The algorithm of built-in control scheme synthesis by two diagnosis

parameters has been presented which takes into account conditions for the formation of full set of test combinations for testers and elements of transformation in signal correction block. The example of realization of synthesis algorithm for fully self-checking device Logisim is considered. Key features of built-in control scheme are denoted; the scheme is embodied according to the proposed structure. The way of organizing calculation control by two diagnostic parameters is of interest at the synthesis of fully self-checking digital calculation devices and systems.

Keywords: self-checking circuit of in-built control; control of calculations by combinational devices; preliminary compression of signals; code method of control of calculations; function self-duality control.

References

- Mikoni S. Top Level Diagnostic Models of Complex Objects. Lecture Notes in Networks and Systems. 2022, vol. 442, pp. 238–249. DOI: 10.1007/978-3-030-98832-6_21.
- Matrosova A. Ju., Chernyshov S. V., Kim O. H., Nikolaeva E. A. Postroenie posledova-tel'nosti, obnaruzhivajushhej robstno testiruemye neispravnosti zaderzhek putej v shemah s pamjat'ju [Construction of a sequence that detects robustly tested path delay faults in circuits with memory]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics]. 2021, I. 11, pp. 148–168. DOI: 10.31857/S0005231021110106. (In Russian)
- Slabakov E. V., Sogomonjan E. S. Samoproverjaemye vychislitel'nye ustrojstva i sistemy (obzor) [Self-Checking Computing Devices and Systems (Review)]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics]. 1981, I. 11, pp. 147–167. (In Russian)
- Mikoni S. V. *Obshhie diagnosticheskie bazy znaniy vychislitel'nyh sistem* [General diagnostic knowledge bases of computing systems]. St. Petersburg: SPIIRAN Publ., 1992, 234 p. (In Russian)
- Lala P. K. Self-Checking and Fault-Tolerant Digital Design. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001, 216 p.
- Fujiwara E. Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. John Wiley & Sons, 2006, 720 p.
- Drozd A. V., Harchenko V. S., Antoshuk S. G., Drozd Ju. V., Drozd M. A., Sulima Ju. Ju. *Rabochee diagnostirovanie bezopasnyh informacionno-upravljajushhih sistem* [Working diagnostics of safe information and control systems]. Har'kov: Nacional'nyj ajerokosmicheskij uni-versitet im. N.E. Zhukovskogo «HAL» Publ., 2012, 614 p. (In Russian)
- Parhomenko P. P., Sogomonjan E. S. *Osnovy tehnicheckoj diagnostiki (optimizacija algoritmov diagnostirovanija, apparaturnye sredstva)* [Fundamentals of technical diagnostics (optimization of diagnostic algorithms, hardware)]. Moscow: Jenergoatomizdat Publ., 1981, 320 p. (In Russian)

9. Sogomonjan E. S., Slabakov E. V. *Samoproverjaemye ustrojstva i otkazoustojchivye si-stemy* [Self-checking devices and fault-tolerant systems]. Moscow: Radio i svjaz' Publ., 1989, 208 p. (In Russian)
10. Gessel' M., Morozov A. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V. Kontrol' kombinacionnyh shem metodom logicheskogo dopolnenija [Control of combinational circuits by the method of logical addition]. *Avtomatika i telemehanika* [Automation and Telemechanics]. 2005, I. 8, pp. 161–172. (In Russian)
11. Nicolaidis M., Zorian Y. On-Line Testing for VLSI – A Compendium of Approaches. *Journal of Electronic Testing: Theory and Application*. 1998, vol. 12, I. 1-2, pp. 7–20. DOI: 10.1023/A:1008244815697.
12. Mehov V. B., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V. Kontrol' kombinacionnyh shem na osnove modificirovannyh kodov s summirovanem [Control of combinational circuits based on modified codes with summation]. *Avtomatika i telemehanika* [Automation and Telemechanics]. 2008, I. 8, pp. 153–165. (In Russian)
13. Gavrilov S. V., Gurov S. I., Zhukova T. D., Ryzhova D. I. Primenenie teorii kodirovaniya dlja povysheniya pomehozashchishennosti kombinacionnyh shem [Application of coding theory to improve the noise immunity of combinational circuits]. *Informacionnye tehnologii* [Information technologies]. 2016, vol. 22, I. 12, pp. 931–937. (In Russian)
14. Tshagharyan G., Harutyunyan G., Shoukourian S., Zorian Y. Experimental Study on Hamming and Hsiao Codes in the Context of Embedded Applications. *Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDT'S'2017)*, Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017, pp. 25–28. DOI: 10.1109/EWDT'S.2017.8110065.
15. Pashukov A. V. Sintez ustrojstv upravleniya ob'ektami napol'noj avtomatizacii zheleznodorozhnogo transporta na programmiruemyh logicheskikh integral'nyh shemah [Synthesis of control devices for objects of floor automation of railway transport on programmable logic integrated circuits]. *Problemy razrabotki perspektivnyh mikro- i nanoelektronnyh sistem (MJeS)* [Problems of development of promising micro- and nanoelectronic systems (MES)]. 2021, I. 1, pp. 61–69. DOI: 10.31114/2078-7707-2021-1-61-69. (In Russian)
16. Reynolds D. A., Meize G. Fault Detection Capabilities of Alternating Logic. *IEEE Transactions on Computers*. 1978, vol. C-27, I. 12, pp. 1093–1098.
17. Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. *New Methods of Concurrent Checking: Edition 1*. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., 2008, 184 p.
18. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V., Efanov D. V. *Kody Hjemminga v sistemah funkcional'nogo kontrolja logicheskikh ustrojstv* [Hamming codes in systems of functional control of logical devices]. St. Petersburg: Nauka Publ., 2018, 151 p. (In Russian)
19. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V., Efanov D. V. Kody s summirovanem dlja sistem tehničeskogo diagnostirovaniya [Summation codes for technical diagnostic systems]. *Klassicheskie kody Bergera i ih modifikacii* [Classic Berger codes and their modifications]. Moscow: Nauka Publ., 2020, 383 p. (In Russian)
20. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V., Efanov D. V. Kody s summirovanem dlja sistem tehničeskogo diagnostirovaniya [Summation codes for technical diagnostic systems]. *Vzveshennye kody s summirovanem* [Weighted Summation Codes]. Moscow: Nauka Publ., 2021, 455 p. (In Russian)
21. Jablonskij S. V. *Vvedenie v diskretnuju matematiku* [Introduction to Discrete Mathematics]. Moscow: «Vysshaja shkola» Publ., 2003, 384 p. (In Russian)
22. Aksjonova G. P. Vosstanovlenie v dublirovannyh ustrojstvah metodom invertirovaniya dannyh [Restoration in duplicated devices by the method of data inversion]. *Avtomatika i telemehanika* [Automation and Telemechanics]. 1987, I. 10, pp. 144–153. (In Russian)
23. Sapozhnikov VI. V., Dmitriev A., Goessel M., Sapozhnikov V. V. Self-Dual Parity Checking – a New Method for on Line Testing. *Proceedings of 14th IEEE VLSI Test Symposium, USA, Princeton*. 1996, pp. 162–168.
24. Gessel' M., Moshanin V. I., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V. Obnaruzhenie neispravnostej v samoproverjaemyh kombinacionnyh shemah s ispol'zovanem svojstv samodvojtvennyh funkcij [Fault detection in self-checking combinational circuits using the properties of self-dual functions]. *Avtomatika i telemehanika* [Automation and Telemechanics]. 1997, I. 12, pp. 193–200. (In Russian)
25. Gessel' M., Dmitriev A. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V. Samotestiruemaja struktura dlja funkcional'nogo obnaruzhenija otkazov v kombinacionnyh shemah [Self-testing structure for functional failure detection in combinational circuits]. *Avtomatika i telemehanika* [Automation and Telemechanics]. 1999, I. 11, pp. 162–174. (In Russian)
26. Gessel' M., Morozov A. A., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V. Postroenie samoproverjaemyh kombinacionnyh shem na osnove svojstv samodvojtvennyh funkcij [Construction of self-checking combinational circuits based on the properties of self-dual functions]. *Avtomatika i telemehanika* [Automation and Telemechanics]. 2000, I. 2, pp. 151–163. (In Russian)
27. Gessel' M., Dmitriev A. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V. Obnaruzhenie neispravnostej v kombinacionnyh shemah s pomoshh'ju samodvojtvennogo kontrolja [Detection of faults in combinational circuits using self-dual control]. *Avtomatika i telemehanika* [Automation and Telemechanics]. 2000, I. 7, pp. 140–149. (In Russian)
28. Gessel' M., Dmitriev A. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V. Issledovanie svojstv samodvojtvennyh samoproverjaemyh mnogotaktnyh shem [Investigation of the properties of self-dual self-checking multi-cycle circuits]. *Avtomatika i telemehanika* [Automation and Telemechanics]. 2001, I. 4, pp. 148–159. (In Russian)
29. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V., Gessel' M. *Samodvojtvennye diskretnye ustrojstva* [Self-Dual Discrete Devices]. St. Petersburg Jenergoatomizdat (Sankt-Peterburgskoe otdelenie) Publ., 2001, 331 p. (In Russian)
30. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V., Valiev R. Sh. *Sintez samodvojtvennyh diskretnyh sistem* [Synthesis of self-dual discrete systems]. St. Petersburg Jelmor Publ., 2006, 220 p. (In Russian)
31. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov VI., Osadchy G., Pivovarov D. Self-Dual Complement Method up to Constant-Weight Codes for Arrangement of Combinational Logical Circuits Concurrent Error-Detection Systems. *Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDT'S'2019)*, Batumi, Georgia, September 13-16, 2019, pp. 136–143. DOI: 10.1109/EWDT'S.2019.8884398.
32. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V., Pivovarov D. V. Metod funkcional'nogo kontrolja kombinacionnyh logicheskikh ustrojstv na osnove samodvojtvennogo dopolnenija do ravnovesnyh kodov [The method of functional control of combinational logic devices based on self-dual addition to equilibrium codes]. *Jelektronnoe modelirovanie* [Electronic modeling]. 2020, vol. 42, I. 3, pp. 27–52. DOI: 10.15407/emodel.42.03.027. (In Russian)
33. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V. Organization of Testing of Combinational Devices Based on Boolean Complement to Constant-Weight “1-out-of-4” Code with Signal Compression. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2021, vol. 55, I. 2, pp. 113–124. DOI: 10.3103/S014641162102005X.
34. Gessel' M., Morozov A. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov VI. V. Logicheskoe dopolnenie – novyj metod kontrolja kombinacionnyh shem [Logical complement - a new method of control of combinational circuits]. *Avtomatika i telemehanika* [Automation and Telemechanics]. 2003, I. 1, pp. 167–176. (In Russian)
35. Piestrak S. J. Design of Self-Testing Checkers for Unidirectional Error Detecting Codes. *Wroclaw: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej*, 1995, 111 p.
36. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. *Samoproverjaemye diskretnye ustrojstva* [Self-checking discrete devices]. St. Petersburg: Jenergoatomizdat Publ., 1992, 224 p.
37. Carter W. C., Duke K. A., Schneider P. R. Self-Checking Error Checker for Two-Rail Coded Data. *United States Patent Office*, filed July 25, 1968, ser. No. 747533, patented Jan. 26, 1971, N. Y., 10 p.
38. Efanov D. V., Pivovarov D. V. Sintez samoproverjaemyh kombinacionnyh ustrojstv s kontrol'em vychislenij po dvum diagnosticheskim parametram [Synthesis of self-checking combinational devices with control of calculations by two diagnostic parameters]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie* [Izvestia of higher educational institutions. Instrumentation]. 2022, Vol. 65, I. 7, pp. 461–477. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-7-461-477. (In Russian)

39. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. Organizacija shem vstroennogo kontrolja na osnove metoda logicheskogo dopolnenija s predvaritel'nyh preobrazovanijem rabochih funkcij v kontrol'nye vektory kodov Bergera [Organization of built-in control schemes based on the logical complement method with preliminary transformation of working functions into control vectors of Berger codes]. *Informacionnye tehnologii* [Information technologies]. 2021, Vol. 27, I. 6, pp. 306–313. DOI: 10.17587/it.27.306-313. (In Russian)
40. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Osadchij G. V. Sintez shem vstroennogo kontrolja na osnove metoda logicheskogo dopolnenija s predvaritel'nyh szhachem signalov rabochih funkcij [Synthesis of built-in control circuits based on the logical complement method with preliminary compression of the signals of operating functions]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika* [Bulletin of the Tomsk State University. Management, computer technology and informatics]. 2021, I. 1, pp. 97–115. DOI: 10.17223/19988605/54/12. (In Russian)
41. Aksjonova G. P. Neobhodimye i dostatochnye uslovija postroenija polnost'ju proverjaemyh shem svertki po modulu 2 [Necessary and sufficient conditions for constructing fully verifiable convolution schemes modulo 2]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Telemechanics]. 1979, I. 9, pp. 126–135. (In Russian)
42. Efanov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Pivovarov D. V. Synthesis of Built-in Self-Test Control Circuits Based on the Method of Boolean Complement to Constant-Weight 1-out-of-n Codes. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2019, vol. 53, I. 6, pp. 481–491. DOI: 10.3103/S014641161906004X.
43. Zakrevskij A., Pottosin Yu., Cheremisinova L. Optimization in Boolean Space. Tallinn: TUT Press, 2009, 241 p.
44. Sentovich E. M., Singh K. J., Moon C., Savoj H., Brayton R. K., Sangiovanni-Vincentelli A. Sequential Circuit Design Using Synthesis and Optimization. Proceedings IEEE International Conference on Computer Design: VLSI in Computers & Processors, 11–14 October 1992, Cambridge, MA, USA, pp. 328–333. DOI: 10.1109/ICCD.1992.276282.
45. Sentovich E. M., Singh K. J., Lavagno L., Moon C., Murgai R., Saldanha A., Savoj H., Stephan P. R., Brayton R. K., Sangiovanni-Vincentelli A. SIS: A System for Sequential Circuit Synthesis. Electronics Research Laboratory, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Berkeley, 4 May 1992, 45 p.
46. Collection of Digital Design Benchmarks Available at: <http://ddd.fit.cvut.cz/www/prj/Benchmarks/>.
47. Efanov D. V., Pivovarov D. V. The Hybrid Structure of a Self-Dual Built-In Control Circuit for Combinational Devices with Pre-Compression of Signals and Checking of Calculations by Two Diagnostic Parameters. Proceedings of 19th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2021), Batumi, Georgia, September 10–13, 2021, pp. 200–206. DOI: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581019.
48. Drozd O., Perebeinos I., Martynyuk O., Zashcholkin K., Ivanova O., Drozd M. Hidden Fault Analysis of FPGA Projects for Critical Applications. Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 25–29 February 2020, Lviv-Slavsko, Ukraine, paper 142. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235591.
49. Drozd A., Kharchenko V., Antoshchuk S., Sulima J., Drozd M. Checkability of the Digital Components in Safety-Critical Systems: Problems and Solutions. Proceedings of 9th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2011), Sevastopol, Ukraine, 2011, pp. 411–416. DOI: 10.1109/EWDTS.2011.6116606.
50. Sapozhnikov V. V. Sintez sistem upravlenija dvizheniem poezdov na zheleznodorozhnyh stancijah s iskljucheniem opasnyh otkazov [Synthesis of train traffic control at railway stations]. Moscow: Nauka Publ., 2021, 229 p. (In Russian)

ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ПУТЕЙ В НЕЧЕТКИХ ГРАФАХ

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

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

Большое разнообразие проблем в различных областях, в том числе проблем построения различного рода оптимальных решений, может быть сформулировано на языке теории графов в виде задач поиска на заданных графах специального вида оптимальных путей. Ныне получено много результатов в этих направлениях, относящихся к классической теории графов. В этой теории граф предполагается детерминированным объектом и в его описании и описании процесса его функционирования не содержится никаких неопределенностей (нечеткостей). Ныне наука подошла к осознанию того, что большинство наших знаний и связей с внешним миром не соответствуют сложившимся ранее классическим представлениям о них. Сейчас разрабатываются новые подходы к этим направлениям, которые предполагают принципиальную невозможность обойтись без «нечеткостей», которые принимаются как реальность человеческого существования. Это требует разработки комплекса понятий и методов, в которых эта «нечеткость» должна быть реально учтена в практических приложениях. В предлагаемой статье рассматриваются задачи поиска оптимальных по некоторым критериям путей в рамках принятой ныне модели нечеткого графа. При решении задачи о кратчайших путях введено и мотивировано правило выбора «лучшей» дуги. Предложен метод решения задачи с использованием конструкции ориентированного дерева путей графа. Введено понятие реализуемости пути в нечетком графе, которая оценивается как вероятность его реального существования в заданном графе. Предложен метод вычисления реализуемости пути, основанный на сведениях степени принадлежности каждой дуги в пути графа к его вероятности. На этой основе решается задача о поиске пути с максимальной реализуемостью.

Ключевые слова: теория графов; нечеткие графы; поиск кратчайших путей; реализуемость пути в нечетком графе; поиск пути с максимальной реализуемостью.

DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-418-426

▼ Введение

Теория графов является разделом математики, имеющим многочисленные практические приложения. Такие приложения связаны с решением различных оптимизационных задач. Многие проблемы из разнообразных областей, в том числе построения оптимальных решений при проектировании всевозможных сетей и технических систем в автоматике, их диагностике, трассировки путей на платах и ряд других, могут быть сформулированы, в частности, как задачи поиска различного типа оптимальных путей в теории графов. Ныне имеется обширная литература, посвященная перечисленным проблемам. Сказанное относится к классической теории графов, в которой граф как объект исследования является

детерминированным и в своем описании не содержит никаких неопределенностей. Такие графы принято называть четкими. Все полученные ранее многочисленные результаты в классической теории графов относятся в основном к этой модели. Они в большей своей части, так же как основные понятия теории графов, представлены в целом ряде монографий, например в [1–4], ставших ныне классическими. Поэтому далее в тексте не даются ссылки на них, предполагая знакомство читателя с этими источниками.

К сожалению, модель четкого графа не применима во многих реальных ситуациях, когда точного описания объекта исследования и его функционирования получить принципиально невозможно. В этом случае требуются новые

средства, позволяющие адекватно отражать возможность появления неопределенностей, возникающих как в процессе описания объектов, так и их функционирования. В 1965 г. Л. Заде опубликовал статью [5], в которой были предложены такие средства. В ней было введено понятие нечеткого множества, ставшего истоком и основой создания ныне признанной и широко используемой в приложениях теории нечетких множеств.

Как пишет Л. Заде в предисловии к монографии А. Кофмана «Введение в теорию нечетких множеств» [6], «мы подошли к осознанию того, что большинство человеческих знаний и связей с внешним миром включают такие построения, которые нельзя назвать множествами в классическом смысле. Они представляют собой классы с нечеткими границами, когда переход от принадлежности к классу к непринадлежности происходит постепенно, не резко». Л. Заде полагает, что ставится под сомнение тот факт, что логика человеческого рассуждения основывается не на классической двузначной или даже многозначной логике, а на логике с нечеткими значениями истинности. В поисках точности делались попытки, не всегда успешные, подогнать реальный мир под модели, которые не оставляют места нечеткости. Как указывает Л. Заде, «...нужна новая точка зрения, новый комплекс понятий и методов, в которых нечеткость принимается как реальность человеческого существования».

Вскоре после публикации статьи Л. Заде [5] начались активные исследования и разработка новых методов, учитывающих феномен «нечеткости». Ныне число публикаций по этой тематике уже превышает десять тысяч. Только за последние 10 лет число таких публикаций составляет несколько сотен. Даже в сравнительно узких направлениях по проблемам «нечеткости» говорить о достаточно полных обзорах публикаций не приходится. В предлагаемой нами статье по ее тематике подробный обзор лежит за ее рамками. Поэтому мы ограничимся только упоминанием некоторых активно развивающихся направлений, таких как нечеткая логика, нечеткий логический вывод, приложения к нечетким нейронным сетям, не входящих в сферу научных интересов

автора предлагаемой статьи, и только очень кратко скажем о других, более близких нам направлениях.

К числу активно исследуемых ныне направлений относятся нечеткие конечные автоматы. В монографии [7] прослежена его эволюция и приведена библиография работ по различным разновидностям автоматов и их приложениям. Так, в [8] подробно описана некоторая модель такого автомата и приведены результаты исследований по теории экспериментов с ними, имеющие важные приложения при диагностике цифровых систем. В [9] исследована проблема тестирования нечетких линейных автоматов, в [10] разработана теория поведения автомата в нечеткой среде и приведены ее приложения. Этот перечень может быть существенно расширен.

Еще одно активно развивающееся направление связано с разработкой чисто математических аспектов теории «нечетких» объектов, включая, в частности, вопросы раскраски нечетких графов, нахождения хроматических чисел объединения таких графов, моделирования задержек при проектировании дискретных устройств, вопросы матричного проектирования систем стабилизации и т.п. Некоторые из перечисленных вопросов отражены в публикациях [11–16].

Предлагаемая статья по тематике относится к исследованию оптимизационных задач для нечетких графов, и этот объект последнее десятилетие изучается очень активно. Отметим, что ныне даже издается специальный международный научный журнал — *Journal of intelligent and fuzzy graphs*. В качестве объектов исследования в нем рассматриваются нечеткие графы различных типов, например темпоральных, интуиционистских и др. Для этих графов рассмотрен широкий спектр проблем, в том числе живучести [17], определения доминирующего множества интуиционистского нечеткого графа [18], моделирования гетерогенных систем с использованием нечетких графов [19], оценки информационной надежности сложных систем с использованием нечетких графов [20], поиска нечеткого множества баз темпоральных нечетких графов, определения нечетких инвариантов нечетких графов и гиперграфов [21] и др.

В классической теории графов были разработаны многие важные для приложений алгоритмы решения целого ряда оптимизационных задач. Понятно, что такие алгоритмы представляют несомненный интерес и для нечетких моделей объектов, включая нечеткие графы, нечеткие автоматы, нечеткие сети и т. п.

В предлагаемой статье рассматриваются задачи поиска оптимальных по некоторым критериям путей в нечетких графах. Отметим, что известные ныне соответствующие алгоритмы для четких графов не могут быть непосредственно использованы для нечетких графов. Это объясняется необходимостью учета особенностей новой нечеткой модели, существенно отличающейся от прежней четкой. Такая необходимость может потребовать модификации некоторых понятий из классической теории графов. Вместе с тем в качестве основы для решения оптимизационных задач для нечетких графов в ряде случаев вполне может быть использована идея алгоритма для четких графов, но, возможно, подвергшаяся соответствующей адаптации.

1. Основные понятия и определения

Вначале напомним некоторые понятия и определения, используемые в нашей статье, связанные с нечеткими графами. Все они далее понимаются так, как это изложено в монографии А. Кофмана [6].

Начнем с понятия нечеткого множества. Пусть множество A есть подмножество множества E , т. е. $A \subset E$. Принадлежность элемента x множеству A будет записываться с помощью характеристической функции $m_A(x)$, которая может принимать любое неотрицательное значение, в том числе в интервале $[0,1]$.

Математический объект:

$$A = \{(x_1 | m(x_1), (x_2 | m(x_2), \dots, (x_n | m(x_n))\},$$

где $m(x_i)$ — значение характеристической функции, определяющей степень принадлежности элемента x_i подмножеству A .

Эта структура позволяет оперировать с неполно определенными элементами, принадлежность которых лишь в некоторой степени упорядочена.

Приведем определение нечеткого подмножества, введенное Л. Заде. Пусть E — множество, x — элемент E . Тогда нечеткое подмножество A множества E есть множество упорядоченных пар:

$$\{(x, m_A(x))\}_{x \in E},$$

где $m_A(x)$ — характеристическая функция принадлежности, принимающая значение в упорядоченном множестве M , указывающее степень принадлежности x подмножеству A .

Напомним теперь определение нечеткого графа [6]. Пусть E_1, E_2 — два множества и пусть элемент $x \in E_1$, а $y \in E_2$. Множество упорядоченных пар (x, y) определяет прямое произведение $E_1 E_2$. Нечеткое подмножество G такое, что:

$$\forall (x, y) \in E_1 E_2 \quad m_G(x, y) \in M,$$

где M — множество принадлежностей множества $E_1 E_2$ называется нечетким графом.

Встречающиеся далее в тексте понятия и термины, относящиеся к нечетким графам, понимаются в основном точно так же, как они трактуются в теории четких графов [1–4]. Понятия петли в графе, инцидентности вершин и дуг, соседство вершин, цепи, связности и т. п. для нечетких и четких графов просто совпадают. Условимся, что выше названные и многие другие совпадающие понятия трактуются так же, как в [1–4].

Если же используемые понятия для нечетких и четких графов отличаются, это будет оговариваться особо. Так, понятие пути для нечеткого и четкого графа совпадают. Длина пути в четком графе определяется как сумма длин дуг, составляющих этот путь. В нечетком графе длина пути определяется так же, однако выбор дуг, входящих в путь в нечетком графе, определяется иначе, чем в четком графе.

На плоскости оба типа графов изображаются в виде множества вершин и множества соединяющих их дуг. В четком графе для каждой дуги (x, y) указывается ее длина $a(x, y)$. Так же будет обозначаться и длина дуги (x, y) в нечетком графе. Если дуга (x, y) в нечетком графе отсутствует, положим $a(x, y) = \infty$. Этой же дуге поставим в соответствие еще одно число

$db(x, y)$, равное степени принадлежности этой дуги множеству дуг заданного нечеткого графа. Это число может быть любым неотрицательным числом [6]. Если дуга (x, y) в нечетком графе отсутствует, то положим $db(x, y) = 0$.

2. Типы оптимальных путей в нечетком графе

Чтобы пояснить предлагаемое ниже правило выбора дуги, входящей в кратчайший путь в нечетком графе, предварительно выскажем содержательные соображения и мотивацию для соответствующей корректировки правила в сравнении со случаем четкого графа.

В теории нечетких множеств ненулевая степень принадлежности дуги некоторому пути нечеткого графа допускает ее трактовку только как такой возможности. При этом возможность тем выше, чем больше значение степени принадлежности. Однако степень принадлежности является чисто формальной констатацией, и вхождение дуги в упомянутый путь необязательно имеет место в действительности. Это сопоставимо с аналогичной ситуацией в теории вероятностей, когда некоторое событие хотя и имеет ненулевую вероятность, но это совсем не означает, что оно обязательно произойдет.

Пути нечеткого графа, состоящие только из дуг с ненулевыми степенями принадлежности, будем называть виртуальными (возможными). При проходе в нечетком графе по виртуальному пути, связывающему две его выделенные вершины s и t , каждая дуга пути реально может отсутствовать в нем, хотя имеет ненулевую степень принадлежности. В этом случае такой путь не обеспечивает возможности реализуемого прохода из s в t . Таким образом, этот путь существует лишь формально, но не является реально реализуемым.

Понятно, что для получения в качестве решения задачи поиска оптимального в некотором смысле пути в нечетком графе требуется располагать в нечетком графе максимально возможным числом путей, связывающих вершины s и t , в которых все участвующие в них дуги имеют максимальную возможность реально присутствовать в них. Естественно, что для получения такого множества путей необходимо, чтобы на каждом шаге выбор

очередной «лучшей» дуги для построения искомого пути эта дуга имела максимальное значение степени принадлежности в множестве альтернативных дуг. Очевидно, что возможность получения реализуемого пути прохода в нечетком графе из вершины s в вершину t тем выше, чем больше значения степеней принадлежности дуг, входящих в этот путь.

Если в множестве альтернативных дуг только одна дуга (x, y) имеет максимальное значение степени принадлежности дуги (x, y) , то длиной этой дуги полагаем число $a(x, y)$. Если в множестве альтернативных дуг одно и то же максимальное значение степени ее принадлежности имеют несколько кандидатов, то в качестве «лучшей» дуги для включения в оптимальный путь естественно выбирать дугу с минимальным значением $a(x, y)$, и это значение полагается равным длине этой дуги.

Таким образом, правило выбора «лучшей» дуги из множества альтернатив состоит в том, что сначала этот выбор осуществляется по критерию максимальности значения степени принадлежности. В случае наличия нескольких альтернативных кандидатов возникает необходимость выполнения еще одного этапа выбора, осуществляемого по критерию минимальности значения величины $a(x, y)$.

Представляется, что это правило является истинным, поскольку позволяет получить максимально возможное по мощности множество реализуемых путей в нечетком графе, связывающих вершину s с вершиной t .

Поскольку каждой дуге (x, y) в нечетком графе соответствуют два параметра $a(x, y)$ и $db(x, y)$, то для каждого реализуемого пути в нечетком графе также будут использоваться два параметра. Один — это длина пути, равная сумме длин входящих в него дуг, другой — вероятность реализуемости пути.

Поясним, как можно преобразовать степени принадлежности дуг в нечетком графе в вероятности и на этой основе вычислить вероятность реализуемости пути. Легко видеть, что функция принадлежности нечеткого множества напоминает плотность распределения вероятностей. Они отличаются только тем, что сумма вероятностей по всем возможным значениям случайной величины всегда равна 1,

а сумма S значений функции принадлежности всех дуг в нечетком графе может быть любым неотрицательным числом.

В связи с этим возникает возможность сведения функции принадлежности дуги графа к функции распределения вероятностей (или к функции плотности вероятностей). Такое сведение можно реализовать нормированием функции принадлежности, разделив все ее значения на S (при $S \neq 0$). Этот способ использовался ранее в ряде публикаций.

В случае четкого графа оценка каждого пути в задачах о кратчайших путях производилась только по одному критерию (длине пути). В случае нечеткого графа каждому пути ставится в соответствие два показателя (длина пути и вероятность его реализуемости). Это означает, что для нечеткого графа оценка пути может производиться в принципе только по его длине, и тогда соответствующая задача превращается в задачу о кратчайшем пути. Оценивать пути можно также только по критерию его реализуемости (вероятности). Таким образом, в случае нечеткого графа можно рассматривать оптимизационные задачи по двум перечисленным критериям. Понятно, что выбор критериев должен производиться исходя из потребностей конечного потребителя соответствующих результатов.

3. Методы поиска оптимальных путей в нечетких графах

Известно, что для решения задачи о кратчайшем пути для четкого графа есть несколько алгоритмов [22]. В частности, алгоритм, предложенный Дейкстрой, считается одним из самых эффективных. Далее будет показано, как идею алгоритма Дейкстры можно адаптировать к решению рассматриваемых задач поиска оптимальных путей для нечеткого графа. Для этого в нем выбор «лучшей» дуги из множества альтернативных в процессе выполнения алгоритма должен осуществляться по правилу, сформулированному в предыдущем разделе статьи.

Кратко опишем идею алгоритма Дейкстры для четкого графа [22]. Пусть требуется найти кратчайший путь в нечетком графе из вершины s в вершину t . Предположим, что нам уже известно m вершин, ближайших к вершине s ,

и также известны сами кратчайшие пути из s в выделенные m вершин. Близость вершин x и y означает, что вершина x непосредственно связана с вершиной y дугой. Определим $(m + 1)$ -ю ближайшую к s вершину. С этой целью окрасим s и m ближайших к ней вершин, непосредственно соединяющие дугами (x, y) каждую окрашенную вершину x с y . Выберем из этих путей кратчайший и далее будем считать его условно кратчайшим путем из s в y . Очевидно, что ближайшей к s $(m + 1)$ -й вершиной будет та, для которой условно кратчайший путь будет иметь наименьшую длину. Это следует из того, что путь из s в $(m + 1)$ -ю ближайшую вершину при положительных значениях длин всех дуг в качестве промежуточных должен содержать лишь окрашенные вершины. Таким образом, начиная с $m = 0$, приведенная процедура должна повторяться до тех пор, пока в качестве очередной $(m + 1)$ -й ближайшей вершиной к s не окажется вершина t , т. е. будет получен путь из s в t .

Из описания алгоритма Дейкстры следует, что процесс поиска кратчайшего пути между вершинами s и t сводится к наращиванию ориентированного дерева с корнем в вершине s . Когда при наращивании дерева достигается вершина t , то процесс завершается. Перейдем теперь к описанию метода решения задач построения оптимальных по разным критериям оценки путей в нечетком графе.

Вначале рассмотрим задачу построения кратчайшего пути из вершины s заданного нечеткого графа в вершину t . Начнем с построения ориентированного дерева с корнем в вершине s . Это дерево есть структура, состоящая из ветвей, расположенных в последовательных уровнях. Высшим уровнем является нулевой, следующим является первый уровень и так далее. В нулевой уровень помещается одна вершина s . Она порождает вершины 1-го уровня. Количество порождаемых вершин равно числу вершин, ближайших к вершине s . Каждая такая вершина помечается именем, используемым для обозначения ее в заданном изображении нечеткого графа, и из вершины s в нее проводится дуга. Каждая такая дуга помечается упорядоченной парой чисел, первое из которых есть длина дуги, а второе — степень принадлежности этой дуги множеству дуг нечеткого

графа (эти данные берутся из задания нечеткого графа).

Каждая вершина 1-го уровня порождает вершины 2-го уровня точно так же, как это описано для вершин первого уровня. Процесс построения ветвей в дереве решений продолжается до появления в очередном уровне дерева вершины t . Понятно, что в общем случае пути, ведущие в дереве от вершины s к вершине t , могут содержать разное количество дуг, составляющих их.

Отметим, что каждая вершина в упомянутом дереве порождает вершины следующего уровня по правилу выбора «лучшей» дуги, сформулированному в предыдущем разделе статьи.

Завершив построение ориентированного дерева, становятся известными все возможные пути из вершины s в вершину t в нечетком графе. Подсчитав сумму длин всех дуг (первых компонент в упорядоченных парах чисел, относящихся к дуге) пути, получаем длину каждого пути в построенном дереве. Выбрав из них путь минимальной длины, получаем решение задачи о кратчайшем пути в нечетком графе.

Перейдем теперь к рассмотрению задачи о поиске пути в нечетком графе, имеющем максимальное значение реализуемости. Это значение будет оцениваться по соответствующей вероятности. Опишем, как вычислить эту вероятность.

Начнем с того, что заданные в нечетком графе числа, указывающие степени принадлежности дуг, сведем к вероятностям. Такое сведение можно осуществить, как было сказано выше, нормированием функции принадлежности, разделив все ее значения на S (при $S \neq 0$).

Реализуемость пути из вершины s в вершину t в нечетком графе означает, что каждая дуга этого пути в момент прохождения пути в нем присутствует. Будем рассматривать наличие дуги в пути как событие. Тогда реализуемость пути представляет собой появление последовательности событий, состоящих в появлении в определенном порядке дуг этого пути. Таким образом, путь можно интерпретировать как произведение упомянутых событий. Понятно, что события, состоящие в появлении определенной совокупности дуг, составляющих путь, являются независимыми в совокупности [23].

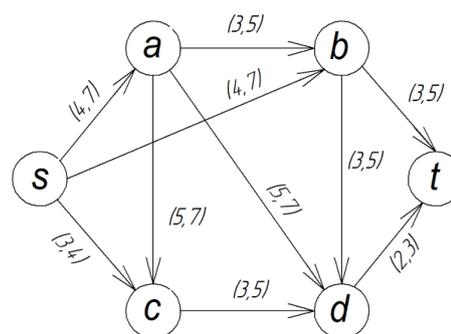


Рис. 1. Пример нечеткого графа

Это свойство независимости событий в совокупности очевидным образом вытекает из смысла задачи.

Из теоремы умножения в теории вероятностей [23] в качестве следствия вытекает следующее утверждение: вероятность совместного появления нескольких событий, независимых в совокупности, равна произведению вероятностей этих событий. На основании этого следствия вероятность реализуемости некоторого пути в нечетком графе равна произведению вероятностей дуг, входящих в этот путь.

Таким образом, по построенному ориентированному дереву числовые значения степени принадлежности дуг преобразуются в вероятности, а их произведение дает вероятность реализуемости пути. Располагая этими данными для всех путей в дереве, путь, имеющий максимальное значение вероятности, дает решение рассматриваемой задачи.

Проиллюстрируем изложенное выше на простом примере. Рассмотрим нечеткий граф, представленный на рис. 1. Напомним, что каждой дуге этого графа соответствует упорядоченная пара чисел. Первое слева число в этой паре является длиной дуги, а второе — степенью принадлежности дуги множеству дуг заданного графа.

Вначале рассмотрим задачу поиска кратчайшего пути из вершины s в вершину t . По заданному нечеткому графу построим ориентированное дерево с корнем в вершине s , которую помещаем в нулевой уровень. В заданном графе находим ближайшие к s вершины и помещаем их в 1-й уровень. В нашем примере имеется три таких вершины a, b, c , в которые проводятся дуги $(s, a), (s, b), (s, c)$. В соответствии с введенным нами правилом выделяем дуги $(s, a), (s, b)$,

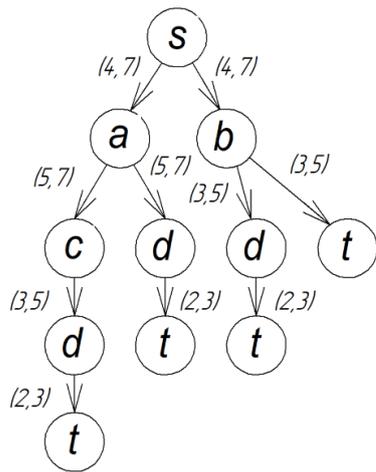


Рис. 2. Ориентированное дерево для примера нечеткого графа

которые имеют максимальные степени принадлежности, равные 7. Дуга (s, c) в это множество не входит. Поскольку длины обеих этих дуг равны, эти вершины a, b помещаем в первый уровень. Следовательно, в дереве появилось разветвление. Построим теперь второй уровень дерева. Вершины c, d являются ближайшими к вершине a с равными 7 степенями принадлежности и равными длинами дуг (a, c) и (a, d) . Поэтому обе эти вершины c, d помещаются во второй уровень дерева. Следовательно, в дереве появилось еще одно разветвление. Из вершин c и d выходит по одной дуге, т. е. они в качестве ближайших имеют вершины d и t . Эти обе вершины помещаются в третий уровень дерева. Понятно, что из вершины d третьего уровня проводится единственная дуга в вершину t , помещаемую в четвертый уровень дерева. Поскольку достигнута вершина t , то искомый путь из вершины s построен.

Аналогичным образом строятся ветви дерева из всех точек разветвления, возникающих в описанном процессе. В конечном итоге будет построено ориентированное дерево, содержащее все возможные варианты искомого пути. Для рассматриваемого нами примера это дерево представлено на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что в построенном дереве имеется 4 различных пути из вершины s в вершину t :

- $s \xrightarrow{(4,7)} a \xrightarrow{(5,7)} c \xrightarrow{(3,5)} d \xrightarrow{(2,3)} t$; длина пути 14;
- $s \xrightarrow{(4,7)} a \xrightarrow{(5,7)} d \xrightarrow{(2,3)} t$; длина пути 11;
- $s \xrightarrow{(4,7)} b \xrightarrow{(3,5)} d \xrightarrow{(2,3)} t$; длина пути 9;
- $s \xrightarrow{(4,7)} b \xrightarrow{(3,5)} t$; длина пути 7.

Таблица 1. Вероятности появления дуг в путях нечеткого графа (см. рис. 1)

№ п/п	Дуга	Степень принадлежности	Вероятность
1	(s, a)	7	$7/55 = 0,127272$
2	(s, b)	7	$7/55 = 0,127272$
3	(s, c)	4	$4/55 = 0,072727$
4	(a, c)	7	$7/55 = 0,127272$
5	(c, d)	5	$5/55 = 0,090909$
6	(d, t)	3	$3/55 = 0,054545$
7	(a, d)	7	$7/55 = 0,127272$
8	(b, d)	5	$5/55 = 0,090909$
9	(b, t)	5	$5/55 = 0,090909$
10	(a, b)	5	$5/55 = 0,090909$

Из этих данных получаем, что кратчайшим путем из s в t является четвертый путь, имеющий длину 7.

Рассмотрим теперь задачу поиска пути с максимальным значением реализуемости в этом же нечетком графе. Для заданного нечеткого графа подсчитаем сумму степеней принадлежности всех его дуг. В нашем примере нечеткий граф имеет 10 дуг с общей суммой $S = 55$. Далее упомянутые степени принадлежности дуг, входящие в построенное ранее дерево, сведем к соответствующим вероятностям. Напомним, что это будет выполнено нормированием функции принадлежности делением значений степеней принадлежности дуг на сумму S . Результаты сведения представлены в табл. 1.

Вычислим теперь вероятность реализации каждого из четырех путей, приведенных выше. Напомним, что вероятность реализации каждого пути, как это было указано выше, равна произведению вероятностей входящих в него дуг.

Первый путь в построенном дереве (см. рис. 2) содержит дуги (s, a) , (a, c) , (c, d) , (d, t) , вероятности которых приведены в табл. 1. Произведение вероятностей этих дуг, т. е. вероятность реализации этого пути, равна 0,0000803207. Аналогичные расчеты для второго пути (s, a) , (a, d) , (d, t) дают значение реализуемости, равное 0,0008835287, для третьего пути (s, a) , (b, d) , (d, t) значение реализуемости равно 0,00006310949, для четвертого пути (s, b) , (d, t) значение реализуемости равно 0,0115701702. Из приведенных данных следует, что наибольшее значение реализуемости имеет четвертый путь.

Заключение

В статье рассматриваются задачи поиска некоторых оптимальных путей в нечетком графе. Одна из них — поиск кратчайших путей, связывающих две выделенные вершины в нечетком графе. Предложен метод решения этой задачи, основанный на построении ориентированного дерева. В отличие от аналогичной задачи для четкого графа, правило выбора дуг, включаемых в кратчайший путь, существенно отличается от соответствующего правила для четкого графа. В случае нечеткого графа при выборе «лучшей» дуги учитывается прежде всего значение степени принадлежности. Только при равенстве этого значения для нескольких альтернативных кандидатов в качестве «лучшей» из них выбирается дуга с минимальным значением ее длины. Таким образом, становится возможным случай, когда в кратчайший путь попадает дуга не с минимальной длиной (но с меньшей степенью принадлежности). Смысл корректировки правила выбора дуги состоит в том, что в нечетком графе имеются пути, существующие только формально из-за «реального» их отсутствия при проходе по пути. Однако среди множества всех виртуальных путей в нечетком графе, связывающих две вершины, с точки зрения здравого смысла поиск кратчайших путей естественно производить из тех путей, которые имеют наибольшие шансы быть реализуемыми.

В статье введено понятие реализуемости пути в нечетком графе, которая оценивается как вероятность его «реального» существования в заданном графе. Предложен метод вычисления реализуемости пути, основанный на сведении степени принадлежности каждой дуги в пути графа к его вероятности. На этой основе решается задача о поиске пути с максимальной реализуемостью. ▲

Библиографический список

- Берж К. Теория графов и ее применения / К. Берж. — М.: Иностранная литература, 1962. — 320 с.
- Оре О. Теория графов / О. Оре. — М.: Наука, 1980. — 336 с.
- Харари Ф. Теория графов / Ф. Харари. — М.: Мир, 1973. — 301 с.
- Зыков А. А. Основы теории графов / А. А. Зыков. — М.: Вузовская книга, 2004. — 664 с.
- Zadeh L. A. Fuzzy sets / L. A. Zadeh // *Inf. Contro.* — 1965. — № 8. — Pp. 338–353.
- Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств / А. Кофман. — М.: Радио и связь, 1982. — 432 с.
- Dubots D. Fuzzy sets and systems: theory and applications / D. Dubots, H. Prade. — New York: Academy Press, 1980. — 393 p.
- Speranskiy D. V. Experiments with fuzzy state machine / D. V. Speranskiy. // *Automation and Remote Control.* — 2015. — Vol.76:2. — Pp. 278–291.
- Сперанский Д. В. Тестирование нечетких линейных автоматов / Д. В. Сперанский // *Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Математика. Механика. Информатика.* — 2019. — Т. 19:2. — С. 233–240.
- Стефанюк В. П. Поведение конечного автомата в нечеткой среде: теория и приложения / В. П. Стефанюк // *Искусственный интеллект и принятие решений.* — 2014. — № 3. — С. 54–71.
- Rosyida L. On construction of fuzzy chromatic number of cartesian product of paths and other fuzzy graphs / L. Rosyida, Widodo, D. Indriati et al. // *Journal of Intelligent and Fuzzy Graphs.* — 2020. — Vol. 39. — № 1. — Pp. 1073–1080.
- Rosyida L. Fuzzy chromatic number of union of fuzzy graphs. An algorithm. Properties and its application / L. Rosyida, Widodo, D. Indriati et al. // *Journal of Intelligent and Fuzzy Graphs // Fuzzy Sets and Systems.* — 2020. — Vol. 38. — Pp. 115–131.
- Samanta S. Fuzzy colouring of fuzzy graphs / S. Samanta, T. Paramanic, V. Pal // *Africa Matematica.* — 2016. — Vol. 27. — № 1–2. — Pp. 37–50.
- Maharatra R. Application of coloring of fuzzy graphs / R. Maharatra, M. Pal, S. Samanta // *Informatica.* — 2020. — Vol. 31. — № 2. — Pp. 313–330.
- Al-Humaidi H. M. A fuzzy logic approach to model delays in construction projects using rotational fuzzy fault tree models / H. M. Al-Humaidi, F. H. Hudripriono Tan // *Civil Engineering and Environmental Systems.* — 2019. — Vol. 27. — № 4. — 2019. — Pp. 329–351.
- Sambariya D. K. A novel fuzzy rule matrix design for fuzzy logic based power system stabilizer / D. K. Sambariya, R. Prasad // *Power Components and Systems.* — 2017. — Vol. 45. — № 1. — Pp. 34–48.
- Хорохорин М. А. Применение распределенных информационных систем для оценки живучести нечетких графов / М. А. Хорохорин, А. А. Долгов, М. Ауад и др. // *Информация и безопасность.* — 2012. — Т. 15. — № 2. — С. 245–248.
- Боженюк А. В. Определение доминирующего множества интуиционистского нечеткого графа / А. В. Боженюк, С. А. Беляков, О. В. Косенко и др. // *Инженерный вестник Дона.* — 2019. — № 3(54). — С. 11–13.
- Петрунина У. В. Нечеткие графы в функционально-логическом моделировании гетерогенных систем / У. В. Петрунина // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* — 2012. — № 7. — С. 78–79.
- Боженюк А. В. Оценка информационной надежности сложных систем с помощью нечетких графов / А. В. Боженюк, С. А. Беляков, О. В. Косенко // *Наука и технология железных дорог.* — 2012. — Т. 3. — № 4. — С. 65–74.
- Берштейн Л. С. Нечеткие инварианты нечетких графов и гиперграфов / Л. С. Берштейн, А. В. Боженюк // *Нечеткие графы и мягкие вычисления.* — 2011. — Т. 6. — № 1. — С. 43–54.
- Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графа / Э. Майника // М.: Мир, 1981. — 324 с.
- Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман // М.: Высшая школа, 2003. — 479 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2022, Vol. 8, No. 4, pp. 418–426
DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-418-426

About Search of Optimal Paths in Fuzzy Graphs

Information about authors

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

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

Abstract: A large variety of problems in different fields, including the problems of the creation of optimal solutions of different kinds, can be formulated in graph theory language in the form of search tasks at given graphs of optimal paths of special character. Many results in these courses are now obtained which refer to classical graph theory. In this theory, a graph is assumed to be a deterministic object and there are no any uncertainties (fuzzinesses) in its description and in the description of its functioning process. Nowadays, science has come to the realization that the majority of our knowledge and links with the external world do not correspond to formerly established classical notions about them. New approaches to these areas are now being developed, which imply principal impossibility to do without fuzzinesses that are accepted as a reality of human existence. This requires the development of complex of concepts and methods which in, this fuzziness should be taken into account really in practical applications. In the proposed article, the tasks of searching optimal paths according to some criteria in the frames of currently accepted fuzzy graph model are considered. When solving the problem of the shortest paths, the rule of choosing the “best” arc is introduced and motivated. The method of solving the tasks with the use of the design of oriented graph path tree is proposed. The notion of path feasibility in fuzzy graph is introduced, the feasibility is evaluated as the probability of path real existence in given graph. The method for calculation of path feasibility, based on the reduction of belonging degree of each arc in the path of graph path to its probability, is proposed. The task on the search of path with maximum feasibility is solved on this basis.

Keywords: graph theory; fuzzy graphs; shortest path search; path feasibility in fuzzy graph; search of path with maximal feasibility.

References

- Berzh K. *Teoriya grafov i ee primeneniya* [Theory of graphs and its applications]. Moscow: Inostrannaya literature Publ., 1962. 320 p. (In Russian)
- Ore O. *Teoriya grafov* [Graph Theory]. Moscow: Nauka Publ., 1980. 336 p. (In Russian)
- Kharari F. *Teoriya grafov* [Graph Theory]. Moscow: Mir Publ., 1973. 301 p. (In Russian)
- Zykov A. A. *Osnovy teorii grafov* [Fundamentals of graph theory]. Moscow: Vuzovskaya kniga Publ., 2004. 664 p. (In Russian)
- Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Inf. Contro.* 1965, I. 8, pp. 338–353.
- Kofman A. *Vvedenie v teoriyu nechetkikh mnozhestv* [Introduction to the theory of fuzzy sets]. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1982. 432 p. (In Russian)
- Dubots D., Prade H. *Fuzzy sets and systems: theory and applications*. NY.1980: Academy Press, pp. 393.
- Speranskiy D. V. Experiments with fuzzy state machine. *Automation and Remote Control*, 2015, vol. 76:2, pp. 278–291.
- Speranskiy D. V. Testirovanie nechetkikh lineynykh avtomatov [Testing of fuzzy linear automata]. *Izv. Sarat. un-ta. Nov. ser. Matematika. Mekhanika. Informatika* [Izv. Sarat. university New ser. Maths. Mechanics. Informatics]. 2019, vol. 19:2, pp. 233–240. (In Russian)
- Stefanyuk V. P. Povedenie konechnogo avtomata v nechetkoy srede: teoriya i prilozheniya [Behavior of a Finite Automaton in a Fuzzy Environment: Theory and Applications]. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial intelligence and decision making]. 2014, I. 3, pp. 54–71. (In Russian)
- Rosyida L., Widodo, Indrati C. R., Indrati D. On construction of fuzzy chromatic number of cartesian product of paths and other fuzzy graphs. *Journal of Intelligent and Fuzzy Graphs*, vol. 39, I. 1, 2020, pp. 1073–1080.
- Rosyida L., Widodo, Indrati C.R., Indrati D., Nurhaida N. Fuzzy chromatic number of union of fuzzy graphs. An algorithm. Properties and its application. *Journal of Intelligent and Fuzzy Graphs. Fuzzy Sets and Systems*, vol. 38, 2020, p. 115–131.
- Samanta S., Paramanic T., Pal V. Fuzzy colouring of fuzzy graphs. *Africa Mathematica*. 2016, vol. 27, I. 1–2, pp. 37–50.
- Maharatra R., Pal M., Samanta S. Application of coloring of fuzzy graphs. *Informatica*. 2020, vol. 31, I. 2, pp. 313–330.
- Al-Humaidi H. M., Hudripriano Tan F. H. A fuzzy logic approach to model delays in construction projects using rotational fuzzy fault tree models. *Civil Engineering and Environmental Systems*. 2019, vol. 27, I. 4, pp. 329–351.
- Sambariya D. K., Prasad R. A novel fuzzy rule matrix design for fuzzy logic based power system stabilizer. *Power Components and Systems*. 2017, vol. 45, I. 1, pp. 34–48.
- Khorokhorin M. A. Primenenie raspredelennykh informatsionnykh sistem dlya otsenki zhivuchesti nechetkikh grafov [Application of distributed information systems to assess the survivability of fuzzy graphs]. *Informatsiya i bezopasnost'* [Information and security]. 2012, vol. 15, I. 2, pp. 245–248. (In Russian)
- Bozhenyuk A. V. Opredelenie dominiruyushchego mnozhestva intuitsionistskogo nechetkogo grafa [Definition of the dominating set of an intuitionistic fuzzy graph]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2019, I. 3 (54), pp. 11–13. (In Russian)
- Petrulina U. V. Nechetkie grafy v funktsional'no-logicheskom modelirovanii geterogennykh sistem [Fuzzy graphs in functional-logical modeling of heterogeneous systems]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research]. 2012, I. 7, pp. 78–79. (In Russian)
- Bozhenyuk A. V. Otsenka informatsionnoy nadezhnosti slozhnykh sistem s pomoshch'yu nechetkikh grafov [Assessment of the information reliability of complex systems using fuzzy graphs]. *Nauka i tekhnologiya zheleznnykh dorog* [Science and technology of railways]. 2012, vol. 3, I. 4, pp. 65–74. (In Russian)
- Bershteyn L. S. Nechetkie invarianty nechetkikh grafov i gipergrafov [Fuzzy invariants of fuzzy graphs and hypergraphs]. *Nechetkie grafy i myagkie vychisleniya* [Fuzzy graphs and soft calculations]. 2011, vol. 6, I. 1, pp. 43–54. (In Russian)
- Maynika E. *Algoritmy optimizatsii na setyakh i grafa* [Optimization algorithms for networks and graphs]. Moscow: Mir Publ., 1981. 324 p. (In Russian)
- Gmurman V. E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2003. 479 p. (In Russian)

УДК 656.256.3

ПРАВО- И ЛЕВОСТОРОННЕЕ ДВИЖЕНИЕ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ МИРА: ИСТОРИЯ И БУДУЩЕЕ

ВЛАСЕНКО Сергей Валентинович, канд. техн. наук, доцент, доцент¹; e-mail: vlasenko@fh-erfurt.de
ОРУНБЕКОВ Максат Багыбаевич, старший преподаватель²; e-mail: m.orunbekov@alt.edu.ru

¹Омский государственный университет путей сообщения, кафедра «Автоматика и телемеханика», Омск

²Академия логистики и транспорта, кафедра «Автоматизация и управление», Алматы

Начав с исторической справки о выборе направления движения и о том, как железнодорожный транспорт стал причиной преобладания правостороннего движения на остальных видах транспорта, авторы подробно остановились на примерах направления движения на автомобильном и частично на воздушном и морском транспорте, а затем перешли к прогнозированию будущего в определении направлений следования на рельсовом транспорте, техническим ограничениям систем с напольными светофорами и подошли к анализу бессигнальных систем управления движением с фиксированными, а затем и подвижными блок-участками. Приведены основные отечественные и зарубежные примеры проектирования и эксплуатации таких систем на железных дорогах и метрополитенах мира, а также их преимущества и недостатки с точки зрения пропускной способности и безопасности движения. В заключительной части статьи проведено сравнение отечественных и зарубежных систем интервального регулирования движения поездов. Установлена принципиальная схожесть российской бессигнальной системы автоблокировки АЛСО с общеевропейской системой ETCS L2, сохранившей фиксированные длины блок-участков, но исключившей использование проходных светофоров. Кроме того, указаны общие принципы системы с квазиподвижными блок-участками АБТЦ-М, используемой на российских железных дорогах, с системой с подвижными блок-участками ETCS L3, исключившей из использования как светофоры, так и устройства контроля свободности участков пути. Далее в работе приведен пример использования на железных дорогах и в метрополитенах систем с подвижными блок-участками, работающими на разнице тормозных путей, следующих в попутном направлении поездов.

Ключевые слова: односторонние и двусторонние системы автоблокировки; право- и левостороннее движение транспорта; сигнализация; автоблокировка с фиксированными блок-участками; автоблокировка с подвижными блок-участками; сравнение пропускной способности; безопасность движения; автоматическая локомотивная сигнализация АЛСО; автоматическая блокировка АБТЦ-М; система управления движением поездов ETCS.

DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-427-440

▼ Введение

Путешествуя по железным дорогам разных стран, всегда можно заметить сигналы, размещенные где с левой стороны от путей, а где с правой. Такое расположение сигналов определяется направлением движения — в одних странах предпочтительным является правостороннее движение, а в других — левостороннее. И если на некоторых видах транспорта (например, автомобильном) уже определилось направление движения, являющееся преимущественным по числу использующих его стран мира, то на железных дорогах до универсального решения еще очень далеко. Разобраться, по каким причинам сложилась такая ситуация на железных дорогах мира и что нас ждет в будущем, поможет предлагаемая ниже статья.

1. Направление движения до зарождения рельсового транспорта

У большинства людей правая рука является более развитой, чем левая. Они научились писать правой рукой, держать в ней оружие, а также использовать ее для приветствия. Именно это и определило направление движения при зарождении человечества. Если человек видел во встречном неприятеля, он должен был держать в правой руке меч и быть готовым применить его. Если встречный был другом, то можно было подать ему правую руку и тем самым продемонстрировать, что она безоружна и намерений нападать нет. Таким образом, правило следования по левой стороне дороги сложилось еще очень давно. В качестве доказательства левостороннего движения во

времена Римской Империи можно приводить, например, следующие факты:

- отпечатанные монеты (динары) с изображением едущих навстречу всадников [1];
- сохранившиеся мозаичные изображения с сюжетами встречающихся на дороге людей [2];
- левая по направлению движения из каменистых колея на всем протяжении оказывалась более глубокой, чем правая.

Несколько позже, когда повозки и кареты вошли в обиход, ряд стран стал выпускать законы о направлении движения, которые, однако, не всегда определяли «правило левой стороны». Например, Парижский декрет 1789 года, изданный на фоне событий Великой французской революции и отрицания прежних порядков, направлял движение по «простонародной» правой стороне.

Немногом позднее и Наполеон Бонапарт, будучи от рождения левшой, предписал военным держаться правой стороны, чтобы другие люди, встретив французскую армию, уступали дорогу. Еще через некоторое время на выбор схемы движения стала оказывать влияние политическая ситуация, и страны-союзники Наполеона приняли правостороннее движение, а противники сохранили левостороннее и оказались в большинстве.

Как бы то ни было, к моменту зарождения рельсового транспорта единых правил следования по дороге не существовало. Но так как первые локомотивы были построены на родине железных дорог в Англии, а эта страна еще по биллю 1756 года определила левостороннее движение сперва по мостам Лондона, а спустя 20 лет издала «Дорожный акт» [3], регламентирующий движение по левой стороне на всех английских дорогах (рис. 1), то и первые железные дороги в этой стране должны были предусматривать левостороннее движение по двухпутным участкам.

2. О том, как появились помощники машинистов и как вошло в обиход французское слово «chauffeur»

До сих пор еще много крушений происходит из-за ошибочного восприятия машинистом разрешающего сигнала с соседнего пути за свой. Чаще всего причинами этого являются

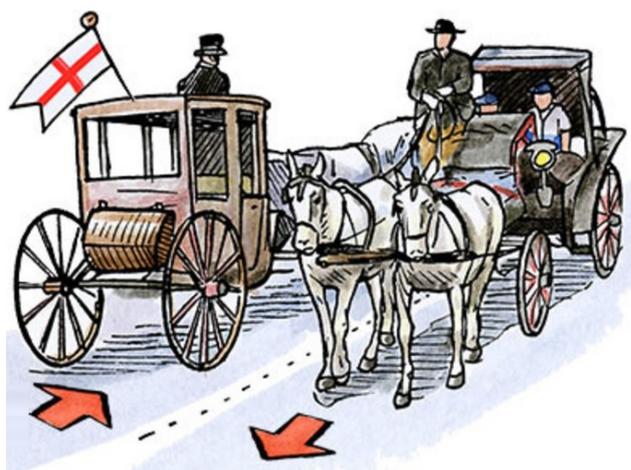


Рис. 1. Движение по левой стороне дороги

кривые на станциях, а также когда сигналы — в виде исключения — располагаются с противоположной стороны от принятой. На РЖД такие ситуации редки, поскольку лишь входные светофоры при движении по неправильному пути расположены, в виде исключения, с левой стороны. Причинами таких исключений является нежелательность (а где и из-за требований габаритов невозможность) размещения светофоров между путями перегона. Именно по причине, как правило, узкого перегонного междупутья при левостороннем движении все сигналы размещать с левой стороны, а при правостороннем — с правой. И здесь родину первых локомотивов Стефенсона ожидали неприятные последствия принятого к тому времени в Англии левостороннего движения [4].

Дело в том, что растапливающие котел паровоза кочегары, как и остальные люди, были в большинстве своем правши. А так как котлы паровозов расположены по центру кабины машиниста, то кочегар должен был занимать левое место в кабине, чтобы, стоя спиной к боковому окну, иметь возможность ведущей правой рукой управлять лопатой и отправлять уголь из расположенной позади кабины емкости в котел (рис. 2). Это и определило место машиниста с правой стороны кабины, сохраняемое до настоящего времени на большинстве железных дорог мира. С учетом того, что котлы первых паровозов были достаточно длинными и велики по высоте, последние полсотни метров



Рис. 2. Работа кочегара и машиниста

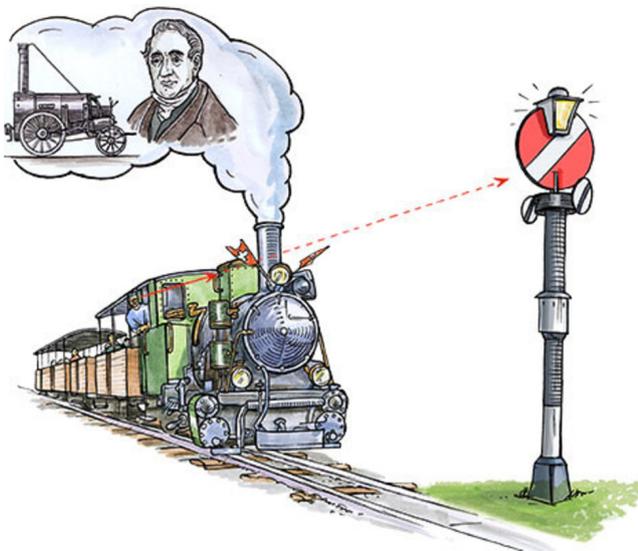


Рис. 3. Проблема видимости сигналов при левостороннем движении

перед сигналом, расположенный с правой стороны кабины машинист не мог непрерывно наблюдать его показание (рис. 3). И тогда консервативные и не готовые к кардинальным переменам англичане не нашли ничего лучшего, как обязать расположенного с левой стороны кабины кочегара по команде машиниста при приближении к сигналу оставлять работу и внимательно смотреть на расположенный с его стороны светофор. Кочегар докладывал машинисту «вижу зеленый» вплоть до его

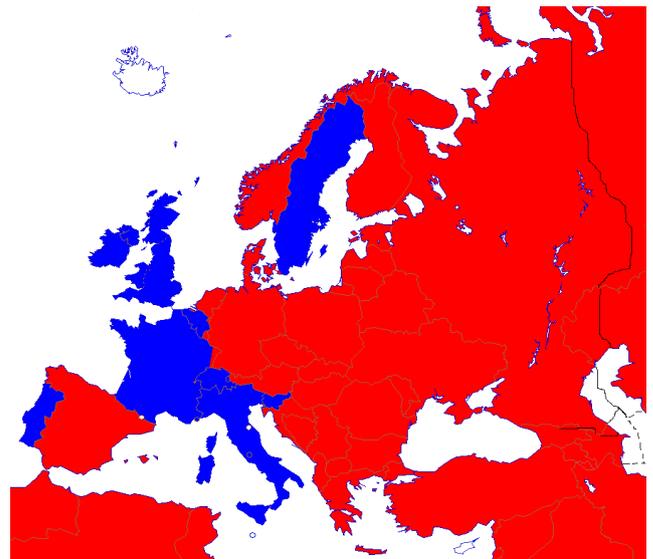


Рис. 4. Право- (красный цвет) и левостороннее (синий цвет) движение на железных дорогах Европы



Рис. 5. Регулярное расположение сигналов с левой стороны по направлению движения во Франции

проезда и затем возвращался к своей основной работе. Когда появились дизельные тепловозы и необходимость в конструкции котлов перед кабиной отпала, машинист стал беспрепятственно видеть расположенные слева сигналы, а кочегары английских железных дорог переквалифицировались в проводники.

Франция как ближайший сосед Англии переняла установившийся на железных дорогах (включая левостороннее направление движения) порядок, а профессию кочегара назвала

«*chauf feur*» (дословно: «создающий огонь»). Впоследствии название профессии «шофер» станет международным, однако уже без привязки к теме железных дорог. При переходе от паровозов к тепловозам было принято решение сохранить устоявшиеся порядки, оставив кочегара в помощь машинисту. Теперь он следил за поступлением горючего и другими техническими вопросами обеспечения движения, а остальное время смотрел на расположенные с левой стороны сигналы и сообщал их показания машинисту, который проверял их, подтверждал и вел поезд. Так зародилась профессия помощника машиниста, которая использовалась на железных дорогах Франции [5] еще долгое время до появления безопасных систем автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) [6], а также появился регламент переговоров в кабине машиниста. Неслучайно поэтому во многих языках под словом «шофер» подразумевается сидящий слева персональный водитель, обеспечивающий доставку сидящего справа руководителя. В русском языке также сохраняется разница между понятиями «шофер» и «водитель», но при этом под словом «шофер» (как вид профессии) понимается не только персональный водитель, но и водитель грузовика или автобуса, однако не водитель личного автомобиля.

А во Франции, Англии и ближайших к ним странах на железных дорогах так и осталось до сих пор левостороннее движение (рис. 4) [7]. Соответственно этому, сигналы — за редкими исключениями — располагаются с левой стороны по направлению движения (рис. 5).

3. О том, как преимущество на автомобильных дорогах перешло к правостороннему движению и какая роль в этом была у железных дорог и промышленности Германии

Немецкие железные дороги столкнулись с той же самой проблемой, что и английские, но решили ее иначе. Посчитав, что производительность труда важнее принятых ранее правил, они отказались от левостороннего направления движения и повсеместно ввели правостороннее, позволяющее размещать железнодорожные сигналы с правой стороны по движению поезда.

Таким образом, кочегар был занят только своей работой, а при переходе с угольного (паровозы) на дизельное (тепловозы) топливо или электрическую тягу место слева от машиниста освободилось, и он занял кресло посередине кабины. Кочегар никогда не занимался несвойственной ему работой, а за ведение поезда всегда отвечал только машинист. По этой причине такая профессия, как «помощник машиниста», в Германии неизвестна.

Когда в начале 30-х годов минувшего столетия в Германии, по примеру железных дорог [8], стали строиться ставшие образцами для всего мира автобаны [9] со съездами вправо и производиться автомобили с расположением водителя в соответствии с правосторонним направлением движения, подавляющее большинство стран (также тех, кто утвердил левостороннее движение на железных дорогах) отказались от выработанного столетиями опыта и переняли немецкую правостороннюю практику. Такая судьба была уготована, например, Португалии в 1928 году. Последней же в континентальной Европе страной, перешедшей с лево- на правостороннее движение на автодорогах, стала Швеция, имевшая, в силу своего географического положения, весьма ограниченные связи с соседними странами. Это произошло в ночь со 2 на 3 сентября 1967 года, когда владельцы транспортных средств должны были переставить свои машины с левой стороны дороги на правую [10]. Но даже и тут без хаоса не обошлось (рис. 6). Несмотря на эти изменения, железнодорожное сообщение в Португалии и Швеции осталось левосторонним.



Рис. 6. Переход на правостороннее движение на автодорогах Швеции в 1967 г.

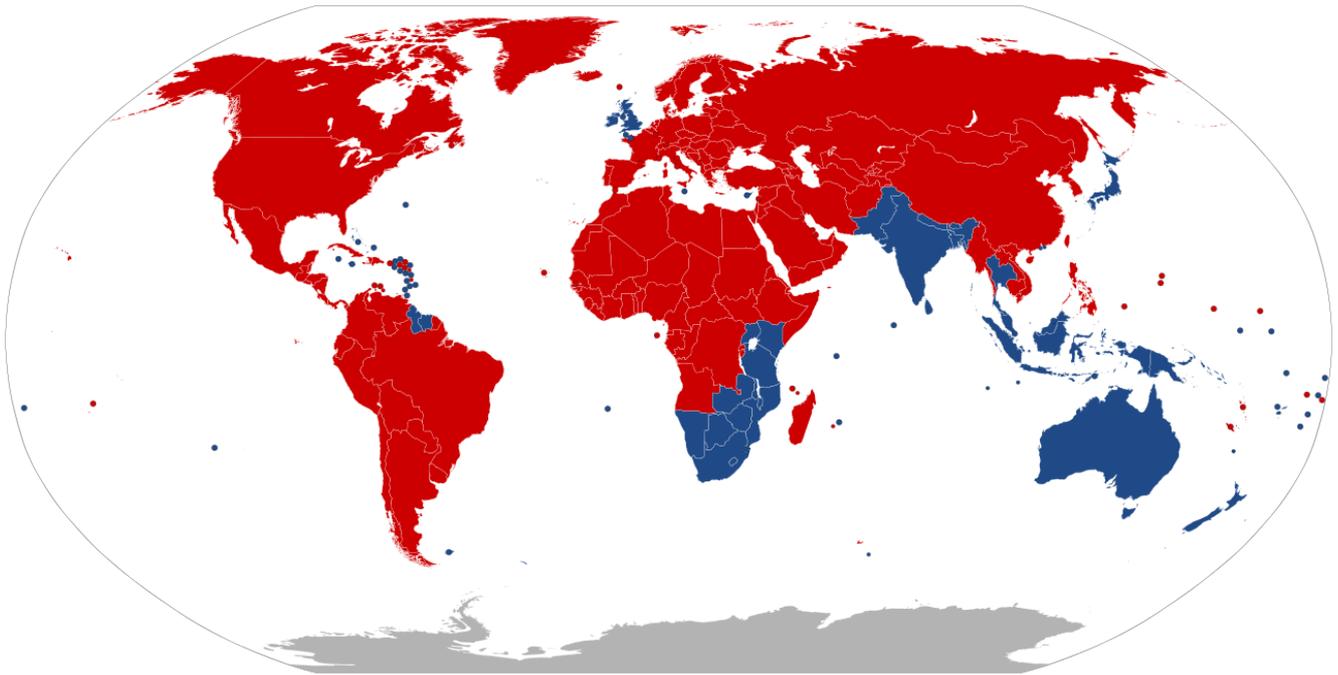


Рис. 7. Право- (красный цвет) и левостороннее (синий цвет) движение на автодорогах мира

Сейчас осталось уже небольшое число стран, практикующих левостороннее движение на автодорогах. Это, как правило, бывшие английские колонии, а также расположенные на островах государства или другие страны с ограниченным автомобильным сообщением (рис. 7).

Статистика безопасности движения на дорогах показывает, что в странах с левосторонним движением вероятность аварий несколько ниже, чем в странах с правосторонним движением [11]. Причиной этого, по мнению врачей, является правый глаз, являющийся ведущим у большинства людей. Именно он при встречном движении с правой стороны лучше всего может оценить опасность и варианты исключения аварий. Чуть хуже статистика в странах с правосторонним движением при стандартном (левом) расположении руля и самая наихудшая при правостороннем движении с правым расположением руля [12]. Именно поэтому ряд стран с правосторонним движением запрещает правое расположение руля или допускает его только для машин, следующих транзитом либо имеющих регистрацию в других государствах. И хотя уже нет ни котлов, ни паровозов, ни кочегаров, определившееся во многом из-за них на автодорогах большинства стран мира правостороннее движение является

свершившимся фактом и вряд ли когда-либо поменяется.

Воздушный транспорт, появившийся после автомобильного, по его примеру определил место капитана корабля с левой стороны (как в автомобилях при правостороннем движении), а его помощника — справа. Однако на большинстве железных дорог осталась старая традиция, когда машинист занимает позицию в кабине справа, а его помощник слева — там, где на первых паровозах было место для кочегара.

Подобная история с изменением направления движения была и на морском транспорте. В старые времена в английском судоходстве было принято расходиться с другим кораблем правым бортом, предполагая под этим требованием левостороннее движение. Однако теперь на водном транспорте повсеместно (за исключением внутреннего речного судоходства) установлено правостороннее движение.

4. Потеря значимости стороны движения по железным дорогам и что нас ждет в будущем

С повышением требований к пропускной способности каждый из путей двухпутного перегона, ранее проектировавшийся для преимущественного движения в одном направлении,

становится универсальным. В новых схемах движение по неправильному пути становится возможным не только при капитальном ремонте путей, но и в регулярной эксплуатации. Новые инструкции по сигнализации стали предусматривать на входном светофоре с неправильного пути те же показания и соответственно этому такие же скорости, как и при следовании по правильному пути. На многих участках появились предвходные сигналы по неправильному пути, устанавливаемые на общей мачте с первым проходным светофором по отправлению (рис. 8).

И хотя отсутствие блок-сигналов по неправильному пути в ряде стран еще является причиной следования с меньшей допустимой скоростью, чем по правильному (например, на сети РЖД следование по коду Ж по неправильному пути все еще ограничено максимальной скоростью 50 км/ч, а по коду КЖ даже 20 км/ч, в то время как по правильному пути разрешена более высокая скорость¹), пропуск поездов по каждому из путей в обоих направлениях используется все чаще и дает ощутимый эффект (рис. 9).



Рис. 8. Совмещенные блок-сигналы на двухпутном перегоне Жилина — Врутки в Словакии

¹ Приложение 1 к Инструкции по движению поездов и маневровой работе. Раздел I «Общие положения», пункт 5. — 2012.

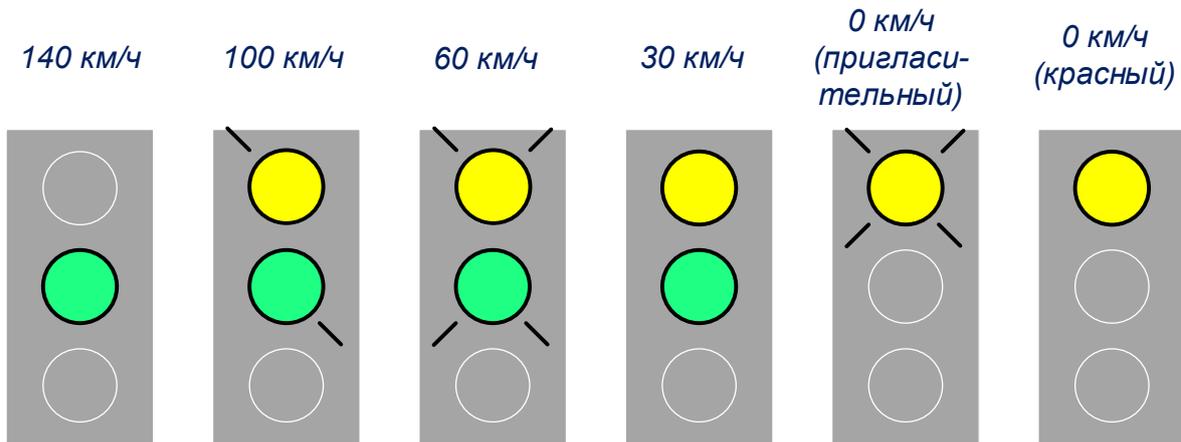


Рис. 9. Демонстрация проезда двух параллельно следующих поездов при открытии участка Эрфурт — Галле / Лейпциг высокоскоростной магистрали Берлин — Мюнхен в 2015 г.

Рост скоростей в железнодорожном сообщении требует, с одной стороны, увеличения значности показаний напольных светофоров, а с другой — усложняет их восприятие машинистом, особенно при увеличении числа ламп на светофоре. Таким образом на интенсивных пригородных участках Санкт-Петербурга и Москвы появилась четырехзначная автоблокировка с новым показанием — одновременно горящими желтым и зеленым огнями, а в системы сигнализации других стран для передачи машинисту дополнительной информации при сохранении минимума сигнальных ламп на светофоре пришли такие решения, как:

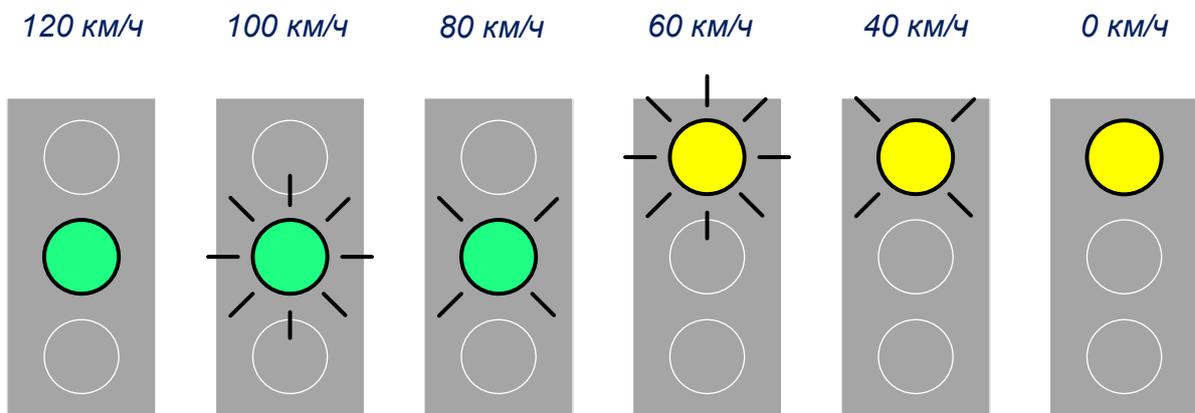
- использование двух одновременно или попеременно мигающих огней (Италия, рис. 10);
- использование разных режимов мигания — медленный и быстрый (Венгрия, Польша, Чехия и Словакия, рис. 11);
- добавление желтых или зеленых полос под основным показанием для разрешения проследования отклонения по стрелочному переводу с повышенной скоростью (все страны Восточной Европы, использующие принципы сигнализации ОСЖД² [13], рис. 12).

²ОСЖД: Организация сотрудничества железных дорог основана в 1956 г. для гармонизации технических решений и сотрудничества железных дорог социалистических стран.



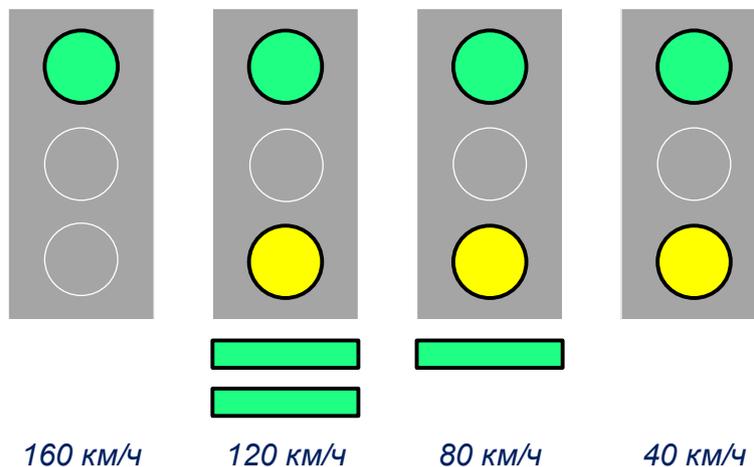
Разрешающее показание перегонного светофора (как минимум один блок-участок свободен) с указанием скорости у следующего светофора

Рис. 10. Пример из инструкции по сигнализации на ж. д. Италии



Разрешающее показание перегонного светофора (как минимум один блок-участок свободен) с указанием скорости у следующего светофора

Рис. 11. Пример из инструкции по сигнализации на ж. д. Словакии



Разрешающее показание станционного светофора (как минимум два блок-участка свободны) с указанием ограничения скорости на первом блок-участке

Рис. 12. Пример из инструкции по сигнализации на ж. д. Венгрии

Однако и добавленные показания недостаточны для передачи информации на поезд, следующий в скоростном и высокоскоростном сообщении. Так, для обеспечения следования со скоростью выше 200 км/ч необходимо передавать на поезд несколько десятков комбинаций скоростных ступеней. При этом время устойчивого восприятия показания напольного светофора при данной скорости ограничено несколькими секундами. По этой причине на выделенных высокоскоростных линиях отказались от использования напольных светофоров и необходимую информацию на поезд передают с помощью АЛСН (АЛС непрерывного типа) — через рельсовые цепи или по радиоканалу. Например, в проекте высокоскоростной линии VDE 8 на новых участках магистрали Берлин — Мюнхен [14, 15] (до 300 км/ч) отказались от использования проходных светофоров. В проекте строящейся высокоскоростной линии в Египте (до 250 км/ч) отказались от использования как проходных, так и станционных (входных, выходных, маршрутных и маневровых) напольных сигналов.

Благодаря этому на новых линиях высокоскоростных магистралей перестают применять такие термины, как «правильное» и «неправильное» направление движения. Разве что установленные для удобства пассажиров указатели регулярного направления движения поездов на платформах еще долго будут напоминать нам о временах, когда не только места посадки пассажиров, но и пути на перегонах были специализированы по направлениям. Ну и, конечно, старые линии как рудименты первых шагов развития железных дорог — по месту расположения напольных светофоров — расскажут нам о принятом когда-то в этой стране направлении движения.

В следующем разделе представлен сравнительный анализ современных отечественных и зарубежных систем, исключая использование проходных светофоров и, таким образом, не специализированных под определенное направление движения.

5. Будущее наступает

Разработанная для железных дорог России система АЛСО (автоматическая локомотивная сигнализация как самостоятельное средство сигнализации и связи) обеспечивает движение



Рис. 13. Знак границы блок-участка в системе АЛСО

поездов на перегоне по сигналам локомотивных светофоров, где отдельными пунктами являются обозначенные границы блок-участков (рис. 13).

Преимуществом данной системы является отсутствие на перегонах проходных светофоров, повторяющих показание локомотивных сигналов, и таким образом происходит минимизация оборудования на перегонах без ущерба пропускной способности. Недостатком системы является невозможность регулярного следования по перегону локомотивов с неисправной системой АЛСН.

Новым шагом в дальнейшем развитии бессигнальной автоблокировки стала система АБТЦ-М (микропроцессорная автоблокировка с тональными рельсовыми цепями с централизованным размещением аппаратуры), которая создала условия для отказа от проходных светофоров и представленных на рис. 13 границ

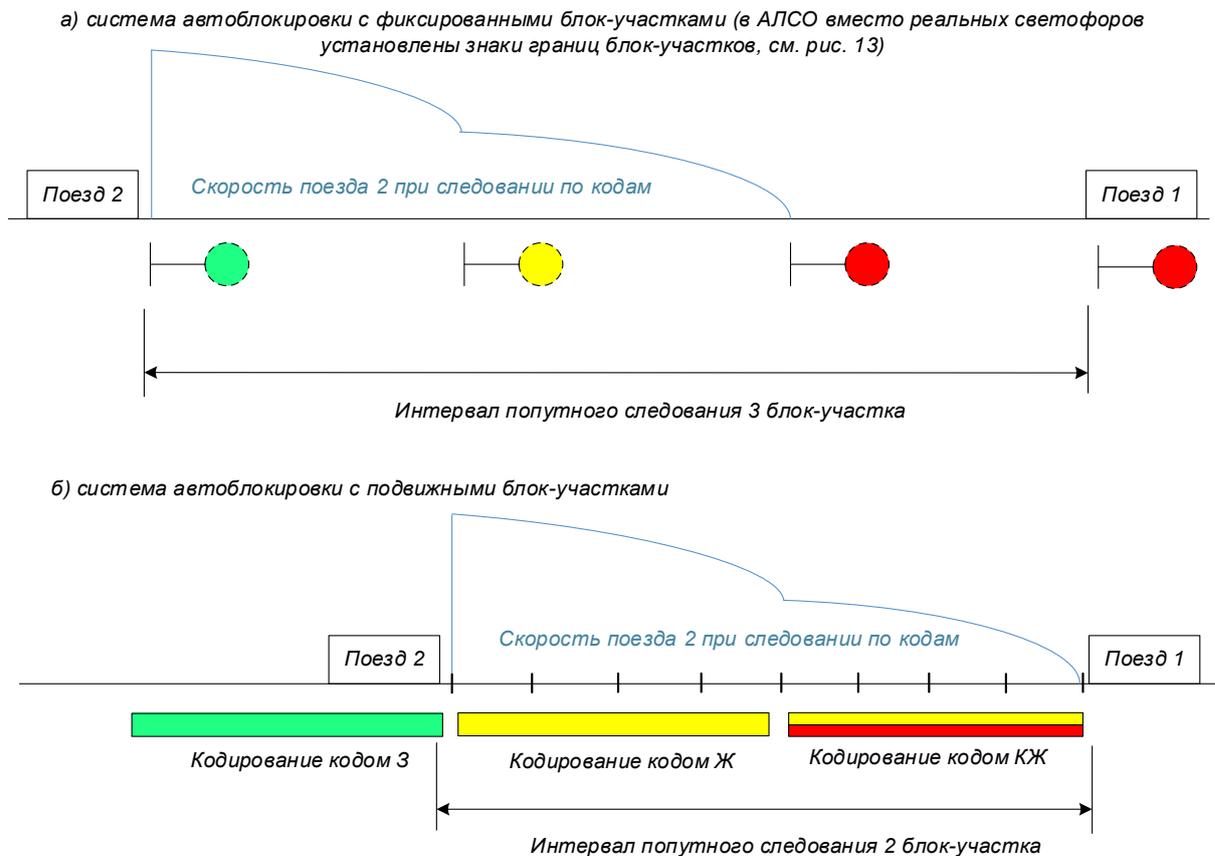


Рис. 14. Сравнение пропускной способности бессигнальных систем автоблокировки с фиксированной и подвижной границей блок-участков

блок-участков, сосредоточившись на разделении поездов определенным количеством тональных рельсовых цепей. Пока расстояние между поездами превышает длину двух блок-участков, следующий позади поезд получает код 3. При сокращении этого расстояния передается код Ж, а при достижении длины одного блок-участка — код КЖ, требующий готовности к остановке поезда перед препятствием. На рис. 14 представлено сравнение двух систем автоблокировки (с фиксированными и подвижными блок-участками) без использования защитных участков.

Разработанная европейским концерном компаний-производителей техники СЦБ и внедряемая на железных дорогах мира унифицированная система ETCS [16] по своему принципу действия во многом похожа на системы АЛСО с фиксированными (аналог ETCS L2 [17], см. знак границы блок-участка ETCS L2 на рис. 15) и АБТЦ-М с подвижными блок-участками [18] (аналог ETCS L3 [19]). Разница заключается в системе передачи информации на поезд (в российских системах по рельсовым цепям,

в единой европейской системе ETCS по радиоканалу), характере информации (о скоростной ступени кода АЛСН в начале и конце блок-участка либо о расстоянии до препятствия в системе ETCS), а также в методах определения местоположения поезда в системах с подвижными или квазиподвижными блок-участками [20]. Так, в системе АБТЦ-М информация о местоположении поезда поступает от тональных рельсовых цепей, и поэтому точность определения позиции поезда ограничена их длиной. В системе ETCS L3 информация о местоположении поезда поступает от бортовых устройств, и поэтому ее точность определяется удалением от последнего приемопередатчика [21]. Ее погрешность, в соответствии с п. 5.3.1.1 UNISIG Subset 041, не должна превышать 5 % от указанного расстояния. Таким образом, при условии размещения приемопередатчиков на каждом километре пути ошибка в определении местоположения поезда может достигать порядка 50 метров, что существенно меньше длин рельсовых цепей на перегоне и может обеспечить более короткий интервал попутного следования (рис. 16).



Рис. 15. Знак границы блок-участка в системе ETCS L2

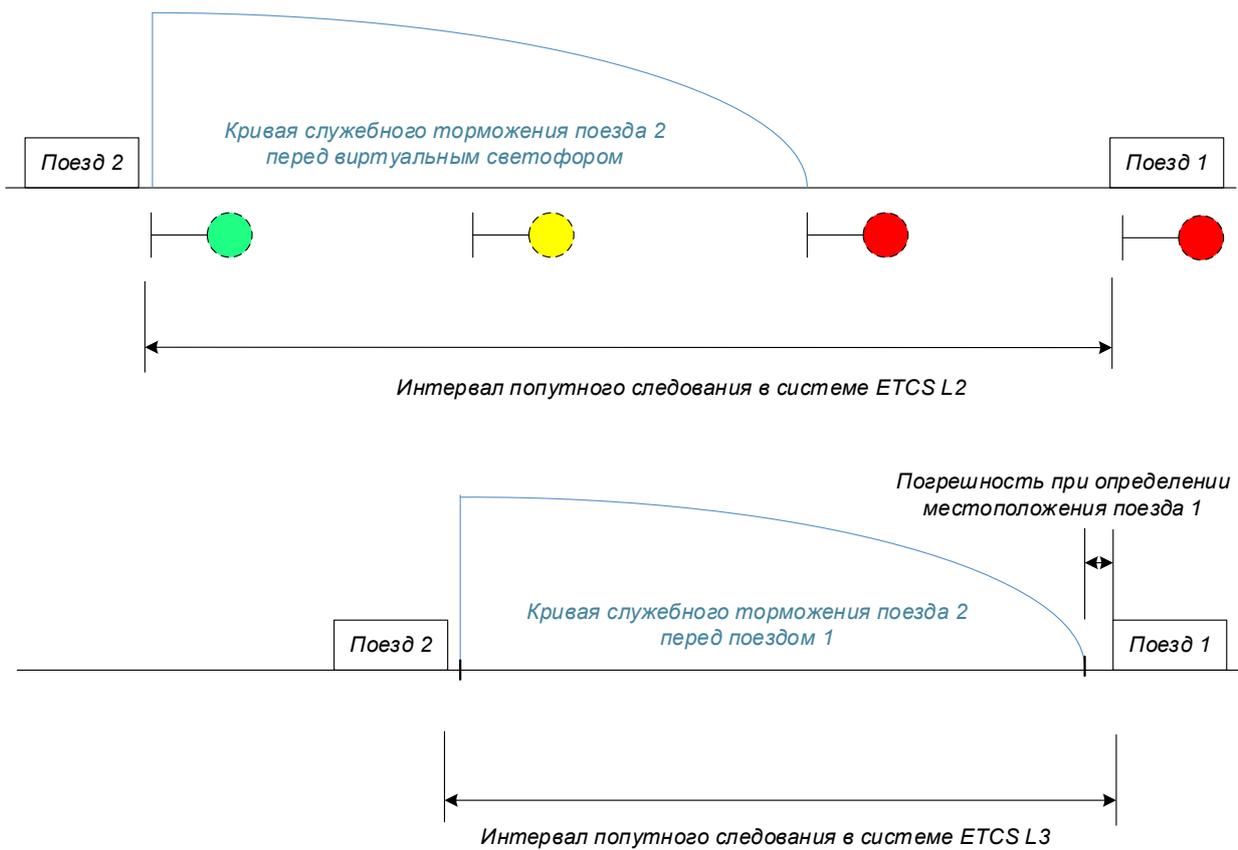


Рис. 16. Сравнение пропускной способности в системах ETCS L2 и ETCS L3

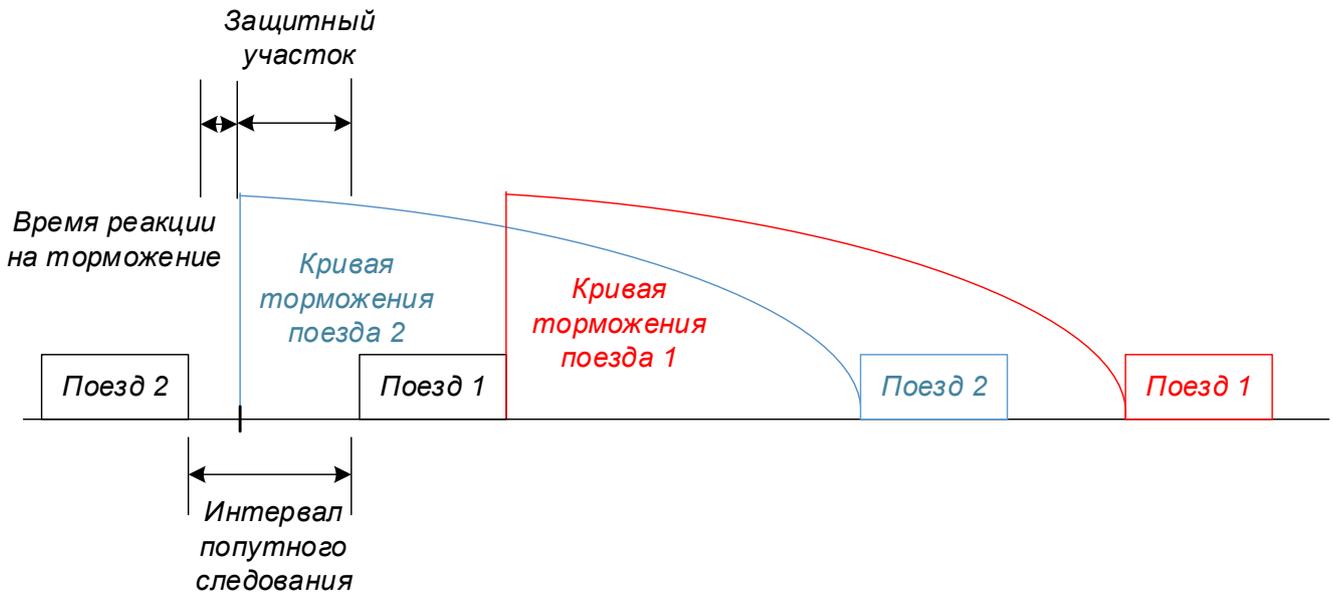


Рис. 17. Следование попутных поездов с интервалом, определяемым разницей длин тормозных путей

В настоящее время разрабатываются и иные бессигнальные системы обеспечения безопасности движения поездов с подвижными блок-участками, использующие принцип сравнения тормозных путей, следующих в попутном направлении поездов [22, 23]. Так, на однопутных грузовых железных дорогах частных компаний США, не оборудованных системами безопасности кроме радиосвязи для переговоров между машинистами с участием диспетчера, отправление пакета следующих в попутном направлении поездов начинается с самого тяжелого поезда и заканчивается самым легким. При необходимости их торможения при следовании по перегону информация передается от впереди идущего поезда на следующие, имеющие — в соответствии с их весовыми категориями — при равной скорости следования более короткую длину тормозного пути и поэтому достаточно времени на получение информации и реакцию машиниста. Таким образом, расстояние между следующими в попутном направлении движения поездами ограничивается не длиной тормозного пути позади идущего поезда, как в системе ETCS L3, а разницей длин между тормозными путями обоих поездов, которая может быть как угодно близка к нулю, отличаясь от него лишь временем, необходимым на реакцию машиниста или системы.

Иным направлением развития систем с подвижными блок-участками являются метрополитены [24]. Для достижения минимального интервала следования некоторые разработчики, вместе с расстоянием до занятого первым поездом участка, передают на следующий состав информацию о его скорости. С учетом идентичных тормозных характеристик метропоездов интервал попутного следования может достигать нескольких десятков метров, необходимых на передачу информации о торможении и времени реакции на нее второго поезда (рис. 17).

Вместе с тем такое решение не является бесспорным в двух случаях:

- при сходе с пути первого поезда его тормозной путь значительно меньше тормозного пути при экстренном торможении, что может вызвать столкновение с ним позади идущего поезда;
- при различных маршрутах следования поездов между ними потребуется осуществить перевод стрелки. Этот перевод должен быть завершен до того времени, как следующий позади поезд достигнет места, обеспечивающего экстренное торможение на случай недостижения стрелкой конечного положения в случае каких-либо неисправностей. Таким образом, расстояние между метропоездами перед предусмотренной для перевода стрелкой должно быть увеличено как минимум до длины тормозного пути последнего поезда.

Заключение

Основными показателями эффективности транспорта являются не только его скорость и стоимость перевозок, но и достигаемая пропускная способность, а также высокая безопасность движения. С этой точки зрения были оценены перспективные системы интервального регулирования движения поездов с фиксированными и подвижными блок-участками. Основные результаты этого анализа приведены ниже:

– следующим направлением развития принципов автоблокировки для железных дорог могут стать бессигнальные системы, эквивалентные отечественным (АЛСО) и зарубежным (ETCS L2) системам интервального регулирования движения поездов (СИРДП);

– для пригородного и городского подземного рельсового транспорта в настоящее время требуются СИРДП с минимально возможным интервалом попутного следования. Для таких задач наиболее перспективны системы АБТЦ-М и ETCS L3 либо аналог последнего для метрополитенов СВТС (Communications-Based Train Control);

– решающими в определении интервалов попутного следования являются не устройства контроля свободности участка пути (рельсовые цепи, счетчики осей или сообщения о местоположении остальных поездов на участке) или системы передачи данных локомотивной сигнализации на поезд (по рельсовым цепям или радиоканалу), а заложенные в архитектуру систем принципы СИРДП с сигналами или без них с фиксированными блок-участками, а также с подвижными блок-участками с учетом или без учета тормозного пути впереди идущего поезда;

– системы с подвижными блок-участками имеют ограничения, определяемые требованиями к безопасности движения. Представление впереди идущего поезда не в качестве неподвижного объекта, а в динамическом виде с учетом его скорости и тормозных характеристик позволяет уменьшить интервал попутного следования следующих с одинаковой скоростью поездов до нескольких десятков метров. В то же время такое решение имеет ряд ограничений с точки зрения безопасности движения и гибкости оперативного управления транспортом. ▲

Библиографический список

1. Sagiv I. The Image of the Rider on Greco-Roman Engraved Gems from the Israel Museum (Jerusalem) / I. Sagiv // *ISTRAŽIVANJA, Journal of Historical Research*. — 2016. — №. 27. — Pp. 33–44.
2. Rovithis-Livaniou E. Astronomical Symbols on Coins of the Roman Empire-Part I: 27 BC to 96 AD / E. Rovithis-Livaniou, F. Rovithis // *Romanian Astron. J.* — 2015. — Vol. 25. — P. 129.
3. Clancy M. Innovations in Transport in Eighteenth and Nineteenth Century Limerick. The Turnpike Roads / M. Clancy // Martina Clancy, Limerick Civic Trust. — 2008.
4. Marshall C. F. A History of Railway Locomotives down to the end of the year 1831 / C. F. Marshall. — BoD — Books on Demand, 2012.
5. Caron F. The Evolution of the Technical System of Railways in France from 1832 to 1937 / F. Caron // *The development of large technical systems*. — Routledge, 2019. — Pp. 69–103.
6. Theeg G. Railway Signalling & Interlocking / G. Theeg, S. Vlasenko // *International Compendium*. Hamburg, Eurailpress. — 2009. — P. 448.
7. Mimeur C. Revisiting the structuring effect of transportation infrastructure: an empirical approach with the French Railway Network from 1860 to 1910 / C. Mimeur et al. // *Historical Methods: A Journal of Quantitative and Interdisciplinary History*. — 2018. — Vol. 51. — №. 2. — Pp. 65–81.
8. Mellor R. E. H. German railways: A study in the historical geography of transport / R. E. H. Mellor. — Routledge, 2021. — Vol. 14.
9. Zeller T. Driving Germany: The Landscape of the German Autobahn, 1930–1970 / T. Zeller. — Berghahn Books, 2007. — Vol. 5.
10. Rumar K. The Swedish National Road Safety Program. New Approach to Road Safety Work / K. Rumar // *Transportation, Traffic Safety and Health*. — Springer. Berlin, Heidelberg, 1997. — Pp. 73–86.
11. Roesel F. The causal effect of wrong-hand drive vehicles on road safety / F. Roesel // *Economics of transportation*. — 2017. — Vol. 11. — Pp. 15–22.
12. World Health Organization. Global status report on road safety 2015. — World Health Organization, 2015.
13. Abed S. K. European rail traffic management system in overview / S. K. Abed // *2010 First International Conference for Energy, Power and Control (EPC-IQ)*. — IEEE, 2010. — Pp. 173–180.
14. Massel A. Nowe połączenie Berlin — Monachium. Charakterystyka eksploacyjna / A. Massel // *TTS Technika Transportu Szynowego*. — 2018. — Vol. 25.
15. Feldwisch W. Die Verkehrsprojekte Deutsche Einheit (VDE) — Schienenprojekte / W. Feldwisch // *ETR Spezial*. — 2017. — №. 12. — Pp. 68–73.
16. Palumbo M. Railway Signalling since the Birth to ERTMS / M. Palumbo // *E-Journal Railway Signalling Europe*. — 2013. — URL: <https://www.railwaysignalling.eu>.
17. Vignali V. A methodology for the design of sections block length on ETCS L2 railway networks / V. Vignali et al. // *Journal of Rail Transport Planning & Management*. — 2020. — Vol. 13. — Pp. 100–160.

18. Розенберг Е. Н. Принципы построения систем управления и интервального регулирования движением поездов четвертого поколения / Е. Н. Розенберг // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019). — 2019. — С. 27–32.
 19. Mikulčić M. Railway Capacity Enhancement with Modern Signalling Systems — A Literature Review / M. Mikulčić, T. J. Mlinarić // *Promet-Traffic & Transportation*. — 2021. — Vol. 33. — №. 1. — Pp. 141–152.
 20. Basile D. Exploring the ERTMS/ETCS full moving block specification: an experience with formal methods / D. Basile et al. // *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*. — 2022. — Vol. 24. — №. 3. — Pp. 351–370.
 21. Deutsch P. Overview ERTMS/ETCS Baseline 3 and beyond / P. Deutsch // *Operating Rules and Interoperability in Trans-*
- National High-Speed Rail. — Springer, Cham, 2022. — Pp. 29–94.
 22. Ranjbar V. Migration to ERTMS for dense traffic lines: investigation methodologies and application to the Stockholm Citybanan case study / V. Ranjbar // *Tecnoscienza: Italian Journal of Science & Technology Studies*. — 2021.
 23. Ranjbar V. Impact of signalling system on capacity. Comparing legacy ATC, ETCS Level 2 and ETCS Hybrid Level 3 systems / V. Ranjbar, N. O. E. Olsson, H. Sipilä // *Journal of Rail Transport Planning & Management*. — 2022. — Vol. 23.
 24. Ferrari A. Model-based evaluation of the availability of a CBTC system / A. Ferrari et al. // *International Workshop on Software Engineering for Resilient Systems*. — Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. — Pp. 165–179.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2022, Vol. 8, No. 4, pp. 427–440
DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-04-427-440

Right- and Left-Hand Traffic on the World Railways: History and Future

Information about authors

Vlasenko S. V., Doctor of Engineering, Associate Professor¹.

E-mail: vlasenko@fh-erfurt.de

Orunbekov M. B., Senior Lecturer². E-mail: m.orunbekov@alt.edu.ru

¹Omsk State Transport University, “Railway Signaling” Department, Omsk

²Academy of Logistics and Transport, “Automatization and Control” Department, Almaty

Abstract: Starting with historical references on traffic direction choice and how railway transport has become the reason for the predomination of right-hand traffic on transport other kinds, the authors dwelled on the examples of traffic directions on automotive and partially air and sea transport and then went to forecasting the future in the definition of motion directions on railway transport, technical limitations of the systems with floor traffic lights and approached to the analysis of signalless systems of traffic control with fixed block-plots and then with mobile ones. It was shown that modern solutions for high-speed lines should exclude fixed signals. The main domestic and foreign examples for the design and exploitation of such systems at the world railways and subways as well as advantages and disadvantages in terms of traffic capacity and safety were demonstrated.

The comparison of domestic and foreign systems of interval regulation of train traffic was made in the article final part. The fundamental similarity of Russia signalless automatic blocking system “ALSO” with all-European system ETCS L2, preserving block-plot fixed lengths but excluding the use of checkpoint traffic lights, was demonstrated. In addition, the common principles for “ABTC-M” system, used on Russia railways, and ETCS L3 system with mobile block-plots, which rules out the use of traffic lights as well as the devices for track section vacancy control, are indicated. Both systems exclude fixed signals and fixed block sections. Then the example of the systems at railways and subways with mobile block-plots was demonstrated – the systems work on the difference in braking distances of trains, running in the same direction. These systems ensure the shortest headway thanks to data on speed and

braking curve of a leading train. But such systems have a lot of limitations in terms of railway operation and safety.

Keywords: story of moving directions; automatic block systems for motion in one and in both directions; one- and two-way systems of automatic blocking; signal visibility problem; etymology of international word “chauffeur”; right- and left-hand traffic at international highways and railways; signaling; automatic blocking with fixed and mobile block-plots; comparison of traffic capacity; traffic safety; automatic locomotive signaling “ALSO”; automatic blocking “ABTC-M”; ETCS L2 and L3 systems for train traffic control.

References

1. Sagiv I. The Image of the Rider on Greco-Roman Engraved Gems from the Israel Museum (Jerusalem). *ISTRAŽIVANJA, Journal of Historical Research*. 2016, 1. 27, pp. 33–44.
2. Rovithis-Livaniou E., Rovithis F. Astronomical Symbols on Coins of the Roman Empire-Part I: 27 BC to 96 AD. *Romanian Astron. J.* 2015, vol. 25, pp. 129.
3. Clancy M. *Innovations in Transport in Eighteenth and Nineteenth Century Limerick. The Turnpike Roads*. Martina Clancy, Limerick Civic Trust. 2008.
4. Marshall C. F. *A History of Railway Locomotives down to the end of the year 1831*. BoD—Books on Demand, 2012.
5. Caron F. *The Evolution of the Technical System of Railways in France from 1832 to 1937. The development of large technical systems*. Routledge, 2019, pp. 69–103.
6. Theeg G., Vlasenko S. *Railway Signalling & Interlocking*. International Compendium. Hamburg, Eurailpress. 2009, p. 448.
7. Mimeur C. et al. Revisiting the structuring effect of transportation infrastructure: an empirical approach with the French Railway Network from 1860 to 1910. *Historical Methods: A Journal of Quantitative and Interdisciplinary History*. 2018, vol. 51, 1. 2, pp. 65–81.
8. Mellor R. E. H. *German railways: A study in the historical geography of transport*. Routledge, 2021, 1. 14.
9. Zeller T. *Driving Germany: The Landscape of the German Autobahn, 1930–1970*. Berghahn Books, 2007, vol. 5.
10. Rumar K. *The Swedish National Road Safety Program. New Approach to Road Safety Work*. Transportation, Traffic Safety and Health. Springer, Berlin, Heidelberg, 1997, pp. 73–86.
11. Roesel F. The causal effect of wrong-hand drive vehicles on road safety. *Economics of transportation*. 2017, vol. 11, pp. 15–22.

12. World Health Organization. Global status report on road safety 2015. World Health Organization, 2015.
13. Abed S. K. European rail traffic management system in overview. 2010 First International Conference for Energy, Power and Control (EPC-IQ). IEEE, 2010. pp. 173–180.
14. Massel A. Nowe połączenie Berlin–Monachium. Charakterystyka eksploatacyjna. TTS Technika Transportu Szybowego. 2018, vol. 25.
15. Feldwisch W. Die Verkehrsprojekte Deutsche Einheit (VDE). Schienenprojekte. „ETR Spezial“ 2017, I. 12, pp. 68–73.
16. Palumbo M. Railway Signalling since the Birth to ERTMS. E-Journal Railway Signalling Europe. 2013. Available at: <https://www.railwaysignalling.eu>
17. Vignali V. et al. A methodology for the design of sections block length on ETCS L2 railway networks. Journal of Rail Transport Planning & Management. 2020, vol. 13, pp. 100–160.
18. Rozenberg E. N. Printsipy postroeniya sistem upravleniya i interval'nogo regulirovaniya dvizheniem poezdov chetvertogo pokoleniya [Principles of construction of control systems and interval regulation of the movement of trains of the fourth generation]. *Intellektual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporcie. Komp'yuternoe i matematicheskoe modelirovanie (ISUZhT-2019)* [Intelligent control systems for railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZhT-2019)]. 2019, pp. 27–32.
19. Mikulčić M., Mlinarić T. J. Railway Capacity Enhancement with Modern Signalling Systems—A Literature Review. *Promet-Traffic&Transportation*. 2021, vol. 33, I. 1, pp. 141–152.
20. Basile D. et al. Exploring the ERTMS/ETCS full moving block specification: an experience with formal methods. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*. 2022, vol. 24. I. 3, pp. 351–370.
21. Deutsch P. Overview ERTMS/ETCS Baseline 3 and beyond. *Operating Rules and Interoperability in Trans-National High-Speed Rail*. Springer, Cham, 2022, pp. 29–94.
22. Ranjbar V. Migration to ERTMS for dense traffic lines: investigation methodologies and application to the Stockholm Citybanan case study. *Tecnoscienza: Italian Journal of Science & Technology Studies*. 2021.
23. Ranjbar V., Olsson N. O. E., Sipilä H. Impact of signalling system on capacity. Comparing legacy ATC, ETCS Level 2 and ETCS Hybrid Level 3 systems. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2022, V. 23.
24. Ferrari A. et al. Model-based evaluation of the availability of a CBTC system. *International Workshop on Software Engineering for Resilient Systems*. Springer. Berlin, Heidelberg, 2012, pp. 165–179.